

## СОДЕРЖАНИЕ

## CONTENTS

### «МОРСКАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ. БЕЗОПАСНОСТЬ МОРСКОЙ ИНДУСТРИИ» VI МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

### "MARINE TECHNOLOGY AND ENGINEERING. SAFETY OF THE MARINE INDUSTRY" VI INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE

#### СЕКЦИЯ «НАВИГАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ И ВЕДЕНИЯ ПРОМЫСЛА»

#### SECTION "NAVIGATION AND FISHING SAFETY"

<i>Алёшин А.А., Кубрин С.С.</i> Комплексная оценка риска при плавании в условиях Арктики .....	5
<i>Гуральник Б.С., Сирота А.К., Якута И.В.</i> К вопросу о безопасности балкера при разжижении груза .....	12
<i>Ермаков С.В.</i> Математическая модель колебаний чувствительного элемента магнитного компаса при малом отклонении его оси от плоскости компасного меридиана.....	17
<i>Загацкий В.Р., Лецинский М.Б., Лецинская Г.И., Никулин Т.Р.</i> Разработка типовой инструкции для линейки электролизно-водных генераторов.....	30
<i>Зотова Е.С.</i> Методологические основы управления работой флота.....	40
<i>Мойсеенко С.С., Мейлер Л.Е.</i> Структура комплекса задач оптимального проектирования мультимодальных грузоперевозок.....	45
<i>Степаненко Д.П.</i> Границы морских районов А2 и реальная дальность ПВ-радиосвязи в направлении «судно-берег».....	51
<i>Тимофеев В.К., Сухорук А.И., Сергиенко И.М.</i> Использование средств автоматической радиолокационной прокладки (САРП) для повышения безопасности рыбопромысловых судов на промысле в чрезвычайной ситуации, связанной с нападением пиратов .....	61
<i>Якута И.В., Гуральник Б.С., Филимонов И.В.</i> О необходимости учёта погодных условий в судовых программах расчёта остойчивости и общей продольной прочности .....	67

#### СЕКЦИЯ «ИННОВАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, ПОСТРОЙКИ И РЕМОНТА СУДОВ»

#### SECTION "INOVATIVE METHODS IN SHIP DESIGN, CONSTRUCTION AND REPAIR"

<i>Аннаоразов М.М., Дектярев А.В., Морозов В.Н.</i> Способ постройки судов в чистый размер с поэтапным контролем точности сборки и сварки корпусных конструкций группой контрольных измерений .....	78
---	----

<i>Батуев А.Д.</i> Статическое действие буксирного каната на бот .....	87
<i>Бураковский Е.П., Бураковский П.Е., Злыгостев Д.В., Сивограков А.А., Чуреев Е.А.</i> Экспериментальные исследования остойчивости судов при продольной качке в условиях заливаемости носовой оконечности .....	91
<i>Бураковский Е.П., Бураковский П.Е.</i> Определение гидродинамических давлений на палубы судов в носовой оконечности в штормовых условиях плавания .....	97
<i>Бураковский Е.П., Бураковский П.Е., Мыслик А.В.</i> Учет упругих свойств конструкции при деформировании локально загруженных шпангоутов в запредельном состоянии .....	105
<i>Веревкин В.И., Игушев В.Ф., Терюшева С.А.</i> Снижение трудоемкости защиты сварных металлоконструкций от электрохимической коррозии.....	111
<i>Дектярев А.В., Морозов В.Н.</i> Анализ применимости элементов объектов морской техники к аддитивному производству и их дальнейшие перспективы развития .....	117
<i>Дятченко С.В., Гойшинец И.В., Ковбаска Б.В.</i> Обоснование основных элементов научно-исследовательского судна с целью его дополнительного использования в учебных целях.....	127
<i>Зыонг Ван Тхань, Иванов В.П.</i> Вопросы методологии оптимизационного проектирования наливных рыболовных судов для морского рыболовства СРВ .....	136
<i>Зыонг Ван Тхань</i> Исследование характеристик вместимости современных среднетоннажных рыболовных судов наливного типа .....	148
<i>Игушев В.Ф., Веревкин В.И., Безмолова И.В., Зеброва Е.М.</i> Влияние состава флюса на механические свойства и содержание неметаллических включений в сварных швах при сварке судостроительных сталей.....	157
<i>Кирсанов П.И.</i> Расчет прочности моста катамарана методом конечных элементов.....	164
<i>Романюта Д.А., Злыгостев Д.В.</i> Анализ установок по исследованию сложного напряженного состояния в клеевом соединении .....	175
<i>Чуреев Е.А.</i> Исследование формы обводов маломерного рыболовного траулера с целью повышения его мореходных качеств .....	183

## СЕКЦИЯ «ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ СУДОВ»

### SECTION "ELECTRICAL EQUIPMENT OF SHIPS"

<i>Белей В.Ф.</i> Баланс реактивной мощности судовых энергосистем: проблемы и некоторые пути их решения.....	195
<i>Благинин В.А., Кажекин И.Е., Юсын В.М.</i> Структура защиты экипажей от смертельных электротравм и причины их недостаточной эффективности.....	201
<i>Бочарова Н. В., Шабалин Л.Д., Сивуха М.Э.</i> Модернизация системы управления и защиты электродвигателей насосов рулевого электропривода судна «Омский 135» проекта 1743.1 .....	206
<i>Кажекин И.Е.</i> Анализ возможности возникновения феррорезонансных процессов на основной гармонике в низковольтных судовых электросетях .....	210
<i>Кузнецов С.Е., Алексеев Н.А., Виноградов А.А.</i> Алгоритм минимизации расхода топлива при параллельной работе судовых дизель-генераторных агрегатов .....	218
<i>Павликов С.А.</i> Программа поиска неисправностей судового электрооборудования ....	222
<i>Приходько В.М., Приходько И.В., Саладин А.В.</i> Портативные тиристорные преобразователи .....	226
<i>Приходько В.М., Приходько И.В., Саладин А.В.</i> Сравнение способов аналитического и экспериментального определения параметров нулевой последовательности в технологическом процессе сушки судовых трансформаторов.....	237

<i>Шабалин Л.Д., Чушанков Д.Ю.</i> Перспективы применения сети постоянного тока на судах рыбопромыслового флота.....	241
<i>Шабалин Л.Д., Савенко А.Е., Савенко П.С.</i> Оптимизация работы рулевого электропривода морского судна в автоматическом режиме.....	249

## СЕКЦИЯ «СУДОВЫЕ И СТАЦИОНАРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ»

### SECTION "SHIP AND STATIONARY POWER PLANTS"

<i>Атаманов К.А., Толмачёв А.В.</i> Эффективность введения присадок в смазочные масла.....	255
<i>Бразновский В.К., Томилко В.Т.</i> Анализ качества эксплуатации вспомогательных котельных установок судов флота рыбной промышленности.....	262
<i>Глазков Д.Ю., Исаева М.В.</i> Оценка погрешностей моделей расчёта выбросов углерода.....	269
<i>Иванов Р.А., Арсеньев Ю.Н., Копытов Ю.В.</i> Математическая модель системы утилизации двуокиси углерода судовых энергетических установок.....	275
<i>Иванченко А.А., Ватолин Д.С.</i> Опыт эксплуатации двухтопливных дизельных установок судов проекта S1910.....	285
<i>Ковальчук Л.И., Исаева М.В.</i> Оценка качества практических методов расчета параметров многофакторных моделей.....	298
<i>Кункевич С.В.</i> О тепловом расчёте теплообменных аппаратов ТЭС.....	304
<i>Никифоров А.С., Кинжибекова А.К., Приходько Е.В., Карманов А.Е.</i> Энергетическая эффективность эксплуатации печей спекания.....	313
<i>Одинцов В. И.</i> Алгоритм диагностирования технического состояния двигателей судов рыбопромыслового флота при использовании измерительно-диагностического комплекса.....	316
<i>Резник В.М., Ключ О.В., Филонов А.Г.</i> К расчету капельного уноса в судовых дистилляционных опреснителях.....	324
<i>Селин В.В., Юрков С.В., Беркова Е.А.</i> Теоретические и прикладные аспекты распределенной энергетики Калининградской области на базе местных и возобновляемых топливно-энергетических ресурсов. Примеры разработки инновационных теплоэнергетических технологий и установок.....	331
<i>Филонов А.Г., Архипов М.И.</i> Сепарация капель в жалюзийном сепараторе пара с плоскими пластинами при низких давлениях.....	345
<i>Юрков С.В.</i> К вопросу о нормируемых показателях энергетической эффективности ТЭС на ТБО.....	352

## СЕКЦИЯ «ПРОМЫШЛЕННОЕ РЫБОЛОВСТВО»

### SECTION "COMMERCIAL FISHING"

<i>Бальчитис К.В., Суконнов А.В.</i> Экспериментальная оценка влияния параметров канатоукладчиков на канатоемкость навивных барабанов.....	360
<i>Долин Г.М.</i> Паспортизация орудий рыболовства.....	364
<i>Долина В.М., Долин Г.М.</i> Проблемы сырьевой направленности рыбной отрасли.....	368
<i>Львова Е.Е., Суконнов А.В.</i> Экспериментальная оценка прочностных характеристик рыболовных нитей от их геометрических параметров.....	373

<i>Макаров В.В., Недоступ А.А.</i> Аппроксимация экспериментальных данных погружения и смещения стенки модели кошелькового невода .....	379
<i>Макаров В.В., Недоступ А.А.</i> Аппроксимация относительной скорости смещения стенки модели кошелькового невода .....	385
<i>Насенков П.В.</i> Сравнительные данные разрывной нагрузки нитевидных изделий с учетом применения различных конструкций улиточных креплений .....	390
<i>Насенков П.В., Недоступ А.А.</i> Испытание нитевидно-веревочных изделий в лаборатории рыболовных материалов «Дальрыбвтуза» .....	396
<i>Недоступ А.А., Ражнев А.О.</i> Принципы работы тралового зонда FURUNO CN-14 для задач компьютерной имитации .....	400
<i>Помогаева Т.В.</i> Особенности распределения промысловых скоплений килек в среднем Каспии в летний период .....	405
<i>Соколова Е.В., Недоступ А.А., Ботов В.В., Головин Е.Р.</i> Экспериментальное исследование модели закидного невода в гидроканале ОАО «МариНПО» .....	410

**СЕКЦИЯ «РАДИОФИЗИКА, РАДИОТЕХНИКА  
И ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ»**

**SECTION "APPLIED RADIOPHYSICS, RADIO ENGINEERING  
AND INFORMATION SECURITY"**

<i>Власова К.В., Пахотин В.А., Молостова С.В., Симонов Р.В.</i> Решение задачи обнаружения сигнала с неизвестными параметрами.....	417
<i>Волхонская Е.В., Коротей Е.В.</i> Модельная оценка поля излучения двухзеркальной антенны Кассегрена в рамках апертурного и токового методов .....	423
<i>Корнева И.П., Попцов Н.С.</i> Исследование судовых топлив и смазочных материалов с помощью ротационного вискозиметра .....	434
<i>Курилин И.В., Захаров В.Е.</i> Численное моделирование магнитного поля сердцевины магнитосферы.....	440
<i>Недоступ А.А., Ражнев А.О.</i> Моделирование работы радара с использованием цифровых моделей рельефа SRTM.....	451
<i>Подтопельный В.В.</i> Особенности адресной защиты в АСУ ТП .....	456
<i>Синявский Н.Я., Мершиев И.Г., Куприянова Г.С.</i> Метод для идентификации и оценки качества судовых топлив и смазочных материалов .....	463
<i>Снегирев Д.В., Синявский Н.Я.</i> Применение стимулированного эха в ядерном квадрупольном резонансе для регистрации обменных процессов.....	472

## СЕКЦИЯ «НАВИГАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ И ВЕДЕНИЯ ПРОМЫСЛА»

### SECTION "NAVIGATION AND FISHING SAFETY"

УДК 656.61.052

#### КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА РИСКА ПРИ ПЛАВАНИИ В УСЛОВИЯХ АРКТИКИ

<sup>1</sup>Алёшин Александр Александрович, аспирант

<sup>2</sup>Кубрин Сергей Сергеевич, д-р техн. наук, профессор

<sup>1</sup>Московская государственная академия водного транспорта – филиал Федерального ГБУ ВО «Государственный университет морского и речного флота им. адм. С.О. Макарова», г. Москва, Россия, e-mail: alexal280593@gmail.com

<sup>2</sup>ФГБОУ науки Институт проблем комплексного освоения недр Российской академии наук, г. Москва, Россия, e-mail: s\_kubrin@mail.ru

*Рассмотрен способ оценки рисков при помощи теории нечетких множеств. Проведен анализ факторов, влияющих на безопасность плавания в арктическом регионе, сформирован набор основных рисков, с которым судно столкнется в условиях Арктики. Предложенный способ проверен на примере плавания нефтеналивного танкера по Северному морскому пути в феврале*

Арктический шельф имеет важное геополитическое, стратегическое и экономическое значение для Российской Федерации на длительную перспективу, в особенности Западная Арктика – именно здесь сконцентрирован основной объем разведанных запасов углеводородного сырья. Это обозначено, в первую очередь, в государственной программе Российской Федерации "Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации на период до 2020 года", принятой Правительством Российской Федерации 21 апреля 2014 года. Из значительных проектов недалекого будущего на российском шельфе Арктики следует отметить:

- Штокмановское месторождение природного газа в Баренцевом море;
- Долгинское месторождение нефти в Печорском море;
- Нефтегазовое месторождение «Победа» в Карском море.

Перспективными также являются: развитие Хатангского шельфового нефтяного месторождения; газового проекта Арктик СПГ-2 (проект по добыче природного газа и по производству сжиженного природного газа на Гыданском полуострове).

По данным ФГКУ «Администрация Севморпути», объемы перевозок по Северному морскому пути (СМП) стремительно растут в последние годы – достигнув 10,7 млн. т. грузов в 2017 году. Стабильный рост объема перевозок и активное развитие нефтегазовых проектов порождают увеличение судопотока на трассах СМП. Это, в свою очередь, требует возрастающего внимания к безопасности плавания в данном регионе.

В настоящее время принимается комплекс мер по повышению безопасности плавания в Арктике. Так, 1 января 2017 года вступил в силу Международный кодекс для судов, эксплуатируемых в полярных водах, так же известный, как Полярный

кодекс. Он был принят Международной Морской организацией (далее – ИМО) через поправки в Международную конвенцию по охране человеческой жизни на море (СОЛАС) и Международную конвенцию по предотвращению загрязнения с судов (МАРПОЛ). Положения Кодекса применяются к флоту, который эксплуатируется в арктических и антарктических водах, и регулируют порядок и методы обеспечения безопасности судов в условиях ледовой обстановки: от стандартов конструкции судов до порядка осуществления перехода. В дополнение к этому, Полярный кодекс повышает требования к охране окружающей среды арктических вод, регулируя вопросы сброса отходов, топлива и остатков груза. К тому же, ведутся активные работы по повышению качества материально-технического обслуживания судов на трассах СМП, навигационной обстановки, точности работы спутниковых навигационных систем.

Описанные выше шаги, предпринимаемые в целях повышения безопасности плавания, ещё раз доказывают серьезную опасность условий плавания в данном регионе. Несмотря на осуществляемые в последние годы шаги, арктический регион остается огромной недостаточно изученной акваторией, скрывающей в себе множество опасностей для судоходства. Это вызывает потребность в адекватной оценке рисков при принятии тех или иных решений штурманским составом при управлении судном. В настоящее время, в соответствии с требованиями Международного кодекса управления безопасной эксплуатацией судов и предотвращением загрязнения (МКУБ), судоходные компании должны [1]:

- задокументировать политику по оценке риска;
- распределить ответственность и полномочия по оценке рисков среди персонала;
- обеспечить персоналу, задействованному в оценке риска, соответствующую подготовку и инструкции по методике оценки рисков;
- разработать процедуру (руководство) и инструкции по выбранному методу оценки рисков;
- обеспечить оформление и хранение отчётных документов по оценке рисков.

Данные требования кодекса отражены, в том числе, в Системе управления безопасностью (СУБ) судна, которая предусматривает процедуру оценки рисков в различных ситуациях, в том числе и при планировании перехода. Однако в сложившейся системе присутствуют некоторые недостатки. Так, существующие способы по оценке риска на борту судна не дают его точной, количественной и комплексной оценки. К тому же, раздел по оценке риска может быть слабо проработан в СУБ судна, и данной процедуре на борту может не уделяться должного внимания. Это касается, в первую очередь, сухогрузных судов и малых судов, обеспечивающих северный завоз. Наливных судов это касается в меньшей степени, так как к уровню безопасности на борту танкеров предъявляются дополнительные требования Международного морского Форума нефтяных компаний (ОКИМФ).

Таким образом, ставится задача получить такую методику по оценке риска, которая даст численную комплексную оценку на основе экспертного мнения. В данной статье предлагается рассмотреть процедуру оценки риска при помощи теории нечетких множеств.

Последовательность процедуры оценки риска при помощи теории нечетких множеств описывается следующим образом:

- Задание переменных степени вероятности реализации риска в лингвистической форме;
- Проведение анализа риска и рискообразующих факторов, степени уверенности в вероятности реализации каждого фактора риска и оценки возможного ущерба при реализации каждого риска.

- Расчет показателя риска проекта как взвешенное среднее вероятности неудачи по каждому фактору риска, где в качестве весов выступают величины возможного ущерба.

- Расчет меры сходства рассчитанной переменной риска проекта с каждым из термов заданной лингвистической переменной риска.

Рассмотрим определение обобщенного трапециевидного нечеткого числа. Обобщенное трапециевидное нечеткое число представляется в виде:

$$A = (a, b, c, d, w), \text{ где}$$

$a, b, c, d, w$  являются действительными числами, а  $0 \leq w \leq 1$ .

На рис. 1 представлено графическое изображение трапециевидного нечеткого числа. В задачах принятия решений переменная  $w$  является степенью уверенности лица, принимающего решение в том или ином мнении. Данное число принимает любые значения из отрезка  $[0; 1]$  и позволяет учесть в моделях неопределенность лица, принимающего решение, относительно тех или иных мнений.

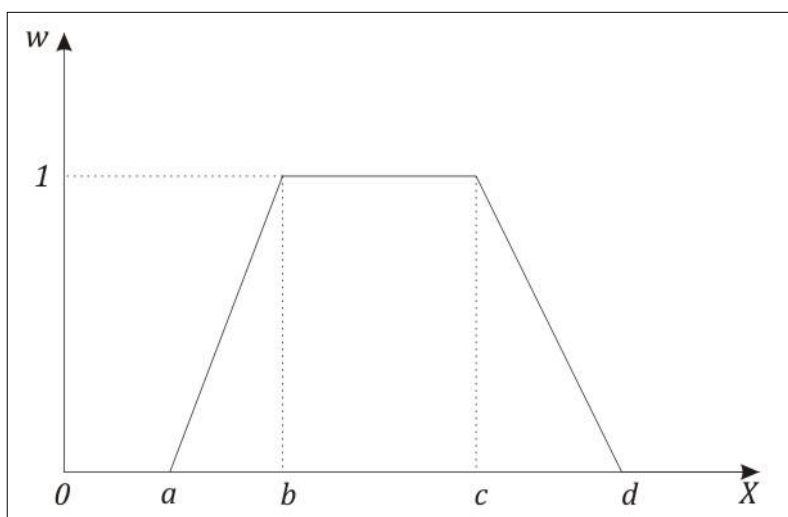


Рис. 1. Графическое изображение трапециевидного нечеткого числа

Лингвистическая переменная задается в следующей форме [2]:

Таблица 1

### Лингвистические термы

№	Название терма	Координаты
1	Крайне низкий	(0,0; 0,0; 0,0; 0,0; 1,0)
2	Очень низкий	(0,0; 0,0; 0,02; 0,07; 1,0)
3	Низкий	(0,04; 0,1; 0,18; 0,23; 1,0)
4	Достаточно низкий	(0,17; 0,22; 0,36; 0,42; 1,0)
5	Средний	(0,32; 0,41; 0,58; 0,65; 1,0)
6	Достаточно высокий	(0,58; 0,63; 0,80; 0,86; 1,0)
7	Высокий	(0,72; 0,78; 0,92; 0,97; 1,0)
8	Очень высокий	(0,93; 0,98; 1,0; 1,0; 1,0)
9	Экстремальный	(1,0; 1,0; 1,0; 1,0; 1,0)

Самым распространенным видом представления качественного анализа риска является таблица, состоящая из следующих столбцов: наименование риска, оценка

вероятности реализации риска, возможный ущерб и степень уверенности эксперта в оценке вероятности реализации риска (табл. 2) [3].

Таблица 2

**Оценка вероятности реализации рисков, возможного ущерба и уверенности в заданных оценках**

Наименование риска	Оценка вероятности реализации риска $P$	Возможный ущерб $W$	Степень уверенности в оценке вероятности реализации риска $w$
Риск 1	Высокий	Низкий	0.8
...	...	...	...
Риск N	Средний	Высокий	0,7

Рассчитать показатель риска маршрута перехода с учетом имеющихся характеристик вероятности реализации, величины возможного ущерба и степени уверенности эксперта в оценке вероятности реализации следует как средневзвешенное среднее вероятности неудачи по каждому фактору риска, где в качестве весов выступают величины ущерба [4]:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot W_i}{\sum_{i=1}^n W_i}, \quad (1)$$

где  $P_i$  – вероятность реализации  $i$ -го риска;

$W_i$  – величина ущерба при реализации  $i$ -го риска.

Все элементы данной формулы являются нечеткими числами, выбираемые в соответствии с лингвистическим термом из табл. 1. Это означает, что все расчеты должны проводиться в соответствии с методами проведения арифметических операций для нечетких чисел, указанные в формулах (2-4)[4]:

$$A_1 + A_2 = (a_1 + a_2; b_1 + b_2; c_1 + c_2; d_1 + d_2; \min(w_{A_1}, w_{A_2})), \quad (2)$$

$$A_1 \cdot A_2 = (a_1 \cdot a_2; b_1 \cdot b_2; c_1 \cdot c_2; d_1 \cdot d_2; \min(w_{A_1}, w_{A_2})), \quad (3)$$

$$A_1/A_2 = (a_1/a_2; b_1/b_2; c_1/c_2; d_1/d_2; \min(w_{A_1}, w_{A_2})). \quad (4)$$

Таким образом, получим запись переменной риска в виде трапециевидного нечеткого числа:

$$R = (a, b, c, d, w_R). \quad (5)$$

Рассчитаем меру сходства полученной в предыдущем пункте переменной риска с каждым из термов заданной ранее лингвистической переменной риска по следующей формуле[4]:

$$S(R; term_i) = \frac{1}{1 + |P(R) - P(term_i)| + |w_R - w_{term_i}|}, \quad (6)$$

где  $P(R)$  - средняя интеграция переменной риска; для трапециевидного нечеткого числа  $P(A) = \frac{1}{6}(c + 2a + 2b + d)$ ;

$P_{term}$  – средняя интеграция лингвистической переменной риска.



На основе расчета меры сходства получим, какому из термов наиболее соответствует риск при плавании в заданных условиях.

Рассмотрим теперь представленный способ оценки риска на примере оценки риска для нефтеналивного танкера ледового класса ЛУ1 с грузом сырой нефти в различных условиях в арктическом регионе.

Во-первых, необходимо перечислить основные риски, с которыми судно может столкнуться при плавании в Арктике: посадка на мель, ледовый плен, повреждения корпуса и/или винторулевого комплекса, потеря остойчивости, столкновение с другими судами, отказы навигационного оборудования, ошибки судоводителя, аварийный сброс нефти и нефтесодержащих вод, гибель людей, увечья/травмы.

Перечислим основные факторы, образующие представленные выше риски:

- степень соответствия класса судна ледовым условиям;
- качество проработки маршрута перехода;
- малая изученность района плавания;
- тяжелая ледовая обстановка;
- человеческий фактор усугубляемый воздействием полярных дня и ночи, удаленностью региона, недостатком опыта работы в специфических условиях;
- обледенение;
- искажение радиолокационной картины осадками, ледовыми полями;
- вид груза;
- соответствующее обеспечение судов актуальной и навигационной и гидрометеорологической информацией;
- своевременная доступность вспомогательных судов – ледоколов, буксиров и пр.;
- снижение эффективности работы навигационных приборов в высоких широтах и в ледовом плавании;
- удаленность баз снабжения, доступа к медицинской помощи и помощи при аварийной ситуации;
- суровый климат, влияющий на безопасность проведения работ на палубе.

В табл. 3 представлен качественный анализ риска для нефтеналивного танкера ледового класса ЛУ1 с грузом сырой нефти при плавании по маршруту Мурманск – Хатангский залив в феврале. В соответствии с требованиями Российского морского регистра судоходства, ледовый класс ЛУ1 позволяет самостоятельное эпизодическое плавание в мелкобитом разреженном льду неарктических морей и в сплошном льду в канале за ледоколом при толщине льда до 0,4 м. Маршрут проходит через Баренцево море, обходя Новую Землю с севера – мимо мыса Желания, далее, через Карское море проливом Вилькицкого в море Лаптевых. Гидрометеорологические условия плавания в Баренцевом море в феврале достаточно сложны. Одной из причин, затрудняющих плавание, являются штормы, наиболее частые здесь с октября по март. Неблагоприятная обстановка для судоходства создается при ухудшении видимости во время осадков и туманов. Значительно осложняет плавание судов сильное волнение. Угрозу безопасности плавания судов представляет их обледенение[5]. Обледенение надстроек, конструкций и корпуса несет с собой множество рисков – так, могут быть повреждены элементы навигационных приборов и средств связи (антенны и пр.), а в худшем случае возможно потеря остойчивости судна при тяжелом обледенении.

С ледовой обстановкой судно столкнется после прохождения мыса Желания – здесь становится необходима ледокольная проводка. Толщины льдов на протяжении дальнейшего маршрута могут достигать 120-140 см. При оценке вероятности реализации риска получения повреждений следует учитывать, что, зачастую, суда получают повреждения именно при ледокольной проводке на коротком буксире. В феврале характерной особенностью Карского моря является наличие зоны повышенной

торосистости (до 2–3 баллов), которая простирается от архипелага Северная Земля на запад и захватывает северную половину пролива Вилькицкого. В море Лаптевых возрастает риск посадки судна на мель – здесь около половины моря — пологая материковая отмель со средней глубиной менее или немногим более 50 метров [6]. В дополнение к этому, здесь сказывается малая изученность арктических морей. Экстремально низкие температуры, обледенение сопровождают судно на протяжении всего маршрута, что затрудняет и делает более опасной работу экипажа на палубе, а наличие сплошных ледовых полей затрудняет борьбу с аварийным разливом нефти и усугубляет возможные последствия.

Таблица 3

**Анализ рисков нефтеналивного танкера ледового класса ЛУ1 с грузом сырой нефти при плавании по маршруту Мурманск – Хатангский залив в феврале**

Наименование риска	Оценка вероятности реализации риска $P$	Возможный ущерб $W$	Степень уверенности в оценке вероятности реализации риска $w$
Зажатие во льдах	Высокий	Очень высокий	0,8
Повреждения корпуса и/или винторулевого комплекса	Очень высокий	Очень высокий	0,8
Посадка на мель	Средний	Высокий	0,7
Потеря остойчивости	Достаточно высокий	Экстремальный	0,9
Столкновение	Низкий	Высокий	1,0
Отказы и поломки навигационного оборудования	Достаточно высокий	Достаточно высокий	0,9
Аварийный сброс нефти и нефтесодержащих вод	Достаточно низкий	Очень высокий	0,8
Потеря или порча груза	Средний	Очень высокий	0,9
Гибель людей, травмы, увечья	Достаточно высокий	Экстремальный	0,9

Проведя расчеты по формулам (1-4), получим следующее значение риска в виде трапециевидного нечеткого числа:

$$R = (0,41; 0,47; 0,62; 0,67; 0,7)$$

Затем определим меру сходства полученной переменной риска проекта с каждым из термов заданной ранее лингвистической переменной риска по формуле (6) и представим результат в табл. 4

Таблица 4

**Результат оценки риска**

Название терма	Мера сходства
Крайне низкий	0,533
Очень низкий	0,537
Низкий	0,567
Достаточно низкий	0,618
Средний	0,700
Достаточно высокий	0,713
Высокий	0,650
Очень высокий	0,591
Экстремальный	0,581

В соответствии с результатами расчетов следует принять, что общий уровень риска для судна в заданных условиях соответствует терму «Достаточно высокий». Это означает, что необходимо принять дополнительные меры по повышению безопасности плавания в текущих условиях.

Предложенный способ по оценке рисков на основе теории нечетких множеств позволяет получить количественную оценку риска при плавании в условиях Арктике. К тому же, важным преимуществом данного метода является учет степени уверенности судоводителя в оценке каждого из рисков, что также отражается на полученной комплексной оценке риска.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ключев В. В., Кондратьев С. И., Тульчинский В. И. Оценка рисков и управление рисками в практике судовождения // Эксплуатация морского транспорта. 2018. № 3 (80). С. 18–25.
2. Chen S.J., Chen S.M. Fuzzy risk analysis based on similarity measures of generalized fuzzy numbers // Expert systems with applications. 2008. Vol.35. p. 6833-6842.
3. Риск-менеджмент инвестиционного проекта / по ред. М.В. Грачевой, А.Б. Секерина. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2009. 544 с.
4. Гавриленко М.А. Применение теории нечетких множеств в оценке рисков инвестиционных проектов// Аудит и финансовый анализ.2013. №5. С.75-81.
5. Лодия Баренцева моря, часть II. СПб.: ГУНИО МО РФ. 1995. 464 с.
6. Добровольский А. Д., Залогин Б. С. Моря СССР. М.: Изд-во Моск. ун-та. 1982. 192 с.

#### INTEGRATED RISK ASSESSMENT SYSTEM FOR ARCTIC SEAS PASSAGE

<sup>1</sup>Aleshin Alexander , post-graduate student

<sup>2</sup>Kubrin Sergey, Dr. Sci. Tech., Professor

<sup>1</sup>Institution of Science Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Russian Academy of Sciences.

Moscow State Academy of Water Transport – branch of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping", Moscow, Russia, e-mail: alexal280593@gmail.com

<sup>2</sup>Federal State Institution of Science Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, e-mail: s\_kubrin@mail.ru

*The article describes the method of risk assessment by means of fuzzy analyze. The number of factors, such as improper passage planning, heavy ice conditions, human factor, etc., influencing the safety of navigation in the Arctic was listed. The set of main risks for navigation in the Arctic waters was formed. The proposed method was tested on the example for the crude oil tanker navigating in the Arctic seas in February – the most realizable risks were found and the risk assessment was carried out.*

**К ВОПРОСУ О БЕЗОПАСНОСТИ БАЛКЕРА ПРИ РАЗЖИЖЕНИИ ГРУЗА**

Гуральник Борис Самуилович, канд. техн. наук, доцент  
 Сирота Александр Константинович, доцент, кап. дал. плавания  
 Якута Ирина Владимировна, канд. техн. наук, доцент

Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО  
 «КГТУ», Калининград, Россия, e-mail: kaf-bm@bga.gazinter.net

*Показано, что при перевозке некоторых навалочных грузов случаются аварии, связанные с опрокидыванием судов. Причинами аварий является фильтрация влаги внутри штабеля груза, выделение влаги в верхних слоях и на поверхности штабеля и, в итоге, его смещение. Показано, что часто у судна вначале развивается начальный крен 4-15<sup>0</sup>, после чего крен очень быстро возрастает и ведёт к опрокидыванию судна*

Среди перевозимых морем навалочных грузов присутствуют грузы, способные разжижаться в процессе транспортировки. Процесс разжижения грузов сегодня исследован недостаточно и поэтому деление грузов на разжижающиеся и не разжижающиеся, сегодня сделано на основе предыдущего опыта их перевозок и не имеет теоретического обоснования. Поэтому до настоящего времени при перевозке навалочных грузов случаются аварийные происшествия, аварии, которые заканчиваются катастрофами.

В таблице 1 приведены некоторые данные о судах, потерпевших аварии вследствие разжижения грузов, учитывающие некоторые особенности развития инцидентов.

Таблица 1

**Данные об аварийных судах**

№	Судно / Источник	Вид груза	Начальный аварийный крен	Опрокидыв. / Убежище О/У
1	Витимлес [1]	Цинковый концентр.	5 <sup>0</sup>	У
2	Умань [1]	Железорудн. концентр	7 <sup>0</sup> -10 <sup>0</sup>	О
3	Тикси [1]	Цинковый концентр.	8 <sup>0</sup> -15 <sup>0</sup>	Порт погрузки
4	Н [1]	Цинковый концентр.	4 <sup>0</sup> ,8 <sup>0</sup>	У
5	Посьет [1]	Железорудн. концентр	8 <sup>0</sup>	У
6	Ургенч [1]	Железорудн. концентр	12 <sup>0</sup>	У
7	m/v 6007 [1]	Пирит	12 <sup>0</sup> ,15 <sup>0</sup>	У

8	Кремзертор [1]	Железорудн. концентр	20 <sup>0</sup> , 25 <sup>0</sup>	О
9	Магадан [1]	Железорудн. концентр	5 <sup>0</sup>	У
10	Hui Long [2]	Флюорит	15 <sup>0</sup>	О
11	Bulk Jupiter [3]	Бокситы	45 <sup>0</sup>	О
12	Orchid Island [3]	Бокситы		У
13	Medi Okinawa [3]	Бокситы		У
14	Harita Bauxite [5]	Никелевая руда		О
15	Juan Fu Star [4]	Никелевая руда		О
16	Nasko Diamond [4]	Никелевая руда		О
17	Hong Wei [4]	Никелевая руда		О
18	Vinalines Queen [5]	Никелевая руда	18 <sup>0</sup>	О
19	Black Rose [4]	Железн. руда		О
20	Balker [6]	Никелевая руда	20 <sup>0</sup>	О
21	Balker [7]	Никелевая руда		У
22	Stellar Daisi [8]	Железн. руда		О
23	Asian Forest [4]	Железн. руда		О
24	Changda 216 [4]	Магнезит		О
25	Sun Spirit [4]	Железн. руда		О
26	Changguing 16[4 ]	Железн. руда		О

При рассмотрении всех данных аварийных случаев [1] - [8] можно отметить следующие общие признаки.

После завершения погрузки груз в трюмах имел обычный вид и при оформлении отхода остойчивость судна не вызывала сомнений, судно, как правило, сидело на ровный киль или имело незначительный крен менее 1,0<sup>0</sup>.

Во всех данных авариях часть судов опрокинулись, а другие получили аварийный крен и спаслись, зайдя в порт-убежище. По результатам расследований причиной всех этих инцидентов и аварий является разжижение перевозимого груза.

В описаниях и в материалах расследований аварий отмечается, что во многих из приведённых в таблице 1 случаях на суда загружался груз, влажность, которого определялась не корректно или не контролировалась и превышала допустимый транспортабельный предел влажности.

Все перечисленные в таблице 1 суда перед наступлением разжижения совершали переход от нескольких часов до нескольких суток, а после попадания в районы со значительным или штормовым волнением на них начиналось разжижение груза. В это время все аварийные суда испытывали качку с амплитудами до 10 – 35<sup>0</sup>, с периодом 7 - 15 с.

Причиной разжижения является фильтрация влаги в штабеле груза вследствие судовой вибрации и качки судна.

При полной штивке груз в трюмах разравнивается от борта до борта. В случае загрузки балкера без штивки штабель груза имеет форму близкую к усечённому конусу или двух трёх угольных призм, простирающихся от борта до борта. При частичной штивке разравнивается «блюдец» штабеля в просвете грузовых люков.

В таком случае, при загрузке трюма без штивки или при штивке блюдца, влага может скапливаться в нижней части скосов штабеля у бортов и в блюдце. При полной штивке груза влага выступает на поверхности штабеля.

Глубина увлажнённого груза в текучем состоянии, как зафиксировано на аварийных судах [1], составляло от 50 – 70 сантиметров, до одной трети или 40% штабеля груза, в зависимости от его начального влагосодержания. Эти данные можно отнести и к современным балкерам дедвейтной группы «Панамакс» и более. Например, после гибели м/в «Bulk Jupiter», капитан м/в «Orchid Island», которое загрузилось и вышло в рейс вслед за ним [3], получил указание проверить состояние груза. После инспекции грузовой помощник сообщил, что: «груз в трюме № 4 разжиженный, верхняя часть перемещается с борта на борт. Имеются также скопления воды в каждом углу на поверхности груза».

Заход в порт-убежище не всегда позволяет судну спастись. Балкер [4]201560, который укрылся в недостаточно надёжном укрытии, дрейфовал вместе с якорем и в конечном итоге опрокинулся из-за разжижения никелевой руды.

На рис. 1 показаны графики возрастания крена нескольких аварийных судов по мере развития аварий и аварийных происшествий. Как видно из рис. 1 на некоторых судах вначале медленно развивался начальный крен до  $4 - 10^{\circ}$ , а на больших балкерах до  $20^{\circ}$ , а затем, если судну не удалось укрыться в убежище, крен быстро возрастал до углов  $40 - 50^{\circ}$ , и в конечном итоге приводил к опрокидыванию судна. На других судах, как видно из таблицы 1, неожиданно появлялся значительный крен или судно опрокидывалось за считанные минуты.

Из приведённых на рис. 1 судно «Т» грузилось на рейде в п. Тетюхе в условиях зыби 4-5 баллов. Из-за улучшения погоды разжижение груза на т/х «Т» не привело к тяжёлым последствиям.

Получив крен из-за разжижения груза судно «N» тоже смогло укрыться в порту убежище.

Суда «У» и «Б» на рис. 1 погибли. Первое, из опрокинувшихся, т/х «У» имело водоизмещением 11400 тонн. Дедвейт балкера «Б» составлял около 53000 тонн.

Балкер «ВJ» с грузом 46400 тонн бокситов находился в рейсе до опрокидывания около 56 часов, часть времени в условиях ветра и волнения 4-6 баллов. По свидетельству единственного спасшегося члена экипажа в 06:00 2 января 2015 г. он отметил более сильную качку по сравнению с предыдущим днём, в 06:40 прозвучал сигнал тревоги, через некоторое время судно получило крен  $45^{\circ}$ , а в 06:54 японская береговая охрана получила сигнал об аварии. Предположительно судно затонуло в период между 06:54 и 07:00.

М/в «Hui Long» при переходе по Индийскому Океану в условиях ветра 5 баллов неожиданно получил крен  $15^{\circ}$  на левый борт, который быстро вырос до  $40^{\circ}$  и продолжал расти. Через 27 минут после появления начального крена экипаж был вынужден оставить судно.

Как следует из анализа аварийной статистики, если судно неожиданно не опрокидывается в первые минуты после разжижения груза, то авария развивается по

времени, как показано на рис. 1. Время появления начального крена составляло на аварийных судах от тридцати минут до нескольких часов. После получения начального крена опрокидывание судна, как правило, происходит за ~10 – 30 минут.

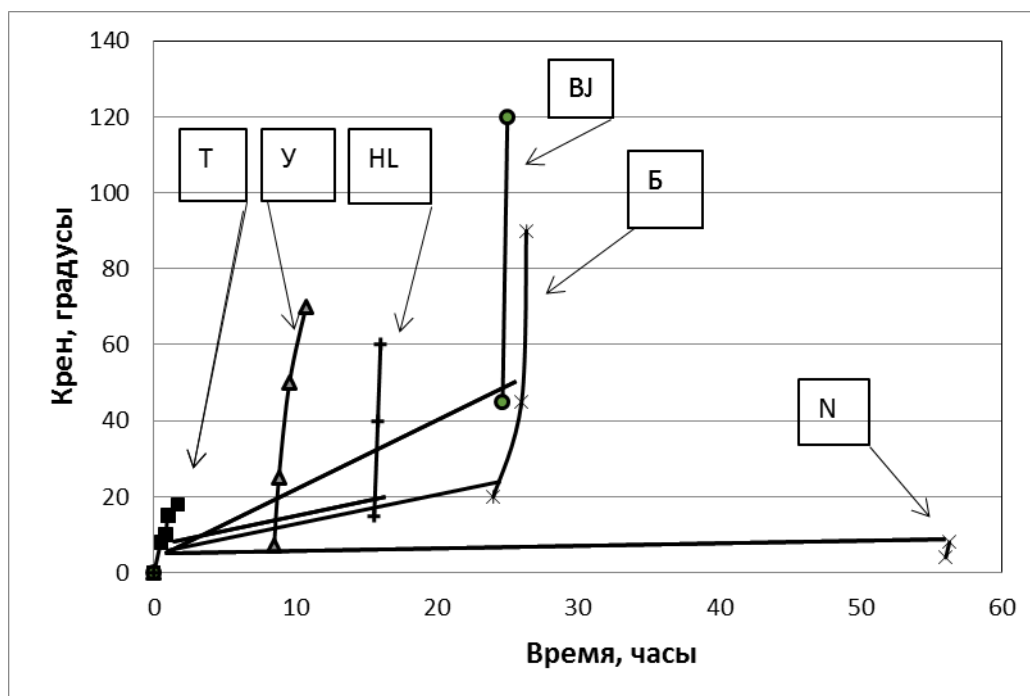


Рис. 1. Рост крена судов при развитии аварии

Для выработки рекомендаций по исключению и предупреждению таких аварий необходимо понять физические причины, вызывающие неожиданное опрокидывание судна, или появление начального крена и оценить время его развития.

Из имеющихся материалов по расследованию данных аварий можно считать, что в случае разжижения штабель груза имеет трёхфазную структуру. Верхняя часть представляет собой выделившуюся на поверхности фильтрационную воду с взвесью из вымытых из штабеля пылевидных и мелких частиц, другая состоит из глиноподобной вязкой массы, а третья включает остальные твёрдые частицы груза.

Выделившаяся на поверхности штабеля вода с взвесью при качке перемещается вместе с судном, глиноподобная масса медленно перетекает в сторону опущенного борта, а в некоторых случаях обрушивается в сторону наклонённого борта. Большое количество воды, выступившее на поверхности груза одновременно в нескольких трюмах, может значительно ухудшить остойчивость и даже привести к появлению у судна отрицательной начальной остойчивости. Данные причины в итоге приводят к опрокидыванию судов с грузом в состоянии разжижения.

В этих условиях нас должно интересовать время, которым располагает экипаж для борьбы за живучесть, возможности экипажа по спасению аварийного судна и предельное состояние, после, наступления которого необходимо оставить судно.

Очевидно, что в случае появления начального крена судовая администрация может принять или перекачать балласт на противоположный борт, выполнить, во время

авральных работ, обратную штивку груза в сторону поднятого борта. Как показывают материалы расследования аварий, из-за наличия крена, экипажу часто не удавалось запустить насосы для операций с балластом.

Оценим возможности экипажа по устранению аварийного крена.

Расчёты с использованием диаграммы статической устойчивости показывают, что, для получения первоначального крена  $15^{\circ}$  на м/в «Hui Long» должно было сместиться около 330 тонн груза. Для последующего возрастания крена до  $40^{\circ}$  за 27 минут должно было сместиться примерно 1220 тонн груза или 45 тонн/минуту.

Для создания крена  $20^{\circ}$  на опрокинувшемся балкере м/в «Б», дедевитом около 53000 тонн должно было произойти смещение примерно 15700 тонн груза.

Большие расчётные значения сместившихся масс свидетельствуют о том, что в данных авариях мы вероятнее всего имеем дело с совместным влиянием смещения груза и больших свободных поверхностей образовавшихся в трюмах судов. Разделить их влияние сегодня возможно только гипотетически.

По оценкам специалистов один человек за час может перебросить на расстояние около 4 метра примерно 2 тонны груза.

В таком случае перемещение 100 тонн сместившегося груза поперёк судна м/в «Hui Long» (~ 15,2 м) займёт 10 часов непрерывной работы всех 23 членов экипажа, а на перемещение 300 тонн потребуется 30 часов авральной работы. Учитывая продолжительное время, требуемое на аварийную штивку груза, возможность реализации и эффективность этих работ вызывает большие сомнения.

На балкере дедевитной группы «Панамакс» эти работы займут ещё более продолжительное время.

Данные примеры показывают, что ограниченные возможности замедлить или остановить развитие аварии при разжижении груза существуют только в период развития начального крена, при условии, что он достаточно продолжительный. Это подчёркивают важность корректного определения фактической влажности и транспортабельного предела влажности предъявляемого для перевозки груза береговыми службами и контроля загружаемого груза судовой администрацией с использованием «Can Test».

Процессы разжижения навалочных грузов требуют теоретического и экспериментального исследования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксютин Л.Р., Благовещенский С.Н. Аварии судов от потери устойчивости. Л.: Судостроение, 1975. - 197 с.
2. Report of Investigation into the Sinking of m/v “Hui Long” on May 2005. The Hong Kong Special Administrative Region Marine Department. 2006. - 21 p.
3. Report of the marine safety investigation into the loss of a bulk carrier in the South China Sea on January 2<sup>nd</sup> 2015. Bahamas Marine Authority. 2015. - 64 p.



4. Иванов Ю.М., Буров О.Н., Глебова М.А. Безопасность морской перевозки разжижающихся и самовозгорающихся навалочных грузов. М.: Транспорт Российской Федерации. № 6(43), 2012. - С.12-13.
5. John Poulsen. The Deadliest Cargo. The International Journal of The Nautical Institute "SEAWAYS". December 2013. - P. 13-15.
6. Unsafe cargo + unsafe anchorage = lost ship. MARS Report No, 277, November 2015. The International Journal of The Nautical Institute "SEAWAYS". January 2016. - P. 17.
7. Paul Walton, Liquefaction: a Master's perspective. The International Journal of The Nautical Institute "SEAWAYS". February 2017. - P. 12-14.
8. Maritime Bulletin.net. Daily accident reports from 03 April 2017 .

### **ANALYSIS OF SOME FACTORS CAUSING BULK CARGO LIQUEFACTION**

Guralnik Boris Samuilovich, Ph.D., Associate Professor  
Sirota Alexander Konstantinovich, Associate Professor, Master Mariner  
Yakuta Irina Vladimirovna, Ph.D., Associate Professor

Baltic fishing fleet state academy FSBEI HE "KSTU", Kaliningrad, Russia,  
e-mail: kaf-bm@bga.gazinter.net

The paper presents the fact that when transporting some bulk cargo, there are accidents related to capsizing of a ship. The causes of accidents are the filtration of moisture inside the stack of cargo, the release of moisture in the upper layers and on the surface of the stack and, as a result, its displacement. It is shown that often the ship initially develops an initial list of 4-15 °, after which the bank increases very quickly and leads to capsizing of a ship.

УДК 656.61.052

### **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОЛЕБАНИЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА МАГНИТНОГО КОМПАСА ПРИ МАЛОМ ОТКЛОНЕНИИ ЕГО ОСИ ОТ ПЛОСКОСТИ КОМПАСНОГО МЕРИДИАНА**

Ермаков Сергей Владимирович, ст. преподаватель

Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ», Калининград, Россия, e-mail: esv.klgd@mail.ru

*Представлено дифференциальное уравнение, связывающее характеристики магнитного поля, магнитной системы чувствительного элемента и компасной жидкости, угол отклонения картушки, ее угловые скорость и ускорение. Получено решение этого уравнения, представляющее собой математическую модель колебаний чувствительного элемента. На основе математической модели обоснован альтернативный метод определения угла застоя картушки магнитного компаса*

## Введение

В настоящее время большинство действий судоводителя во время обучения отрабатываются на тренажерах, в основе которых лежит специализированное программное обеспечение, построенное на математических моделях процессов, явлений и технических средств. Однако содержание математических моделей является закрытой коммерческой информацией, доступ к которой имеет ограниченный круг лиц. В частности, можно предположить, что метаматематические модели, используемые в навигационных тренажерах, имеют предельно упрощенный характер, не отражающий всех процессов, происходящих в компасах.

Вместе с тем, математические модели технических средств судовождения (ТСС), принцип действия которых реализуется через связанные и происходящие по определенным законам движения составляющих элементов (т.е. имеющих кинематическую схему), позволяет не только получить больше знаний о принципах действия и построения таких ТСС, но к тому же имеют практическое предназначение. Совокупность аналитических зависимостей, составляющих математическую модель, позволяет по одним параметрам, значение которых известно (или определяется по простым методикам) определять другие параметры – контролируемые или необходимые для иных целей.

Сопоставление фактического процесса работы и смоделированного позволит выявить отклонения в работе технического средства более быстро и надежно, чем это делается без математических моделей.

Все сказанное имеет отношение к такому классическому курсоуказателю, как магнитный компас. Так, кинематические характеристики вращения картушки магнитного компаса через математическую модель могут позволить определить характеристики магнитного поля, чувствительного элемента, вычислить угол застоя. Однако в научной литературе в настоящее время отсутствует какое-либо математическое описание вращения картушки магнитного компаса при ее отклонении от плоскости компасного меридиана. Исключение составляет численная модель, разработанная на кафедре судовождения и представленная в 2017 г. [1]. Однако дифференциальное уравнение, являющееся основой модели, не имеет решения в явном виде, но дает возможность получить это решение для малых отклонений.

Таким образом, целью работы, результаты которой представлены в настоящей статье, являлось составление и решение дифференциального уравнения колебаний картушки магнитного компаса при её малых отклонениях от плоскости компасного меридиана.

Для достижения этой цели были решены следующие задачи:

- идентифицированы и проанализированы силы и моменты, действующие на магнитный чувствительный элемент ( картушку);
- составлено уравнение динамики вращательного движения картушки в общем виде;
- составлено дифференциальное уравнение колебаний картушки магнитного компаса и проанализированы особенности его решения;
- получены частные решения дифференциального уравнения колебаний картушки магнитного компаса при её малых отклонениях от плоскости компасного меридиана (математическая модель).

## Силы и моменты, действующие на чувствительный элемент

При любом отклонении  $\alpha$  магнитного чувствительного элемента от плоскости истинного меридиана на него действуют следующие три момента:

- вращающий момент  $\vec{L}$ , зависящий от характеристик магнитного поля в месте расположения катушки и её магнитного момента;
- момент  $\vec{Q}$  сил трения в опоре чувствительного элемента, направленный против угловой скорости  $\vec{\omega}$  вращения;
- момент  $\vec{R}$  сопротивления жидкости, направленный также против угловой скорости  $\vec{\omega}$  вращения.

Таким образом, исходя из закона динамики вращательного движения, можем записать:

$$J\vec{\varepsilon} = \vec{L} + \vec{Q} + \vec{R}, \quad (1)$$

где  $J$  – момент инерции чувствительного элемента (катушки),  $\vec{\varepsilon}$  – угловое ускорение катушки, или в скалярной форме

$$J\varepsilon = -L + Q - R. \quad (2)$$

Вращающий момент  $\vec{L}$  определяет принцип работы магнитного компаса. Под его действием ось чувствительного момента (ось магнитной стрелки) стремится занять положение в плоскости магнитного меридиана, то есть указывает на магнитный полюс Земли. Модуль вращающего момента определяется формулой [2]:

$$L = MB \sin \alpha, \quad (3)$$

где  $M$  – магнитный момент чувствительного элемента,  $B$  – горизонтальная составляющая индукции магнитного поля в месте расположения катушки.

Модуль момента сил сопротивления вращению со стороны компасной жидкости пропорционален угловой скорости вращения  $\omega$  [3]:

$$R = K_c \omega, \quad (4)$$

где  $K$  – коэффициент сопротивления (демпфирования).

Подставим выражения (3), (4) в уравнение (2) и запишем последнее в виде (5):

$$\varepsilon + \frac{K_c}{J} \cdot \omega + \frac{MB}{J} \cdot \sin \alpha = \frac{Q}{J}. \quad (5)$$

### Дифференциальное уравнение колебаний чувствительного элемента и его общее решение

Запишем выражение (5) в дифференциальной форме (6):

$$\frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \frac{K_c}{J} \cdot \frac{d\alpha}{dt} + \frac{MB}{J} \cdot \sin \alpha = \frac{Q}{J}. \quad (6)$$

Однако уравнение (6) неразрешимо относительно  $\alpha$ , т.е. функция  $\alpha(t)$  не может быть выражена в конечном виде через элементарные функции. Вместе с тем, при малых отклонениях от плоскости компасного меридиана (как оно и имеет место быть на практике) можно принять, что  $\sin \alpha \approx \alpha$ , а вместо (6) записать:

$$\frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \frac{K_c}{J} \cdot \frac{d\alpha}{dt} + \frac{MB}{J} \cdot \alpha = \frac{Q}{J}. \quad (7)$$

При трении в опоре картушки пока последняя находится в движении, величина момент сил трения практически постоянна, а ее направление противоположно скорости. Упрощенная идеализированная характеристика такого трения (называемая z-характеристикой) показана на рис. 1 [4]. В соответствии с этой характеристикой при вращении картушки момент сил трения постоянен по модулю (не зависит от скорости), но ее направление изменяется всякий раз при изменении направления угловой скорости. Когда система покоится, момент сил статического трения может принимать любые значения от  $-Q_{max}$  до  $Q_{max}$ . Действительная величина момента силы трения покоя зависит от величины вращающего момента, который должен быть уравновешен трением для того, чтобы сохранялось трение покоя. Величина момента силы трения скольжения принимается здесь равной максимально возможной величине момента силы трения покоя  $Q_{max}$  [4].

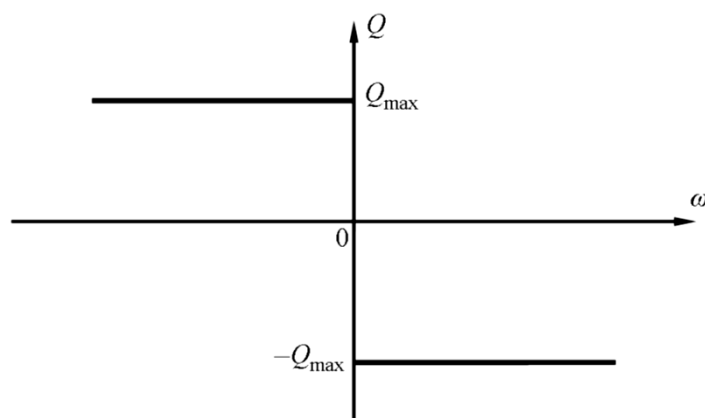


Рис. 1. Идеализированная зависимость момента силы трения в опоре картушки от скорости ее вращения (z-характеристика)

В реальности трение в опоре картушки характеризуется более сложной зависимостью силы трения от скорости. Максимальная величина момента обычно несколько больше момента силы трения скольжения. Когда угловая скорость картушки начинает возрастать от нулевого значения, момент силы трения скольжения сначала несколько уменьшается, достигает минимума при некоторой угловой скорости, а затем постепенно увеличивается [4]. В идеализированной z-характеристике сухого трения эти особенности игнорируются, т.к. отличия момента сил трения скольжения и максимального момента сил трения покоя пренебрежимо малы.

Из-за того, что момент сил трения покоя может принимать любые значения вплоть до  $Q_{max}$ , по обе стороны от плоскости компасного меридиана имеется интервал углов отклонения, в пределах которой трение покоя в состоянии уравновесить вращающий момент. Этот интервал углов называется, как известно, зоной застоя, а ее границы

определяются углом застоя. В любой точке зоны застоя ось картушки может находиться в покое в состоянии безразличного равновесия. Если угловая скорость картушки обращается в ноль в пределах зоны застоя, то картушка останавливается и в дальнейшем покоится в этом состоянии.

Зона застоя простирается на одинаковые угловые расстояния от плоскости компасного меридиана. Чем больше момент сил трения покоя, тем шире зона застоя.

В соответствии с принятой идеализированной z-характеристикой трения в опоре картушки для момента сил трения можно записать:

$$Q = \begin{cases} -Q_{max}, & \text{для } \omega > 0, \\ Q_{max}, & \text{для } \omega < 0. \end{cases}$$

При этом становится очевидно, что дифференциальное уравнение (7) является нелинейным, а по сути необходимо рассматривать вместо одного два следующих дифференциальных уравнения:

$$\frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \frac{K_c}{J} \cdot \frac{d\alpha}{dt} + \frac{MB}{J} \cdot \alpha = -\frac{Q_{max}}{J}, \text{ при } \omega > 0, \quad (8)$$

$$\frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \frac{K_c}{J} \cdot \frac{d\alpha}{dt} + \frac{MB}{J} \cdot \alpha = +\frac{Q_{max}}{J}, \text{ при } \omega < 0. \quad (9)$$

Однако характеристические уравнения соответствующих однородных дифференциальных уравнений здесь одинаковы и имеют вид:

$$x^2 + \frac{K_c}{J} \cdot x + \frac{MB}{J} = 0. \quad (10)$$

Дискриминант этого уравнения равен:

$$D = \sqrt{\frac{K_c^2}{J^2} - \frac{4MB}{J}}.$$

Очевидно, что вид решения здесь зависит от знака подкоренного выражения дискриминанта. Вместе с тем положительное подкоренное выражение встречается для магнитной индукции 1 мкТл и меньше (т.е. в приполюсных районах). Однако в этих районах магнитный компас не эксплуатируется.

Следовательно, корни характеристического уравнения (10) являются комплексно-сопряженными и имеют следующий вид:

$$x_{1,2} = -\frac{K_c}{2J} \pm i \sqrt{\frac{MB}{J} - \frac{K_c^2}{4J^2}}.$$

Откуда следует общее решение однородного дифференциального уравнения:

$$\alpha = e^{-K_c t / 2J} \left[ C_1 \cos \sqrt{\frac{MB}{J} - \frac{K_c^2}{4J^2}} \cdot t + C_2 \sin \sqrt{\frac{MB}{J} - \frac{K_c^2}{4J^2}} \cdot t \right], \quad (11)$$

где  $C_1, C_2$  – постоянные интегрирования.

Далее нетрудно найти общее решение неоднородных уравнений (8) и (9):

$$\alpha = e^{-K_c t/2J} \left[ C_1 \cos \sqrt{\frac{MB}{J} - \frac{K_c^2}{4J^2}} \cdot t + C_2 \sin \sqrt{\frac{MB}{J} - \frac{K_c^2}{4J^2}} \cdot t \right] \pm \frac{Q_{max}}{MB}, \quad (12)$$

Однако второе слагаемое в правой части (12) представляет собой выражение для угла застоя  $\delta$ , определяющего границу зоны застоя. Следовательно, вместо (12) можно записать:

$$\alpha = e^{-K_c t/2J} \left[ C_1 \cos \sqrt{\frac{MB}{J} - \frac{K_c^2}{4J^2}} \cdot t + C_2 \sin \sqrt{\frac{MB}{J} - \frac{K_c^2}{4J^2}} \cdot t \right] \pm \delta. \quad (13)$$

Из выражения (13) очевидно, что период затухающих колебаний магнитного чувствительного элемента будет определяться формулой (14):

$$T = 4\pi J \sqrt{\frac{1}{4MBJ - K_c^2}}. \quad (14)$$

Тогда вместо (13) запишем:

$$\alpha = e^{-K_c t/2J} \left[ C_1 \cos \frac{2\pi}{T} \cdot t + C_2 \sin \frac{2\pi}{T} \cdot t \right] \pm \delta. \quad (15)$$

### Частные решения дифференциального уравнения колебаний чувствительного элемента

Частные решения уравнений (8) и (9), соответствующие заданным начальным условиям, можно найти методом поэтапного интегрирования каждого из линейных уравнений на интервале времени, соответствующем полупериоду колебаний, пока направление вращения катушки остается неизменным. Такие решения будут совпадать с (15), отличаясь каждый раз постоянными интегрирования. Далее эти решения соединяются («сшиваются») в момент перехода от одного уравнения к другому таким образом, что угол отклонения и угловая скорость в конце очередного полуцикла исполняют роль начальных условий для следующего полуцикла колебаний чувствительного элемента. Такая последовательность решений продолжается до тех пор, пока угол отклонения в конце очередного полуцикла не оказывается в пределах угла застоя.

Для нахождения частного решения уравнения (8) для первого полупериода колебаний ( $0 < t < 0,5T$ ), примем в (15) знак «плюс» перед углом застоя  $\delta$  и следующие начальные условия:

$$t_1 = 0, \alpha_1 = \alpha_0 > 0, \alpha'_1 = 0. \quad (16)$$

Тогда:

$$\alpha_1 = e^{-K_c \cdot 0/2J} \left[ C_1 \cos \frac{2\pi}{T} \cdot 0 + C_2 \sin \frac{2\pi}{T} \cdot 0 \right] + \delta = C_{11} + \delta = \alpha_0,$$

$$C_{11} = \alpha_0 - \delta, \quad (17)$$

$$\begin{aligned}
\alpha'_1 &= e^{-K_c t/2J} \left[ -\frac{K_c}{2J} \cdot \left( C_{11} \cos \frac{2\pi}{T} t + C_{21} \sin \frac{2\pi}{T} t \right) + \right. \\
&\quad \left. + \frac{2\pi}{T} \cdot \left( -C_{11} \sin \frac{2\pi}{T} t + C_{21} \cos \frac{2\pi}{T} t \right) \right] = \\
&= e^{-K_c \cdot 0/2J} \left[ -\frac{K_c}{2J} \cdot \left( C_{11} \cos \frac{2\pi}{T} \cdot 0 + C_{21} \sin \frac{2\pi}{T} \cdot 0 \right) + \right. \\
&\quad \left. + \frac{2\pi}{T} \cdot \left( -C_{11} \sin \frac{2\pi}{T} \cdot 0 + C_{21} \cos \frac{2\pi}{T} \cdot 0 \right) \right] = -\frac{K_c}{2J} \cdot C_{11} + \frac{2\pi}{T} \cdot C_{21} = 0, \\
C_{21} &= \frac{K_c}{2J} \cdot \frac{T}{2\pi} \cdot C_{11} = \frac{K_c}{4\pi J} (\alpha_0 - \delta). \tag{18}
\end{aligned}$$

Постоянные интегрирования (17) и (18) определяют частное решение дифференциального уравнения (8) для первого полупериода колебаний.

Далее определим угол отклонения  $\alpha_{к1}$  в конце первого (начале второго) полупериода колебаний, полагая  $t = 0,5T$

$$\begin{aligned}
\alpha_{к1} &= e^{-K_c \cdot 0,5T/2J} \left[ C_{11} \cos \frac{2\pi}{T} \cdot 0,5T + C_{21} \sin \frac{2\pi}{T} \cdot 0,5T \right] + \delta = \\
&= e^{-K_c T/4J} \cdot C_{11} + \delta = e^{-K_c T/4J} \cdot (\alpha_0 - \delta) + \delta. \tag{19}
\end{aligned}$$

Значение угла  $\alpha$ , определяемое выражением (19), входит в число начальных условий для получения частного решения уравнения (9) на втором полупериоде колебаний (т.е.  $\alpha_2 = \alpha_{к1}$ ). Кроме того, начальные условия включают в себя:  $t_2 = 0,5T$  и  $\alpha'_2 = 0$ . Далее, процедура определения постоянных интегрирования повторяется для второго полупериода колебаний:

$$\begin{aligned}
\alpha_2 &= e^{-K_c \cdot 0,5T/2J} \left[ C_{12} \cos \frac{2\pi}{T} \cdot 0,5T + C_{22} \sin \frac{2\pi}{T} \cdot 0,5T \right] - \delta = -e^{-K_c T/4J} \cdot C_{12} - \delta; \\
C_{12} &= e^{-K_c T/4J} \cdot (\alpha_2 + \delta);
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\alpha'_2 &= e^{-K_c t/2J} \left[ -\frac{K_c}{2J} \cdot \left( C_{12} \cos \frac{2\pi}{T} t + C_{22} \sin \frac{2\pi}{T} t \right) + \right. \\
&\quad \left. + \frac{2\pi}{T} \cdot \left( -C_{12} \sin \frac{2\pi}{T} t + C_{22} \cos \frac{2\pi}{T} t \right) \right] = \\
&= e^{-K_c \cdot 0,5T/2J} \left[ -\frac{K_c}{2J} \cdot \left( C_{12} \cos \frac{2\pi}{T} \cdot 0,5T + C_{22} \sin \frac{2\pi}{T} \cdot 0,5T \right) + \right. \\
&\quad \left. + \frac{2\pi}{T} \cdot \left( -C_{12} \sin \frac{2\pi}{T} \cdot 0,5T + C_{22} \cos \frac{2\pi}{T} \cdot 0,5T \right) \right] =
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= e^{-K_c \cdot 0,5T/2J} \left[ -\frac{K_c}{2J} \cdot \left( C_{12} \cos \frac{2\pi}{T} \cdot 0,5T + C_{22} \sin \frac{2\pi}{T} \cdot 0,5T \right) + \right. \\
&\quad \left. + \frac{2\pi}{T} \cdot \left( -C_{12} \sin \frac{2\pi}{T} \cdot 0,5T + C_{22} \cos \frac{2\pi}{T} \cdot 0,5T \right) \right] = \\
&= e^{-K_c \cdot T/4J} \left[ \frac{K_c}{4J} \cdot C_{12} - \frac{2\pi}{T} \cdot C_{22} \right] = 0; \\
&C_{21} = \frac{K_c}{2J} \cdot \frac{T}{2\pi} \cdot C_{11} = \frac{K_c}{4\pi J} (\alpha_0 - \delta). \\
&C_{22} = \frac{K_c}{4J} \cdot \frac{T}{2\pi} \cdot C_{12} = e^{-K_c \cdot T/4J} \cdot (\alpha_2 + \delta) \cdot \frac{K_c T}{8\pi J}.
\end{aligned}$$

Таким образом, процедура интегрирования для любого  $k$ -го полупериода определяется следующим образом.

Начальные условия:

$$t_k = (k-1)T/2; \alpha_k = (-1)^{k-1} \cdot e^{-K_c \cdot (k-1) \cdot T/4J} \cdot C_{1(k-1)} + (-1)^k \cdot \delta; \alpha'_k = 0. \quad (20)$$

Постоянные интегрирования:

$$\begin{aligned}
\alpha_k &= e^{-K_c \cdot (k-1) \cdot T/4J} \left[ C_{1k} \cos \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{(k-1)T}{2} + C_{2k} \sin \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{(k-1)T}{2} \right] - (-1)^k \cdot \delta = \\
&= -e^{-K_c \cdot (k-1) \cdot T/4J} \cdot (-1)^{k-1} C_{1k} - (-1)^k \cdot \delta; \\
C_{1k} &= (-1)^{k-1} e^{-K_c \cdot (k-1) \cdot T/4J} \cdot (\alpha_k + (-1)^k \cdot \delta); \quad (21)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\alpha'_k &= e^{-K_c \cdot (k-1) \cdot T/4J} \cdot \left[ -\frac{K_c}{2J} \cdot \left( C_{1k} \cos \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{(k-1)T}{2} + C_{2k} \sin \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{(k-1)T}{2} \right) + \right. \\
&\quad \left. + \frac{2\pi}{T} \cdot \left( -C_{1k} \sin \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{(k-1)T}{2} + C_{2k} \cos \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{(k-1)T}{2} \right) \right] = \\
&= e^{-K_c \cdot (k-1) \cdot T/4J} \cdot (-1)^k \cdot \left[ \frac{K_c}{4J} \cdot C_{1k} - \frac{2\pi}{T} \cdot C_{2k} \right] = 0; \\
C_{2k} &= (-1)^{k-1} \frac{K_c T}{4\pi J} \cdot e^{-K_c \cdot (k-1) \cdot T/4J} \cdot (\alpha_k + (-1)^k \cdot \delta). \quad (22)
\end{aligned}$$

Частное решение:

$$\alpha = e^{-K_c t/2J} \left[ C_{1k} \cos \frac{2\pi}{T} \cdot t + C_{2k} \sin \frac{2\pi}{T} \cdot t \right] - (-1)^k \cdot \delta. \quad (23)$$

Все предыдущие выкладки были сделаны при условии, что начальный угол отклонения больше нуля, так же всегда положителен и угол застоя. Однако картушка компаса может быть отклонена от плоскости компасного меридиана в обе стороны, т.е.



для начального угла отклонения знак «минус» не является нонсенсом. В таком случае для сохранения достоверности приведенных выражений при отрицательном начальном угле отклонения необходимо угол застоя также принимать отрицательным ( $\delta < 0$ ). Другой вариант решения проблемы – использовать функцию знака  $\text{sgn}$  от угла  $\alpha_0$ , смысл которой можно пояснить следующей системой:

$$\text{sgn } \alpha_0 = \begin{cases} -1, & \text{при } \alpha_0 < 0; \\ 0, & \text{при } \alpha_0 = 0; \\ +1, & \text{при } \alpha_0 > 0. \end{cases}$$

Тогда выражения (20)-(23) можно заменить следующими:

$$t_k = (k - 1)T/2;$$

$$\alpha_k = (-1)^{k-1} \cdot e^{-K_c \cdot (k-1) \cdot T/4J} \cdot C_{1(k-1)} + (-1)^k \cdot \text{sgn } \alpha_0 \cdot \delta; \alpha'_k = 0. \quad (24)$$

$$C_{1k} = (-1)^{k-1} e^{-K_c \cdot (k-1)T/4J} \cdot (\alpha_k + (-1)^k \cdot \text{sgn } \alpha_0 \cdot \delta); \quad (25)$$

$$C_{2k} = (-1)^{k-1} \frac{K_c T}{4\pi J} \cdot e^{-K_c \cdot (k-1)T/4J} \cdot (\alpha_k + (-1)^k \cdot \text{sgn } \alpha_0 \cdot \delta). \quad (26)$$

$$\alpha = e^{-K_c t/2J} \left[ C_{1k} \cos \frac{2\pi}{T} \cdot t + C_{2k} \sin \frac{2\pi}{T} \cdot t \right] - (-1)^k \cdot \text{sgn } \alpha_0 \cdot \delta. \quad (27)$$

Формулы (24)-(27) представляют собой математическую модель колебаний чувствительного элемента магнитного при его малых отклонениях от плоскости компасного меридиана.

### Программная реализация математической модели

Обоснованная математическая модель колебаний чувствительного элемента магнитного компаса имеет вид, дающий возможность автоматизировать все расчеты самыми простыми способами. Точнее, задача автоматизации имеет отношение к поэтапному интегрированию дифференциальных уравнений (8)-(9), а именно к определению начальных условий и постоянных интегрирования для каждого этапа. В настоящей работе задача автоматизации решена при помощи табличного процессора MS Excel. Разработанная программа состоит из двух рабочих окон. Первое из них – «Главная страница» – включает в себя два сегмента. Верхний сегмент (рис. 2) предназначен для ввода исходных данных, имеющих отношение, как к магнитному полю, так и к магнитному чувствительному элементу. Нижний сегмент главной страницы (рис. 3) предназначен для отображения результатов частных решений дифференциальных уравнений (8)-(9).

Окно (лист) программы «Кривая колебаний» (рис. 4) в соответствии со своим названием строит кривую затухающих колебаний, рассчитанную по формуле (27) с учетом начальных условий и постоянных, которые представлены на главной странице. Таким образом, представленная программа дает возможность по начальному отклонению и характеристикам чувствительного элемента и магнитного поля рассчитать период и полупериод колебаний, начальные условия и постоянные

интегрирования для первых восьми полупериодов, а также построить кривую колебаний с обозначением на ней зоны застоя и временем остановки катушки.

1	<b>компыа при её малых отклонениях от плоскости компасного меридиана</b>	
2	<b>(математическая модель колебаний катушки)</b>	
3	<b>Исходные данные</b>	
4		
5	Горизонтальная составляющая индукции магнитного поля (мкТл)	15,0
6	Магнитный момент магнитной системы катушки (А*м)	2,0
7	Момент инерции катушки (кг*м <sup>2</sup> )	0,00068

Рис. 2. Верхний сегмент главной страницы программы

12	Период колебаний (с)	31,2	Полупериод колебаний (с)	15,6	
13	Номер полупериода	Начальные условия		Постоянные интегрирования	
14		Время (с)	Угол (градусы)	C1	C2
15	1	0,0	3,00	2,800	0,828
16	2	31,2	-0,91	1,787	0,528
17	3				
18	4				
19	5				
20	6				
21	7				
22	8				

Рис. 3. Нижний сегмент главной страницы программы

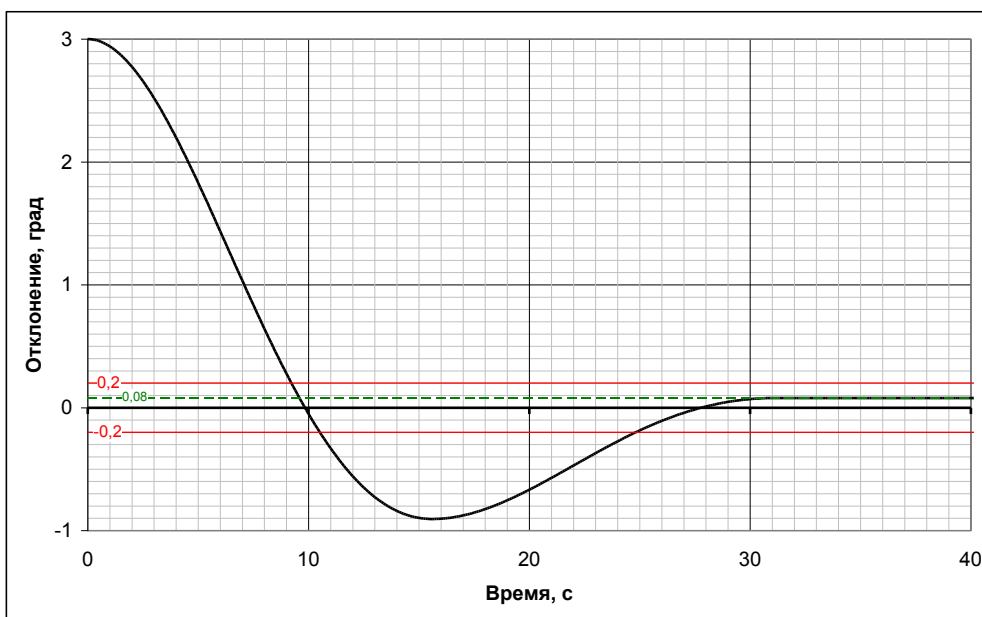


Рис. 4. Построенная программой кривая колебаний

## Определение угла и ширины зоны застоя

Обоснованная выше математическая модель вращения картушки магнитного компаса даёт возможность определить угол застоя и ширину зоны застоя альтернативным методом. В настоящее время рекомендуется следующий алгоритм определения угла застоя: любым магнитом картушка отклоняется на  $2 - 3^\circ$  поочередно сначала в одну сторону, а затем в другую [2]. После каждого отклонения и успокоения колебаний картушки снимаются отсчеты. Застой магнитного компаса равен половине разности этих отсчетов (критике этой методике посвящена работа [5]).

Выразим из формулы (19) угол застоя, предварительно введя туда функцию знака:

$$\delta = \frac{\alpha_2 + e^{-K_c T/4J} \cdot \alpha_1}{1 + e^{-K_c T/4J}} \cdot \text{sgn } \alpha_1. \quad (28)$$

В этой формуле могут быть использованы не только первые два амплитудных отклонения, но и любые два смежные. С учетом этого формулу (28) можно записать следующим образом:

$$\delta = \frac{\alpha_i + e^{-K_c T/4J} \cdot \alpha_{i-1}}{1 + e^{-K_c T/4J}} \cdot \text{sgn } \alpha_{i-1}. \quad (29)$$

Здесь не следует забывать, что углы отклонения кроме своей величины характеризуются знаками, а угол застоя всегда положителен.

Формула (29) положена в основу еще одной программы для ЭВМ, которая была написана на базе того же табличного процессора MS Excel. Программа имеет вкладки (окна, листы), наименование которых совпадает с представленными выше. Кроме того, интерфейс главной страницы (рис. 5) в части, касающейся ввода исходных данных, полностью совпадает с интерфейсом аналогичной страницы первой программы. Отличие заключается в том, что главная страница второй программы не содержит значение угла застоя (который как раз требуется найти), но включает в себя необходимый для расчёта второе амплитудное значение угла отклонения.

Всум последовательным амплитудным отклонениям, измеренным в процессе колебаний	
2	
3	
4	<b>Исходные данные</b>
5	Горизонтальная составляющая индукции магнитного поля (мкТл) <span style="float: right;">15,0</span>
6	Магнитный момент магнитной системы картушки (А*м) <span style="float: right;">2,0</span>
7	Момент инерции картушки (кг*м <sup>2</sup> ) <span style="float: right;">0,00068</span>
8	Коэффициент сопротивления (Н*м*с) <span style="float: right;">0,000081</span>
9	<b>Углы отклонения</b>
	Первый амплитудный (начальный) угол отклонения (градусы) <span style="float: right;">4,0</span>

Рис. 5 Главная страница программы для определения угла застоя картушки магнитного компаса

Для определения угла застоя и ширины зоны застоя необходимо:

- зафиксировать текущий компасный курс;
- используя магнит, отклонить картушку на угол, не более  $10^\circ$ , определить любые два последовательных амплитудных значения отклонения картушки от плоскости компасного меридиана (желательно первые два);
- занести эти значения в соответствующие ячейки на главной странице программы, при чем, если амплитудные значения располагаются по разные стороны компасного меридиана, то они должны отличаться знаком.

Угол застоя и ширина зоны застоя отображаются в последней строчке программы. При введении амплитудных значений, при которых вычисленное значение угла застоя меньше нуля (т.е. момент сил трения в опоре картушки не препятствует, а «способствует» вращению), в соответствующих ячейках программы появляется прочерк и под последней строчкой отображается запись: «Амплитудные углы отклонения указаны неверно. Такое сочетание физически невозможно».

### Заключение

Для постоянного поддержания работоспособности магнитного компаса необходимо регулярно проводить различные проверки (угла застоя, периода полукосебаний и пр.). В таком случае обоснованная в работе математическая модель вращения картушки, играя роль эталона, позволяет оценить контролируемые параметры.

При изучении принципов действия и построения магнитного компаса математическая модель является незаменимым инструментом для познания процессов, происходящих в котелке магнитного компаса при отклонении картушки (ее магнитной оси) от плоскости компасного меридиана. Проведенный при обосновании математической модели анализ сил и моментов, имеющих место при вращении чувствительного элемента, позволили составить уравнение динамики вращательного движения картушки (5) и на ее основе дифференциальные уравнения (6)-(9). Частные решения этих дифференциальных уравнений, представленные выражениями (24)-(27), являются математической моделью колебаний чувствительного элемента магнитного компаса при её малых отклонения от плоскости компасного меридиана и основным результатом настоящей работы.

Кроме этого, результат работы включает в себя:

- формулу (14) определения периода затухающих колебаний чувствительного элемента магнитного компаса;
- формулу (29) и следующий из неё альтернативный метод определения угла застоя;
- две программы для ЭВМ, первая из которых представляет собой реализацию обоснованной математической модели и даёт возможность получить частное решение дифференциальных уравнений. Вторая программа предназначена для расчета угла застоя (ширины зоны застоя) по двум смежным (отстоящим по времени на один полупериод) амплитудным значениям отклонения.

Новизна результата определяется решением в явном виде дифференциального уравнения колебаний (вращения) картушки магнитного компаса с использованием допущения о малости угла отклонения.

Практическая значимость результата заключается в оптимизации процедуры эксплуатации магнитного компаса (в частности, для определения угла застоя) и в более глубоком изучении принципов действия магнитного компаса.

Достоверность результата подтверждается проведенными экспериментами и сравнение с вычислительной моделью.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Медведев А.Р., Кокозенко М.О. Математическая модель вращения чувствительного элемента (картушки) магнитного компаса // Дни науки: материалы межвузовской научно-технической конференции студентов и курсантов на базе ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет», 10-21 апреля 2017. Калининград, 2017. С. 324-329.
2. Воронов В.В., Григорьев Н.Н., Яловенко А.В. Магнитные компасы. Теория. Конструкция. Девиационная работы: учебное пособие. СПб.: Элмор, 2004. 192 с.
3. Прандтль Л. Гидроаэромеханика. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000. 576 с.
4. Бутиков Е.И. Осциллятор с сухим и вязким трением: учебное пособие // Электрон. дан. Режим доступа URL: [http://butikov.faculty.ifmo.ru/Applets/manlr\\_2.pdf](http://butikov.faculty.ifmo.ru/Applets/manlr_2.pdf). (дата обращения 09.07.2018)
5. Ермаков С.В. Критика методики определения угла застоя картушки магнитного компаса // V Международный Балтийский морской форум: материалы форума, г. Калининград, 21-27 мая 2017. Калининград, 2017. С. 60-67.

#### **MATHEMATICAL MODEL OF OSCILLATIONS OF MAGNETIC COMPASS SENSITIVE ELEMENT AT SMALL DEVIATION OF ITS AXIS FROM THE PLANE OF COMPASS MERIDIAN**

Ermakov Sergey Vladimirovich, senior lecturer of Navigation department

Baltic fishing fleet state academy FSBEI HE "KSTU", Kaliningrad, Russia,  
e-mail: esv.klgd@mail.ru

*The paper presents a differential equation connecting the characteristics of a magnetic field, a magnetic system of a sensitive element and a compass liquid, the angle of the deviation of a card, its angular velocity and acceleration. A solution of this equation is obtained. This solution is a mathematical model of the sensitive element oscillations. An alternative method for determining of the magnetic compass friction error is substantiated on the basis of the mathematical model.*

## РАЗРАБОТКА ТИПОВОЙ ИНСТРУКЦИИ ДЛЯ ЛИНЕЙКИ ЭЛЕКТРОЛИЗНО-ВОДНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Загацкий Владимир Рувимович, канд. техн. наук, доцент  
Лещинский Марк Борисович, канд. техн. наук, доцент  
Лещинская Галина Иосифовна, канд. техн. наук, доцент  
Никулин Тимофей Русланович, аспирант

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,  
Калининград, Россия, e-mail: zagazc@mail.ru

*Авторами спроектирована и изготовлена линейка макетов универсальных сварочных устройств, которые используют для получения смеси кислорода и водорода кадмий-никелевые щелочные аккумуляторы. Устройства конструктивно идентичны, отличаются хорошими энергетическими характеристиками, высокой надежностью и ресурсом работы, а также низкой себестоимостью. Для обеспечения грамотной и безопасной их эксплуатации разработана типовая инструкция*

Предлагаемое оборудование пригодно для общепромышленного применения при различных работах, связанных с высокотемпературным нагревом, в том числе – для сварки при ремонтах, в системе жилищно-коммунального хозяйства, для ремонта автомашин, строительной, сельскохозяйственной техники, в ювелирном деле, при зубопротезировании, при термообработке металлов, и других работах [1].

Было разработано и изготовлено 3 конструктивно идентичных макета установок из новых щелочных аккумуляторов в пластиковых корпусах максимальной производительностью от 300 до 900 литров водородно-кислородной смеси газов в час, два из них показаны на Рис.1.



Рис. 1. ЭВГ производительностью 600 и 900л газовой смеси в час

Конструкции этих установок аналогичны ранее изложенным в опубликованных материалах [2, 3, 4, 5], имеют единую компоновку, внешний вид, элементы управления. Отличия заключаются в использовании новых щелочных аккумуляторов, имеющих, в значительной мере, необходимые характеристики, но производства разных отечественных заводов, что определило отличия в конструкции, эксплуатационных параметрах и, просто в удобстве применения. В процессе «доводки» макетов при их сборке и апробации в лабораторных и производственных условиях были найдены решения по преодолению возникавших проблем.

Для продвижения электролизно-водных генераторов (ЭВГ) потребителям возникла необходимость разработки единообразной инструкции, позволяющей при минимальном объеме материала обеспечить пользователя достаточной информацией для грамотной и безопасной эксплуатации оборудования.

Такая задача была решена при передаче заказчику установки, которую предполагается использовать в учебных и научных целях и для которой была разработана ниже приведенная инструкция, «привязанная» к ЭВГ производительностью 600 литров газа в час.

При переходе на эксплуатацию ЭВГ меньшей или большей производительности будет меняться только марка инверторного источника питания, рекомендуемые параметры тока для обеспечения оптимальных режимов работы установки, используемых углеводородных добавок, зависящих от потребностей соответствующего пользователя.

Федеральное агентство по рыболовству  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Калининградский государственный технический университет»  
(ФГБОУ ВО «КГТУ»)

## ИНСТРУКЦИЯ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ на электролизно-водный генератор

### «GASWEL – 600»



Калининград

## Введение

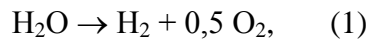
В сварочном производстве совершенствуются технологические процессы, позволяющие исключить применение дорогостоящих материалов. Например, для газопламенной обработки материалов используются различные газы – заменители ацетилена. В таком качестве может применяться водородно-кислородное пламя, получаемое при сжигании газовой смеси, генерируемой электролизно-водными генераторами (ЭВГ). Такая замена позволяет отказаться от дорогостоящего, громоздкого баллонного хозяйства, которое также требует периодического обновления. Кроме того, немаловажным следует считать факт уменьшения загрязненности окружающей среды, так как конечным продуктом при сжигании водородно-кислородной смеси является вода.

Для электролитического разложения воды на водород и кислород в качестве исходного сырья используются электролиты – водные растворы щелочей.

Напряжение разложения воды, т.е. минимальная величина напряжения, приложенная к аноду и катоду, при которой осуществляется выделение на электродах водорода и кислорода в виде газовых пузырьков составляет при 25<sup>0</sup>С около 1,2 В. Однако, для реальных процессов из-за потерь напряжения на омическом сопротивлении электродных пластин, явлений поляризации, общее напряжение на ячейке находится в пределах от 1,8 до 2,4 В при изменении плотности тока электролиза от 50 до 300 мА/см<sup>2</sup>.

Образование молекул газа при электролизе происходит за счет диссоциации молекул воды или их прямого разряда с образованием атомов водорода на катоде и их последующей рекомбинацией в молекулы, и выделением кислорода на аноде в результате разряда гидроксид-иона ОН<sup>-</sup>.

Согласно суммарному уравнению реакции разложения воды при электролизе



количество щелочи в растворе остается неизменным при соблюдении условий, исключающих ее кипение и унос пузырьками газа, а количество воды уменьшается как в результате ее разложения, так и в результате испарения и уноса пузырьками газа.

Температура водородно-кислородного пламени находится в пределах 2100-2800<sup>0</sup>С и зависит от отношения объемов кислорода и водорода в смеси. Максимальная температура пламени достигается при:

$$\beta_0 = V_{\text{O}_2}/V_{\text{H}_2} = 0,3, \quad (2)$$

При газопламенной обработке используются горючие смеси, имеющие различные скорости распространения фронта пламени. Для ацетиленокислородной смеси ее значение при атмосферном давлении и комнатной температуре составляет 12,5-13,7 м/с, для водородно-кислородной – 8,9, для пропаново-кислородной – 3,8-4,5.

Низкие скорости распространения пламени при сжигании пропана, бутана, метана и др. газов – заменителей ацетилена в кислороде обуславливают более длинное пламя и больший объем зоны пламени, чем при сжигании ацетиленокислородной смеси в горелках с одинаковыми диаметрами отверстия. В результате количество передаваемой теплоты на единицу площади сечения канала горелки и концентрация нагрева поверхности при использовании газов-заменителей ацетилена уменьшается.

Благодаря высокой скорости распространения водородно-кислородное пламя имеет меньший объем и, по сравнению с другими газами-заменителями ацетилена, обеспечивают наиболее концентрированный нагрев.



Как уже отмечалось выше, электролизно-водные генераторы генерируют водородно-кислородную смесь с постоянным, нерегулируемым отношением объемов кислорода к водороду  $\beta_0 = 0,5$ .

Одним из наиболее простых способов регулирования состава горючей газовой смеси является обогащение ее парами легкоиспаряющихся углеводородных соединений. Исследования показали, что для получения нормального сварочного пламени доля паров различных углеводородных соединений должна быть в пределах 5-25% от общего объема газовой смеси.

Выбор углеводородных соединений производится с учетом возможности максимального насыщения газа – носителя парами этих соединений с целью повышения тепловых характеристик пламени, в частности, теплотворной способности горючей газовой смеси, и минимального вредного воздействия углеводородных соединений на организм человека.

Для этих целей в той или иной мере подходят бензин, керосин, спирт, ацетон.

Бензин – самое летучее из жидких нефтяных топлив. Температура бензиново-кислородного пламени –  $2500^{\circ}\text{C}$ , а скорость распространения фронта пламени бензина зависит от многих факторов, но достаточно высока – более 10 м/с. С учетом этого обстоятельства считается, что добавление паров бензина в водородно-кислородную смесь, повышая теплотворную способность, не будет снижать концентрацию нагрева металла.

### Назначение электролизно-водного генератора

Электролизно-водный генератор (ЭВГ) «GASWEL – 600» предназначен для сварки, резки, высоко- и низкотемпературной пайки металлов, и для газопламенной обработки других материалов (стекла, керамики и т.д.). Внешний вид установки показан на рис. 1

### Состав установки

1. Электролизно-водный генератор (1 шт.);
2. Инверторный источник питания технологическим током (1 шт.);
3. Газовая горелка ГС- 2 (1 шт.);
4. Соединительные кабели (2 шт.);
5. Газовые шланги с огнегасящими вставками (2 шт.);
6. Специальная воронка дозаправки углеводородным компонентом (1 шт.);
7. Инструкция по эксплуатации ЭВГ;
8. Правила безопасности при производстве водорода методом электролиза воды ПБ 03-598-03

### Технико-технические данные

Питание инверторного источника	220В,50Гц
Потребляемая от сети мощность, кВт	до 2,5
Значение сетевого тока, А	до 16
Максимальный ток ЭВГ, А	100

Производительность по газовой смеси, л/час	до 600
Рабочее давление газа, бар	до 0,7
Максимальная температура пламени, °С	2800
Средний расход обессоленной воды, л/час	0,3
Время непрерывной работы при полной заправке, часов (без дозаправки водой)	6
№ мундштука горелки	3
Габариты ЭВГ, мм	850x550x160
Масса ЭВГ, кг	40
Коэффициент прерывистости работы при 50А	100%
Степень защиты	Аппарат соответствует Европейским нормам безопасности

### Устройство и принцип работы установки



*Рис. 1. Внешний вид ЭВГ*

При протекании электрического тока через воду выделяются газообразный водород и кислород. С целью уменьшения омического сопротивления воды, а значит

для увеличения производительности процесса электролиза в воду однократно (перед введением в эксплуатацию) добавляют щелочь КОН, которая практически не расходуется в процессе выработки газовой смеси.

Внутренняя компоновка ЭВГ показана на рис.2

Расходуемым материалом в установке является вода, поэтому в процессе работы уровень электролита постоянно понижается и его периодически нужно контролировать, для этой цели используется индикатор уровня жидкости 8.



Рис 2. Элементы ЭВГ

- 1- блок гидравлических затворов; 2- регулировка подрывного клапана;
- 3- редукционный клапан; 4- реле давления; 5- ресивер; 6- ячейка ЭВГ;
- 7- вентиляторы продувки ЭВГ; 8- индикатор уровня жидкости в ресивере;
- 9- тепловое реле

Произведённая в электролизёре водород-кислородная газовая смесь пропускается через блок гидравлических затворов 1, состоящий из двух одинаковых затворов. Один из них выполняет также роль барботера, который необходим для управления составом газовой смеси. Блок затворов выполняет роль пассивной защиты при обратном ударе (регулировка подрывного клапана осуществляется гайкой 2). Эту же роль, то есть роль защиты выполняют огнегасящие вставки на выходе из гидравлических затворов, а также редукционный он же невозвратный клапан 3 и столб

электролита в ресивере 5. Таким образом ячейки ЭВГ 6 защищены от воспламенения генерируемой газовой смеси (обратного удара) 4-х ступенчатой пассивной защитой.

Рабочее давление в ресивере установлено 0,07 МПа, на это давление и отрегулирован редукционный клапан 3, это давление регламентировано «Правилами безопасности при производстве водорода методом электролиза воды ПБ 03-598-03». В случае повышения давления в системе ЭВГ до величины 1,2МПа сработает реле давления 4, которое отключит ток в системе инверторного блока питания (БП). Если давление в системе снизится до величины 0,06МПа реле давления подключит БП и ЭВГ начнет генерировать рабочую смесь газов.

В случае превышения расчетной температуры блока ЭВГ сработает тепловое реле 9, которое отключит ток в системе БП, а после продувки корпуса ЭВГ с помощью вентиляторов 7, и понижения температуры ток вновь будет подаваться к БП, а значит возобновиться генерация газовой смеси.

### **Подготовка ЭВГ к работе**

Перед началом работы необходимо провести внешний осмотр установки. Не должно быть никаких видимых протечек технологических жидкостей.

Необходимо убедиться в том, что уровень воды (электролита) находится в необходимых пределах, то есть «проволочный» индикатор уровня 8 (Рис. 2) должен быть выше заливной горловины на 5-20мм.

Проверить уровень углеводородной добавки (бензин, ацетон, бензол и т.д.) по индикатору 9 на лицевой панели ЭВГ Рис. 3. Уровень должен быть не менее 1/3 высоты индикаторного окна и не более 3/4 его высоты.

Осмотреть шланги рис.1 на предмет отсутствия их повреждений.

Проверить качество затяжки сопряжений шлангов с горелкой и шлангов с огнегасящими вставками Рис. 1 и выходами 2, 3 (Рис. 3) ЭВГ.

Вращением вентилей горелки убедиться в том, что открыт вентиль водородно-кислородная смесь газов (типовой вентиль «кислород») и перекрыт вентиль обогащенная смесь газов (типовой вентиль «ацетилен»).

Сетевая вилка инверторного блока питания должна быть включена в гнездо «сеть инвертор» 6 Рис. 3. Силовые кабели от БП должны быть подключены к соответствующим гнездам 7 – вход «-» и 8 – вход «+» на лицевой панели ЭВГ.



*Рис. 3. Лицевая панель ЭВГ*

1- манометр; 2- выход водородно-кислородной смеси; 3 – выход смеси обогащенной углеводородным компонентом; 4 – индикатор «сеть»; 5 – индикатор «штатная работа»; 6 – «сеть инвертор»; 7 – вход «-»; 8 – вход «+»; 9 – уровень углеводородной жидкости

2- манометр; 2- выход водородно-кислородной смеси; 3 – выход смеси обогащенной углеводородным компонентом; 4 – индикатор «сеть»; 5 – индикатор «штатная работа»; 6 – «сеть инвертор»; 7 – вход «-»; 8 – вход «+»; 9 – уровень углеводородной жидкости

Удостовериться в том, что сеть для подключения установки рассчитана на длительный режим работы и способна обеспечить выходную мощность до 2,5 кВт. Подключить сетевую вилку ЭВГ к соответствующей розетке.

### **Порядок работы ЭВГ**

При подключении вилки ЭВГ к сетевой розетке должен загореться светодиодный индикатор наличия сетевого напряжения 4.

Включить выключатель «сеть» на тыльной стороне БП при этом должен загореться светодиодный индикатор «штатная работа» 5 и заработать вентиляторы продувки. Вращая ручку-регулятор силы тока на лицевой панели БП выставить необходимый режим работы.

Манометр 1 на лицевой панели через 10-15сек должен показывать рост давления генерируемой смеси газов. При давлении 0,05 МПа из сопла горелки должен начать выходить газ.

При достижении давления 0,07МПа необходимо перекрыть вентиль водородно-кислородная смесь газов (типовой вентиль «кислород») и приоткрыть вентиль обогащенная смесь газов (типовой вентиль «ацетилен»).

**ВНИМАНИЕ!** При этом не должно быть слышно утечек газа из корпуса ЭВГ и не должно быть видно появления протечек технологических жидкостей.

Можно поджечь газовую смесь. Отрегулировать характер пламени полностью открыв вентиль водородно-кислородная смесь газов (типовой вентиль «кислород») и вращать вентиль обогащенная смесь газов (типовой вентиль «ацетилен»). При этом характер и цвет пламени меняется от окислительного (сплошное бесцветное или желтоватое пламя), до восстановительного (факел с синим язычком).

**ВНИМАНИЕ!** Для того, чтобы погасить горелку нужно вначале перекрыть вентиль водородно-кислородная смесь газов (типовой вентиль «кислород»), а затем плавно перекрыть вентиль обогащенная смесь газов (типовой вентиль «ацетилен»).

Если невозможно отрегулировать состав пламени (при нормальном уровне углеводородной жидкости) есть вероятность переполнения барботера-обогапителя отстоем и тяжелыми фракциями углеводорода в этом случае необходимо выключить устройство. Порядок отключения зеркален включению.

Открыв оба вентиля горелки дождаться падения давления ниже 0,03МПа, затем отключить шланг от соответствующего выхода ЭВГ 3 и с помощью подручных средств удалить эту жидкость. Например, используя медицинский шприц с трубкой. Заправку углеводородным компонентом провести через выходную горловину применив специальную воронку из комплекта (убедиться в наличии уплотняющей прокладки).

**ВНИМАНИЕ!** Для дозаправки ресивера использовать дистиллированную или обессоленную воду. При этом обязательно убедиться в отсутствии давления в системе. Взять за правило в любом случае заливную горловину откручивать медленно во избежание вероятного выброса паров и брызг электролита.

#### **Требования по технике безопасности**

**ВНИМАНИЕ!** Необходимо всегда помнить, что установка является сложным устройством, обращение с которым требует точного соблюдения мер безопасности.

Перед работой с использованием установки необходимо внимательно ознакомиться с «Правилами безопасности при производстве водорода методом электролиза воды ПБ 03-598-03»

#### **ООО "Энергия ННО"**

236023 г. Калининград, Советский проспект 1, офис 379/1

PHONE: +7(906)218-61-99; +7(906)236-92-07

E-MAIL: info@gaswel.ru; markbl@mail.ru; zagazc@mail.ru; nikulintr@gmail.com;



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продолжаются работы над совершенствованием конструкции ЭВГ. Ведутся переговоры с предприятием о выпуске опытной партии установок ЭВГ различной производительности для широкого круга потребителей. С целью упрощения этой задачи и была разработана единообразная инструкция, пригодная для обеспечения потребностей будущих пользователей ЭВГ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корж В.Н. Обработка металлов водородно-кислородным пламенем / В.Н. Корж, Ю.С. Попиль. - Киев: Екотехнологія, 2010. - 194 с.
2. Устройство для газопламенных работ: патент РФ №2508970 РФ / М.Б. Лещинский, В.Р. Загацкий. - Опубликовано в бюл. «Патенты и полезные модели» №7, 2014
3. Устройство для газопламенных работ: патент на полезную модель РФ №152029 / М.Б. Лещинский, В.Р. Загацкий. - Опубликовано в бюл. «Патенты и полезные модели» № 12, 2015.
4. Устройство для газопламенных работ: патент на полезную модель РФ №153615/ М.Б. Лещинский, В.Р. Загацкий. - Опубликовано в бюл. «Патенты и полезные модели» № 21, 2015.
5. Устройство для газопламенных работ: патент на полезную модель РФ №163325/ М.Б. Лещинский, Т.Р. Никулин, В.Р. Загацкий. - Опубликовано в бюл. «Патенты и полезные модели» № 19, 2016.

## DEVELOPMENT OF TYPICAL INSTRUCTIONS FOR THE LINE OF ELECTRIC-WATER GENERATORS

Zagatsky Vladimir Ruvimovich, Cand. tech. Sciences, Assoc.  
Leshchinsky Mark Borisovich, Cand. tech. Sciences, Assoc.  
Leschinskaya Galina Iosifovna, Cand. tech. Sciences, Assoc.  
Nikulin Timofey Ruslanovich, graduate student

Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,  
e-mail: zagazc@mail.ru

*The authors designed and manufactured a line of models of universal welding devices that use cadmium-nickel alkaline batteries to produce a mixture of oxygen and hydrogen. The devices are structurally identical, differ in good energy characteristics, high reliability and service life, as well as low cost. To ensure their competent and safe operation, a standard instruction was developed.*

## МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ РАБОТОЙ ФЛОТА

Зотова Екатерина Сергеевна, ст. преподаватель

Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО  
«КГТУ», Калининград, Россия, e-mail: katorina033@mail.ru

*Рассматриваются актуальные вопросы повышения эффективности работы транспортного и рыбопромыслового флота, связанные с оптимизацией его управления. Сформулированы методологические и методические основы организации работы флота как важнейшей функции управления. Определены методы и модели организации, в своей совокупности являющиеся базовой частью методологии управления работой флота*

### Введение

Деятельность человека на море, обеспечиваемая морским флотом во всем своем многообразии, является источником нескольких отраслей, которые, по сути, формируют собой основу как национальных, так и мировой экономик. В частности, транспортная и рыбодобывающие отрасли занимают значительной сегмент в экономической деятельности Российской Федерации.

Так, морской транспорт – это важнейшая базовая отрасль экономики нашего государства, которая решает задачу удовлетворения потребностей населения и хозяйствующих субъектов в перемещении пассажиров и грузов и тем самым делает значительный вклад в обеспечение национальной безопасности и нормального функционирования сложного хозяйственного комплекса государства.

Морской транспорт был и остается важной составной частью транспортной системы. По вкладу в освоение перевозочной работы, выполняемой всеми видами транспорта, ему принадлежит третье место после железнодорожного и трубопроводного. Основная сфера его деятельности – обеспечение внешнеэкономических связей нашей страны, прежде всего со странами, не имеющими с Россией общей сухопутной границы и в сообщениях с которыми возможно использование только морских путей сообщения.

Важную роль играет морской транспорт в транспортном обслуживании районов Дальнего Востока и Крайнего Севера. Он обеспечивает жизнедеятельность регионов, в которых другие виды транспорта развиты слабо или вовсе отсутствуют, так же для имеющей эксклавный характер Калининградской области.

В Доктрине продовольственной безопасности Российской Федерации, утвержденной указом Президента РФ №120 от 30 января 2010 года, определено, что стратегической целью продовольственной безопасности, как части безопасности национальной, является обеспечение населения страны безопасной сельскохозяйственной продукцией, рыбной и иной продукцией из водных биоресурсов и продовольствием. Кроме того, эта Доктрина в число показателей продовольственной безопасности в сфере производства и национальной конкурентоспособности включает среди прочих объемы производства рыбной продукции. Таким образом, повышение эффективности работы даже одного отдельно взятого промыслового судна является



задачей не только для рыбопромышленной компании, которой принадлежит судно и его улов, но и стратегической задачей на государственном уровне.

Эффективность работы транспортного и рыбопромыслового флота во многом зависит от уровня управления. Основными функциями управления [1] принято считать планирование, организацию, контроль и координацию. Основные методы управления – административно-правовые, экономические, мотивационные, экономико-математические. Эффективная реализация названных функций и методов управления возможна лишь при условии использования системного подхода. В этой связи актуальной является задача разработки методологического обеспечения процессов управления, методов и моделей оптимизации управленческих решений.

### **Сущность понятия «организация» в контексте управления флотом**

«Организация» – это важнейшая функция управления, обеспечивающая выполнение разработанных планов работы флота. Смысл этой функции в том, что после того как план (например, годовой) разработан, необходимо разработать механизм его реализации. Поскольку мы управляем процессами, возникает необходимость рациональной организации и взаимодействия основного и вспомогательных процессов, обеспечения функционирования этих процессов всеми необходимыми ресурсами (информация, финансы, техника и технологии, специалисты и др.). Необходимо определить параметры контролируемых процессов, управляемые и неуправляемые переменные, критерии и точки контроля управляемых процессов. Необходимо также определить круг вовлеченных в транспортный процесс организаций, определить условия сотрудничества или взаимодействия с ними, определить приоритеты и т.д. Все это позволит системно организовать работу флота в контексте выполнения целевых задач [1, 2].

Например, в судоходной компании на балансе 10 судов – балкеров, компания работает на перевозке насыпных грузов между портами Европы. Разработан годовой план перевозок. Контрольные цифры плана известны. Необходимо определить логистические процессы – реклама, анализ рынка, фрахтование, заключение договоров, подготовка флота, включая комплектование экипажей, приведение судов в мореходное состояние, финансирование, перевозка грузов, агентирование и работа с портами, обеспечение безопасности мореплавания и др. Кроме того, необходимо разработать регламент технического обслуживания флота и контроля его технического состояния. Названные процессы характеризуются определенными параметрами и критериями. Так, финансирование должно быть достаточным для того, обеспечить подготовку флота, оплату услуг портов, агентов, снабженческих организаций, судоремонтных предприятий и т.д.

### **Методологические и методические основы организации работы флота в контексте реализации целей, годовых и оперативных планов**

Методологическим базисом организации работы флота, как важнейшей функции управления является системный подход. В качестве основного научного инструментария следует рассматривать [3]:

- методы «дерева целей»,
- теорию графов и, в частности, методы сетевого планирования и управления,
- методы линейного и динамического программирования,
- методы теории вероятности, методы векторной оптимизации,
- методы имитационного моделирования и др.

Для использования научных методов организации работы флота необходимо сделать постановку задач, которые следует решить, выбрать соответствующие методы, программы и алгоритмы решения, проверить на адекватность и устойчивость.

Методические основы организации работы флота – это, по сути:

- 1) устав компании, регламентирующие документы, инструкции, и рекомендации, разработанные компанией;
- 2) международные Конвенции в области мореплавания, обязательные и рекомендательные документы, инструкции, положения ИМО;
- 3) правовые нормы, инструкции, правила, регламентирующие перевозки грузов и пассажиров;
- 4) рекомендации «хорошей морской практики».

Анализ перечисленных документов, позволяет понять не только важность каждого из них, но и то, как важно увязать, содержащиеся в них требования и рекомендации, в комплексе. По сути, правовые акты, инструкции, правила и т.д. являются своего рода ограничениями и задают рамку дозволенного, рационального, безопасного. Реализовать все это в контексте организации работы флота возможно путем разработки комплекса методик, позволяющих находить рациональные организационные решения с учетом заданных рамок дозволенного с позиции права, безопасности, эффективности.

Таким образом, методика в контексте управления – это совокупность способов рационального проведения определенной работы или комплекса взаимосвязанных работ. Следует отметить, что на сегодняшний день методологические подходы к организации работы флота разработаны не достаточно. С изменением политической и экономической ситуации в стране многие ранее действовавшие методики, инструкции, рекомендации, правовые акты национального и локального уровней прекратили свое действие или были «изъяты из обращения» новыми собственниками. Новые регламентирующие документы и методики должной разработки не получили. Это относится к вопросам планирования, организации хозрасчета, организации сбыта и снабжения, финансирования, взаимодействия с портами, судоремонтными предприятиями и др. В тоже время разработка методологических подходов к организации работы флота и создание конкретных методик является важным направлением работы в сфере управления флотом.

### **Методы и модели организации работы транспортного и рыбопромыслового флота**

Из теории управления нам известны такие методы управления как экономические, административно-правовые, мотивационные, экономико-математические, социологические.

Экономические методы – это установление тесной взаимосвязи экономического положения коллектива и материального благосостояния каждого от его вклада в общее дело.

Административно-правовые методы - это система организационной и административно-распорядительной деятельности. Здесь решаются следующие задачи:

- обеспечение согласованности и сопоставимости деятельности коллективов и отдельных исполнителей;
- четкое определение прав и обязанностей каждого звена и работника;
- определение мер воздействия на виновных в случае отклонений процесса выполнения работ от нормы.

Мотивационные методы – это стимулирование за достижения в работе, создание условий для эффективной работы и ее привлекательности с четким определением перспектив для коллектива и каждого индивида.

Экономико-математические методы – это методы оптимизации работы флота на основе использования прикладной математики, информационных технологий и компьютерной техники.

Социологические методы – в современных условиях это создание в коллективе (экипаже) хорошего психологического климата, включение членов экипажа в процесс поиска рациональных решений вопросов, которые касаются всего коллектива и допускают публичное обсуждение, использование социологии для активизации процесса адаптации членов экипажа при работе в смешанных интернациональных коллективах и др.

Реализация каждого из названных методов требует системной, продуманной, целесообразной работы, что достигается во многом за счет создания корректно построенных методик. Примером таких методик могут служить: методика расчета основных показателей материального стимулирования членов экипажа; методика оценки профессионализма специалистов; методика подготовки судна к предъявлению инспекторам классификационного общества (например, Ллойд). Далее приведем примеры использования экономико-математических методов в организации работы флота.

В целях рациональной организации выполнения комплекса работ (например, подготовка судна к рейсу) целесообразно использовать сетевые модели, позволяющие упорядочить весь комплекс работ, увязать цели со средствами достижения, рассчитать критический путь, определить сроки выполнения каждой работы и лиц ответственных, разработать рабочий график процесса подготовки судна к рейсу. Очевидно, что для разработки сетевых моделей целесообразно написать методику, которая бы включала и рекомендации по проведению имитационных экспериментов для изучения влияния тех или иных параметров на выполнение комплекса работ. Такая методика будет полезна и в целях повышения квалификации сотрудников.

Другой пример, относится к решению вопросов распределения судов по направлению перевозок. Решается задача распределения судов с целью оптимизации их суммарной провозной способности. Методика включает постановку задачи, алгоритм решения и анализа, планирование имитационных экспериментов. Задача распределения рыболовных судов по районам промысла решается с использованием методов линейного и динамического программирования [1, 2].

Вопросы безопасности мореплавания и подготовки экипажей к действиям в экстремальных ситуациях имеют первостепенную важность, однако, не смотря на множество работ и исследований в этой области, до сих пор практически нет инновационных методик, обеспечивающих эффективную комплексную подготовку экипажа и отдельных специалистов к действиям в экстремальных ситуациях. Инновационный характер таких методик должен быть ориентирован на развитие мыслительности, системного мышления, поскольку современные методики ориентированы на «натаскивание» к действиям в экстремальных, но вполне конкретных ситуациях, что нельзя признать эффективным по понятным причинам.

Таким образом, функция управления «Организация» является ключевой в силу того, что именно благодаря организации осуществляется рациональное взаимодействие и «запуск» основного и вспомогательных процессов, ориентированных на достижение конкретных целей.

## Выводы

1. В целях повышения эффективности эксплуатации флота актуальной является задача развития методов и средств управления флотом на основе разработки методологического обеспечения процессов управления, методов и моделей оптимизации управленческих решений.

2. Вопросы безопасности мореплавания и подготовки экипажей к действиям в экстремальных ситуациях имеют первостепенную важность, что объективирует разработку инновационных методик подготовки экипажей к действиям в экстремальных ситуациях.

3. Функция управления «Организация» является ключевой в силу того, что именно благодаря организации осуществляется рациональное взаимодействие и «запуск» основного и вспомогательных процессов, ориентированных на достижение конкретных целей управления флотом.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мойсеенко С.С. Управление работой флота. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2016. – 249 с.
2. Бакаев В.Г. Эксплуатация морского флота. – М.: Транспорт. 1965. – 559 с.
3. Вентцель Е.С. Исследование операций. – М.: Сов. Радио, 1972. – 546 с.

## METHODOLOGICAL FOUNDATION OF THE FLEET MANAGEMENT

Zotova Ekaterina Sergeevna, senior lecturer

Baltic fishing fleet state academy FSBEI HE "KSTU", Kaliningrad, Russia,  
e-mail: katorina033@mail.ru

*The article considers topical issues of increasing the efficiency of the work of the transport and fishing fleet, related to the optimization of its management. The methodological and methodological foundations of the organization of the work of the fleet as the most important management function are formulated. The methods and models of the organization, which in their totality are the basic part of the fleet management methodology, are defined.*

## СТРУКТУРА КОМПЛЕКСА ЗАДАЧ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ ГРУЗОПЕРЕВОЗОК

Мойсеенко Сергей Сергеевич, д-р пед. наук, канд. техн. наук, профессор  
Мейлер Леонид Ефимович, канд. техн. наук

Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО  
«КГТУ», Калининград, Россия, e-mail: moiseenkoss@rambler.ru;  
transport@bga.gazinter.net

*Эффективность мультимодальных перевозок зависит от их рациональной организации. Аналитический обзор работ в этой области показывает, что вопросы оптимизации организации мультимодальных перевозок разработаны недостаточно. В этой связи актуальной является задача оптимизации проектирования транспортно-логистической системы (ТЛС) перевозок. В статье представлена структура комплекса задач оптимизации проектирования и управления мультимодальными перевозками. Определены критерии оптимальности. Предложены методы решения задач оптимизации. Учитывая сложность формализации ТЛС, предлагается использовать как методы исследования операций, так и методы эвристического программирования, что позволяет оптимизировать проект ТЛС в целом*

В мультимодальных перевозках в транспортный процесс вовлечены многие организации и физические лица, многие виды транспорта, перегрузочной техники и технологий. Технологический процесс перевозок включает, как правило, множество логистических операций и логистических цепочек [4, 6, 8]. Все это множество составляет пространственно-временную логистическую систему, эффективное функционирование которой возможно лишь при условии рациональной организации такой системы [4]. В этой связи актуальной является задача оптимизации проектирования транспортно-логистической системы (ТЛС) доставки грузов. Аналитический обзор работ в этой области показывает, что на сегодняшний день вопросы оптимизации ТЛС разработаны не достаточно [8].

Основной целью проекта является, как правило, обеспечение эффективности перевозок и сохранности груза, при этом критериями эффективности являются – минимизация транспортных издержек, сроков доставки грузов и рисков возникновения чрезвычайных ситуаций (ЧС)/аварий транспортных средств и потери груза. Следовательно, эффективность и качество проекта должно оцениваться по трем названным критериям. Требования к проекту и основные критерии его оценки формулируются в техническом задании (ТЗ) на проектирование. Например, в ТЗ указываются сроки доставки груза, допустимые транспортные издержки, условие «от двери до двери» и т.д.

Алгоритм проектирования ТЛС доставки грузов достаточно полно представлен в работах [3, 4, 5]. Оптимизация проектирования это, в первую очередь, поиск оптимальных или лучших решений на каждом этапе разработки проекта. В таблице 1 представлена структура комплекса задач поиска оптимальных или лучших решений по выбранным критериям.

Таблица 1

## Структура комплекса задач оптимизации проектирования ТЛС доставки грузов

№	Наименование задач	Методы оптимизации или рациональных решений	Критерии
1	Анализ ситуации	Системный анализ	
2	Выбор альтернативных маршрутов	Методы ИСО и экспертных оценок	Длина маршрута, безопасность.
3	Выбор транспортных средств	Методы ИСО (динамическое программирование), экспертные	Скорость, цена фрахта/аренды, экономичность, безопасность.
4.	Выбор технологий погрузо-разгрузочных работ (ПРР) и транспортировки грузов	Оценка вариантов	Производительность, тарифы, безопасность.
5.	Технические расчеты (остойчивость и посадка, прочность и др.)	Методики расчетов	Безопасность, допустимые нагрузки.
6.	Расчет времени и стоимости перевозки и обработки грузов	Экономические расчеты	Минимизация транспортных издержек, сроки доставки груза по контракту.
7.	Прогностические оценки рисков возникновения ЧС/аварий и потери груза	Методы теории вероятности. Методики оценки поведения судна в экстремальных условиях и др.	Допустимый уровень риска
8.	Оценка вариантов ТЛС доставки грузов и выбор наиболее рационального по принятым критериям	Методы оценки ТЛС по нескольким критериям эффективности	Время, транспортные издержки/стоимость и уровень риска
9.	Разработка сетевой модели реализации проекта ТЛС	Методы теории графов	Длина критического пути, стоимость.
10.	Разработка рабочего план-графика выполнения грузоперевозки.	Табличный, графический	Контрольные сроки

Основные этапы проектирования.

На первом этапе:

- определить состав исходной информации, необходимой для анализа ситуации в пунктах отправления и назначения груза и по предполагаемым маршрутам следования и др.

- провести анализ ситуации и формулирование проблемы или значимых затруднений.

Определение состава исходной информации является важной задачей проектирования, поскольку от полноты и качества информации зависят многие результаты труда проектировщиков. Например, поставлена задача: разработать транспортно-логистическую систему доставки груза от продавца к покупателю. В этом случае потребуется следующая основная информация:

- информация о транспортных условиях договора купли-продажи и других условиях поставки, условиях и порядке финансирования;

- информация о физико-химических и транспортных характеристиках груза, упаковке и маркировке, условиях складирования, хранения, перевалки и транспортировки;

- правовые нормы, таможенные правила, требования международных конвенций и национальных нормативных документов в части обеспечения безопасности транспортировки и сохранности грузов, охраны окружающей среды;

- информация о возможных маршрутах транспортировки, рынке транспортных услуг и видах транспорта, тарифах на перевозку, условиях транзита, возможных рисках при перевозке грузов;

- информация о технико-технологических, коммерческих и организационных условиях в пунктах отгрузки, перевалки, перевозки, выгрузки в пунктах назначения;

- данные прогноза гидрометеорологических условий на маршрутах перевозок, пунктах погрузки, перевалки, выгрузки.

Анализ полученной информации позволяет оценить условия, в которых будет проходить процесс перевозок, проблемы «узких мест» или значимые затруднения, разработать комплекс мероприятий по устранению или снижению степени влияния на транспортный процесс негативных факторов. Технология анализа проблем представлена на рисунке 1. Представляется очень важной не только корректная формулировка проблем, но и их структуризация, что играет важную роль при выборе методов и средств решения этих проблем. Хорошо структурированная проблема легко переводится в комплекс задач, обеспечивающих ее решение.



Рис. 1. Дерево проблем оптимизации управления мультимодальными грузоперевозками

Представляется очень важной не только корректная формулировка проблем, но и их структуризация, что играет важную роль при выборе методов и средств решения этих проблем. Хорошо структурированная проблема легко переводится в комплекс задач, обеспечивающих ее решение. Однако в мультимодальных перевозках чаще встречаются слабо структурируемые проблемы. В этом случае эффективным методическим подходом является использование математических методов и эвристического программирования. Такой подход позволяет находить решения близкие к оптимальным, т.е. наиболее рациональные решения. В случае если проблемы не структурируемые, то рационально использовать методы экспертных оценок и эвристики.

В основу конструируемой системы для решения проблемы положена ее цель. Далее следует построение дерева целей, что позволяет непосредственно выбрать направления развития, систематизировать и привести в сравнительную форму различные варианты подбора средств и мероприятий по их использованию, оценить эти средства и мероприятия.

На втором и третьем этапе осуществляется выбор альтернативных маршрутов перевозки и видов транспорта. Альтернативные маршруты выбираются по критериям минимизации расстояний, времени и рисков. Альтернативные виды транспорта выбираются по критериям минимизации суммы фрахта/аренды/тарифов и безопасности. Оптимизация выбора транспорта возможна методами динамического программирования [1, 2, 5] и с использованием эмпирических формул [5]. Так, при использовании эмпирических формул в основу положены стоимостные показатели (постоянные и переменные расходы).

Пропорциональное снижение постоянных и некоторых переменных расходов в зависимости от увеличения размеров судна, а также увеличение портовых расходов в зависимости от размеров судна являются основными зависимостями, влияющие на выбор рациональных типоразмеров судов. Эти зависимости можно выразить формулой [7]:

$$\frac{C}{D} = \left( \frac{u}{D} + W \right) (t_1 - t_2) + \frac{1}{D} [t_1(S + gD) + t_2 r D^2], \quad (1)$$

где:

$C$  – общие эксплуатационные расходы за рейс;

$D$  – дедвейт судна, т.;

$u + WD$  - постоянные расходы судна в сутки ( $u$  и  $W$  – постоянные величины);

$t_1$  – продолжительность ходового времени, сутки.;

$$t_1 = \frac{A}{V}$$

$A$  – дальность плавания, мили;

$V$  – скорость в узлах;

$t_2$  – продолжительность стояночного времени, сутки.;

$S + gD$  – переменные расходы судна без портовых расходов ( $S$  и  $g$  – постоянные величины);

$rD^2$  – текущие портовые расходы в сутки ( $r$  – постоянная величина).

Оптимальная величина дедвейта судна с точки зрения минимизации расходов на одну тонну дедвейта находятся путем нахождения экстремума функциональной зависимости (1)



$$\frac{d\left(\frac{D}{C}\right)}{dD} = 0; \quad \frac{d\left(\frac{D}{C}\right)}{dD} = -\frac{u(t_1+t_2)}{D^r} - \frac{t_1 S}{D^r} + t_2 r = 0 \quad (2)$$

$$D_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{u(t_1+t_2)+t_1 S}{t_2 r}} = \sqrt{\frac{t_1}{t_2} \cdot \frac{u+S}{r} + \frac{u}{r}} \quad (3)$$

Подставив значение  $t_1$ , получим формулу для определения оптимальной величины дедвейта судна:

$$D_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{A u + S}{V t_2} + u \frac{1}{r}} \quad (4)$$

Эта формула определяет пропорциональную зависимость размера судна от дальности плавания.

Понятно, что приведенная формула расчета оптимальной величины дедвейта должна рассматриваться и использоваться для практических целей не как некоторый универсум, а лишь как одна из многих количественных и качественных оценок выбора наиболее эффективных типоразмеров судов. Оптимизация выбора железнодорожного и автомобильного транспорта также основывается на минимизации условно-постоянных и переменных затрат, которые чаще представлены как тарифные ставки за транспортировку. В реальной практике следует учитывать при выборе транспорта множество факторов трудно формализуемых. Решение, как правило, принимается на основе количественных, качественных оценок и эвристических методов.

На четвертом, пятом и шестом этапах решаются задачи выбора технологий погрузо-разгрузочных работ и транспортировки грузов, выполняются расчеты, связанные с погрузкой и транспортировкой грузов, а также расчет времени и стоимости перевозки и обработки грузов. Выбор осуществляется по критериям производительности ПРР, их стоимости и затрат времени на выполнение, безопасности и уровня рисков. Технологии транспортировки грузов выбираются в соответствии с правилами погрузки и транспортировки, рекомендациями, одобренными международной морской организацией (ИМО) и требованиями национальных нормативных документов. Оптимизация ПРР осуществляется с использованием эвристического программирования, моделей сетевого планирования и управления (СПУ).

На седьмом и восьмом этапах рассчитываются прогностические оценки рисков [6] возникновения ЧС/аварий и потери груза, интегральная оценка риска [8] и цена риска, допустимые уровни риска. В случае если уровень риска больше допустимого, то разрабатывается план мероприятий по снижению уровня риска. На восьмом этапе выполняется оценка вариантов ТЛС доставки грузов и выбор рационального варианта по принятым критериям. Основными критериями являются критерий безопасности/уровня риска, затрат времени на реализацию мультимодальной перевозки/всего транспортного цикла, транспортных издержек.

На девятом и десятом этапах осуществляется разработка сетевой модели планирования и управления мультимодальной перевозкой. Использование этого метода позволяет оптимизировать выполнение всего комплекса работ, связанных с организацией выполнения перевозок. Оптимизация достигается за счет логической «увязки» выполнения многих работ во времени и пространстве, сокращения продолжительности критического пути (если работы оцениваются затратами времени на их выполнение) за счет рационального распределения ресурсов и определения зон

ответственности. Рабочим инструментом оператора мультимодальной перевозки является план-графика выполнения грузоперевозки, разрабатываемый на основе сетевой модели [4, 5].

### Заключение

В статье предложен комплекс задач оптимизации транспортно-логистических систем мультимодальных перевозок, решение которых позволит существенно повысить качество проекта и управления процессами транспортировки.

Определены критерии оптимальности проектных решений и оценки эффективности проекта ТЛС мультимодальных перевозок.

Предложен порядок оценки безопасности перевозок на основе расчета локальных уровней риска и интегральной оценки риска.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вентцель Е.С. Исследование операций. Задачи, принципы, методология. – М.: Наука, 1980. – 320 с.
2. Громовой Э.П. Математические методы и модели в планировании и управлении на морском транспорте / Э.П. Громовой. – М.: «Транспорт», 1979. - 360 с
3. Миротин Л.Б. Транспортная логистика. Учебник/ Л.Б. Миротин. М.: Экзамен, 2005. – 512 с.
4. Мойсеенко С.С., Мейлер Л.Е. Методология проектирования транспортных процессов и систем: монография / С.С. Мойсеенко, Л.Е. Мейлер. Калининград. Изд-во БГАРФ, 2014. – 218 с.
5. Мойсеенко С.С. Управление работой флота: учебное пособие / С.С. Мойсеенко. – Калининград. – Изд-во БГАРФ, 2016. – 257 с.
6. Мойсеенко С.С., Мейлер Л.Е. Безопасность морских грузоперевозок / С.С. Мойсеенко, Л.Е. Мейлер. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2011. – 398 с.
7. Петровский В.В. Морское линейное судоходство/В.В. Петровский. – М.: Транспорт, 1977. – 287 с.
8. Фаустова О.Г. Методика оценки рисков возникновения чрезвычайных ситуаций в мультимодальных перевозках //Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология, № 1, 2014.

### A STRUCTURE OF A COMPLEX OF PROBLEMS OF OPTIMAL DESIGNING MULTIMODAL CARGO TRANSPORTATION

Moyseenko Sergey, D. Sc. Professor  
Meyler Leonid, Ph. D.

Baltic fishing fleet state academy FSBEI HE "KSTU", Kaliningrad, Russia,  
e-mail: transport@bga.gazinter.net; moiseenkoss@rambler.ru

*Effectiveness of multimodal transport depends on their rational organization. An analytical review of the papers have been published in this area shows that the issues of optimizing the organization of multimodal transport were insufficiently developed. In this regard the actual task is to optimize the design of transportation and logistics systems (TLS) transport. The article presents the structure of a complex of tasks for optimizing the design*

*and management of multimodal transport. Criteria for optimality are determined. Methods for solving optimization problems are proposed. Taking into account the complexity of TLS formalization, it is proposed to use both operational research methods and heuristic programming methods which makes to optimize the TLC project as a whol.*

УДК 656.61

## **ГРАНИЦЫ МОРСКИХ РАЙОНОВ А2 И РЕАЛЬНАЯ ДАЛЬНОСТЬ ПВ-РАДИОСВЯЗИ В НАПРАВЛЕНИИ «СУДНО-БЕРЕГ»**

Степаненко Дмитрий Петрович, доцент, канд. техн. наук

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,  
Калининград, Россия, e-mail: stepanenko49@yandex.ru

*Отмечается некорректность русскоязычного перевода текста п. 1.13 Конвенции СОЛАС-74 для определения границ морских районов А2. Предлагается вариант перевода, соответствующий терминологии Регламента Радиосвязи и организационной сути этих районов. Приводится методика и результаты оценки реальной дальности радиосвязи судна с береговой радиостанцией поверхностной ПВ радиоволной при телефонии и линейной аппроксимации зависимости потерь напряженности электрического поля в радиолинии от ее длины. Проиллюстрированы сезонно-годовые и суточные изменения реальной дальности ПВ-радиотелефонии в направлении «судно-берег»*

Судовое оборудование промежуточного диапазона радиоволн (ПВ) (или, в международной терминологии, диапазона средних радиочастот -МФ), является важным средством радиосвязи судов с береговыми радиостанциями или средством радиосвязи между судами на дистанциях, соответствующих дальности действия этого радиооборудования.

Береговые радиостанции, работающие в этом диапазоне радиоволн, дают судам возможность обеспечить оповещение спасательно-координационных центров (СКЦ) о бедствии или иной аварийной ситуации в море, экстренно информировать суда с целью обеспечения их безопасного мореплавания, организовывать медицинскую помощь людям в море. Кроме того, такие радиостанции могут использоваться и в роли посредника для доступа судов в береговые телекоммуникационные сети.

Связь между судами ПВ радиосредствами актуальна не только для их взаимного информирования в целях оказания помощи в море, но и, в ряде случаев, она необходима для их совместной производственной деятельности.

Возможности оповещения СКЦ декларируются, так называемым, Мастер-планом Глобальной Морской Системы Связи при Бедствии и для обеспечения безопасности (ГМССБ) [1]. Этот план ежегодно обновляется Международной морской организацией (ИМО).

В нем указываются сведения о береговых ПВ радиостанциях СКЦ, относящихся к морским районам А2, как это определено пунктом 1.13 Правила 2 Главы IV Конвенции СОЛАС 74 (текст, измененный протоколом 1988 года к ней и с поправками).

Официальный русскоязычный перевод текста этого пункта Конвенции СОЛАС 74 дает следующее определение [2]:

1.13 «Морской район А2 означает район, за исключением морского района А1, в пределах зоны действия в режиме радиотелефонии по крайней мере одной береговой ПВ станции, обеспечивающей постоянную возможность передачи сообщений о бедствии с использованием ЦИВ ...».

В этом тексте аббревиатура ЦИВ означает Цифровой Избирательный Вызов.

Следует отметить не вполне корректный перевод на русский язык исходного англоязычного текста этой Конвенции:

1.13 «Sea area A2 means an area within the radiotelephone coverage of at least one MF coast station in which continuous DSC alerting is available ...».

Серьезной терминологической и смысловой погрешностью русскоязычного перевода текста п.1.13 Конвенции СОЛАС 74 является фраза «береговой ПВ станции, обеспечивающей постоянную возможность передачи сообщений о бедствии с использованием ЦИВ».

Во-первых, в отношении передач ЦИВ (DSC) при бедствии в русскоязычной редакции Регламента Радиосвязи принят термин «сигнал тревоги в случае бедствия», соответствующий английскому термину «DSC Distress alerting» в отличие от термина «сообщение о бедствии», соответствующего термину «Distress Message», который используется в Регламенте Радиосвязи в другом контексте [3].

К термину «DSC alerting» Регламент Радиосвязи относит не только ЦИВ, связанный с бедствием в море, но и ЦИВ, используемого для срочной помощи из-за ситуации в море, которая в своем неблагоприятном развитии может привести к такому бедствию.

Во-вторых, предписанные алгоритмы действия судов при приеме ими ЦИВ бедствия в зоне надежной радиотелефонной связи с береговой ПВ радиостанции СКЦ рассматривают этот ЦИВ, прежде всего, в качестве тревожной сигнализации, оператору этой радиостанции для привлечения его внимания к последующей передаче судном своего телефонного сообщения о бедствии [3, 4].

Тем самым признано, что организационно и технически такой ЦИВ не может адекватно информировать о ситуации на передающем объекте из-за вероятности ложной передачи или из-за непредсказуемых искажений при передаче цифровых кодов через радиоканал.

Исходя из всего вышесказанного, по мнению автора, русскоязычный перевод текста п. 1.13 Конвенции СОЛАС 74 должен быть приближен к подстрочному переводу его англоязычного варианта.

Например, «Морской район А2 означает район, за исключением морского района А1, в пределах зоны действия в режиме радиотелефонии по крайней мере одной береговой ПВ станции, в котором обеспечена постоянная возможность использования тревожной сигнализации оборудованием ЦИВ ...».

Методика расчетного определения границ морских районов А2 ГМССБ [5] соответствует упомянутому англоязычному тексту п. 1.13 Конвенции СОЛАС 74.

Эти границы рассчитываются исходя не из технических возможностей телефонии у береговой ПВ радиостанции СКЦ, имеющей оборудование ЦИВ, а диктуются техническими возможностями радиотелефонного ПВ оборудования судна бедствия и уровнем шумов в точке нахождения ПВ антенн береговой радиостанции [5,6].

Известно, что возможности радиообмена между радиостанциями всегда определяется той из них, которая имеет для этого наихудшие условия.

Безусловно, наихудшую возможность обеспечить требуемое для телефонного ПВ радиобмена отношение сигнал/шум имеет судно, находясь на границе морского района А2 ГМССБ.

В документе [6] приведены следующие критерии определения границ морских районов А2 ГМССБ:

- распространение радиоволны: земной луч в дневное время;
- несущая частота: 2182 кГц;
- класс излучения: J3E (однополосная модуляция несущей частоты речевым сигналом);
- ширина полосы модулирующих частот: 3 кГц;
- эффективная излучаемая мощность судового радиопередатчика: 60 Вт;
- эффективность судовой антенны: 25%;
- среднее радиочастотное отношение сигнал/шум: (С/Ш) 9 дБ;
- запас С/Ш на эффекты замирания в радиоканале: 3 дБ;
- требуемая вероятность качества приема: 95%.

Определяющим фактором качества приема береговой ПВ радиостанцией радиотелефонного сообщения о бедствии является реальное отношение сигнал/шум в месте размещения антенны этой радиостанции.

Реальный уровень сигнала на входе берегового приемника зависит не только от мощности судового радиопередатчика и расстояния до него. На этот уровень, в значительной степени, влияют рефракционные и дифракционные свойства ПВ радиоволны, а также удаленность места установки береговой антенны от береговой черты [7, 8].

На дальность границы морского района А2 ГМССБ существенное влияние оказывают также эффективность береговой приемной ПВ антенны радиоцентра СКЦ и суммарный уровень атмосферных и промышленных шумов в месте ее размещения [7, 8].

Поскольку, уровень атмосферных шумов на одной и той же частоте зависит от сезона года и времени суток границы таких районов рассчитываются исходя из периодов наихудших условий приема сигналов судового радиопередатчика, использующего минимально допустимую мощность [5, 9].

В упомянутом Мастер-плане ГМССБ [1] декларируются расчетные удаленности границ морских районов А2 ГМССБ от мест размещения ПВ антенн береговых радиостанций ГМССБ, которые должны быть подтверждены результатами натурных испытаний [5].

Диапазон удаленности границ существующих морских районов А2 ГМССБ находится в пределах от 62 морских миль (радиостанция Магадан российского СКЦ Петропавловска-на-Камчатке) до 500 морских миль (радиостанция СКЦ JEDDAN Арабских Эмиратов) [1].

Такую почти десятикратно большую дальность действия ПВ радиостанции СКЦ JEDDAN, скорее всего, можно объяснить использованием ею тех возможностей улучшения отношения сигнал/шум, которые обсуждаются в рекомендации [5]. В частности, примыкающая к побережью гористая неиндустриальная местность в районе этой радиостанции, позволяет высоко поднять ее приемную антенну и снизить уровень промышленных помех в месте ее размещения. А отсутствие необходимости для СКЦ JEDDAN принимать сигналы судов из круговой области позволяет на его ПВ радиостанции использовать направленную приемную ПВ антенну или систему таких антенн.

Кроме того, уровень атмосферных шумов в месте размещения приемной ПВ антенны СКЦ JEDDAN является одним из самых низких на нашей планете и слабо зависит от времени года [9].

Следует отметить, что границы морских районов А2 ГМССБ, указанные в упомянутом Мастер-плане [1], ничего не говорят о дистанциях реальной радиосвязи даже с указанными в нем ПВ береговыми радиостанциями СКЦ, поскольку эти границы, как уже отмечалось, определены для наихудших условий радиосвязи.

Практически важной является дальность радиосвязи с ПВ радиостанцией СКЦ при использовании судном реальной мощности своего ПВ радиопередатчика и при шумовой обстановке в районе береговой радиостанции, существующей в момент его использования.

Для радиоволн диапазона от 10 кГц до 30 МГц напряженность электрического поля и потери при распространении соответствующей радиоволны вертикальной поляризации для земного радиолуча над морской поверхностью рекомендовано оценивать с помощью компьютерной программы GRWAVE [7, 8].

Точечные результаты расчета по этой программе представлены на рис.1, на котором линией проведена прямая, аппроксимирующая изображенную зависимость потерь в напряженности поля радиоволны частотой 2182 кГц.

Аппроксимирующая прямая с наклоном 6 дБ/100 км (убывание в два раза на каждые 100 км приращения дальности) показывает достаточно хорошее приближение к расчетным точкам при оценке с ее помощью соответствующих потерь в диапазоне дальности границ существующих морских районов А2 ГМССБ.

При использовании такой линейной аппроксимации можно оценивать изменение отношения С/Ш при неизменной мощности судового радиопередатчика по мере его приближения или удаления от места нахождения антенны ПВ радиостанции СКЦ.

В частности, ухудшение этого отношения с 6 дБ (требуемое качество приема) до 0 (практическое отсутствие приема) соответствует разнице в дистанции 100 км = 54.0 морские мили (nm) и не зависит от мощности судового радиопередатчика.

Практически важной является оценка дальности требуемого качества радиосвязи с ПВ радиостанцией СКЦ при реальной мощности судового ПВ радиопередатчика.

Согласно рекомендациям [7, 8], базирующимся на классической теории распространения радиоволн [10], напряженность электрического поля, создаваемая на одной и той же дистанции от радиопередатчика, пропорциональна корню квадратному от его мощности.

Следовательно, граница зоны одинакового качества приема при увеличении мощности радиопередатчика с 60 Вт до  $P$ (Вт) и при линейной аппроксимации потерь в радиолинии в зависимости от ее длины может быть найдена из следующего очевидного равенства:

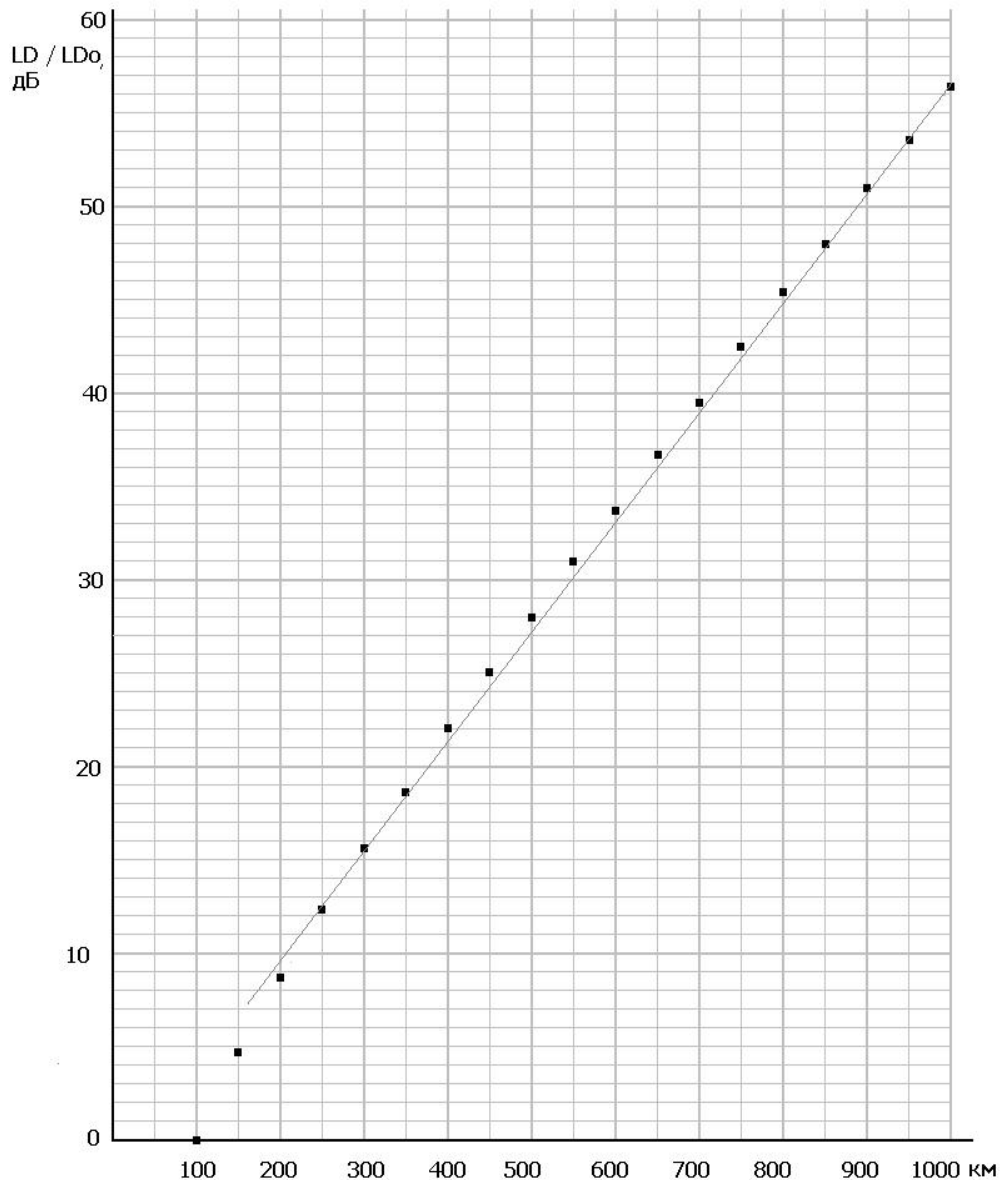
$$1/2(10\lg\left(\frac{P}{60}\right)) = 6(D - Da)/100,$$

где  $D$  – искомая граница в км, а  $Da$  - граница района А2 ГМССБ в км.

Из этого равенства следует:

$$D = Da + 83.3\lg\left(\frac{P}{60}\right) = Da + \Delta Dp, \text{ км.} \quad (1)$$

где  $\Delta Dp = 83.3\lg\left(\frac{P}{60}\right)$ , км. - приращение дальности к  $Da$  (границе морского района А2 ГМССБ) из-за увеличения мощности судового радиопередатчика от 60 Вт до величины  $P$  (Вт).



*Рис. 1. График зависимости потерь в напряженности электрического поля радиосигнала вертикальной поляризации на частоте 2182 кГц при его распространении на дистанции 100-1000 км, рассчитанных по программе GRWAVE для мощности радиопередатчика 1 кВт*

Поскольку дальность границ морских районов А2 ГМССБ указывается в морских милях [1], для вычисления приращения этой дальности при увеличении мощности судового радиопередатчика удобнее использовать следующую формулу:

$$\Delta D_p = 45 \lg\left(\frac{P}{60}\right), \text{ nm.} \quad (2)$$

Как это следует из формул (1) и (2) приращение дальности  $\Delta D_p$  зависит только от изменения мощности радиопередатчика и не зависит от дальности  $D_a$ , определяющей границу морского района А2 ГМССБ.

На рис. 2 приведены результаты расчета такого приращения дальности в зависимости от мощности судового радиопередатчика.

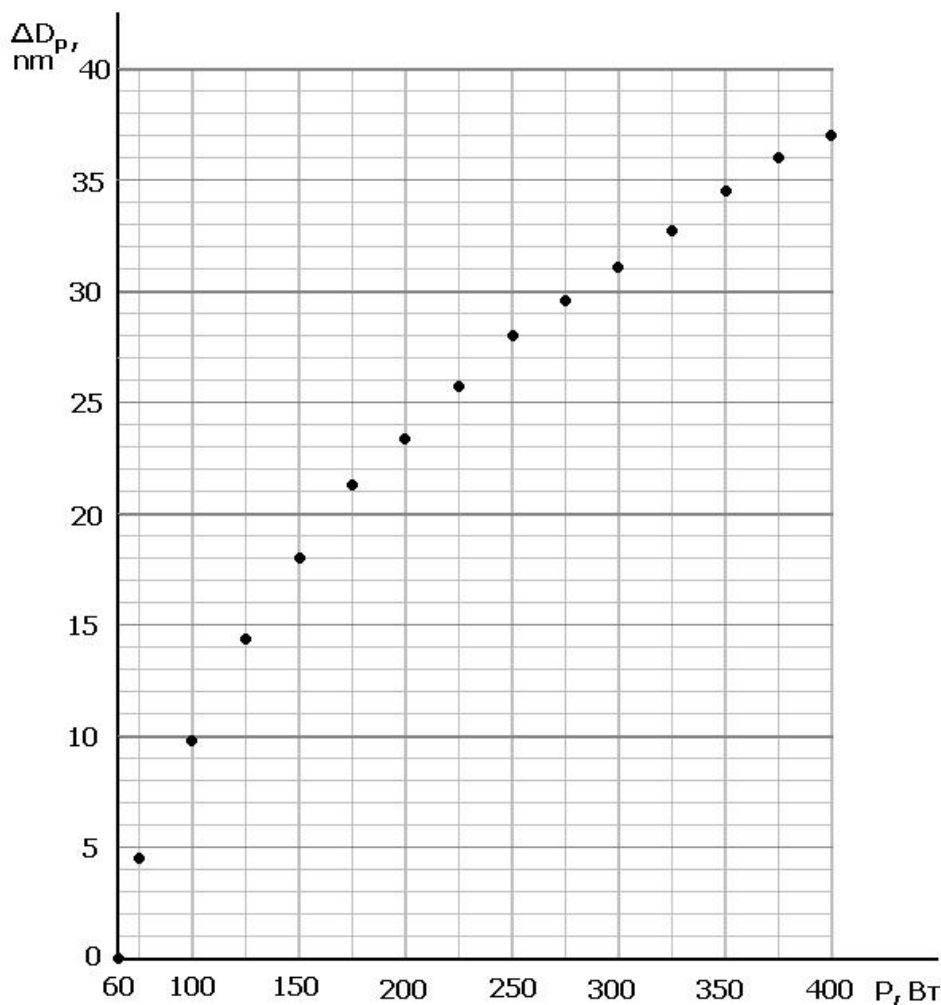


Рис. 2. График зависимости приращения дальности границы уверенной радиотелефонной связи с береговой радиостанцией относительно ее границы морского района А2 ГМССБ от мощности судового радиопередатчика на частоте 2182 кГц

График, приведенный на рис. 2, показывает, что даже при максимально возможной мощности судового ПВ радиопередатчика 400Вт [3] приращение дальности к границе морского района А2 ГМССБ не превышает 40 nm.

Очевидно, что такое приращение существенно только при соизмеримых с ним дальностях границ таких морских районов.

Формула (2) позволяет оценить и изменения дальности реальной ПВ радиосвязи с береговой ПВ радиостанцией СКЦ при улучшении шумовой обстановки в точке размещения ее приемной антенны относительно наихудшей обстановки, для которой и были определены границы ее морского района А2 ГМССБ.

Такая возможность следует из того факта, что при постоянном отношении С/Ш увеличение мощности шумов при фиксированной мощности судового радиопередатчика эквивалентно уменьшению его мощности при неизменном уровне мощности шумов, который, в ПВ диапазоне радиоволн, преимущественно, создается атмосферой Земли [5,9].

На рис.3 приведен типичный пример изменения, так называемого, фактора атмосферных шумов  $Fa$  для ПВ диапазона радиоволн в разные сезоны года и времена суток [5].



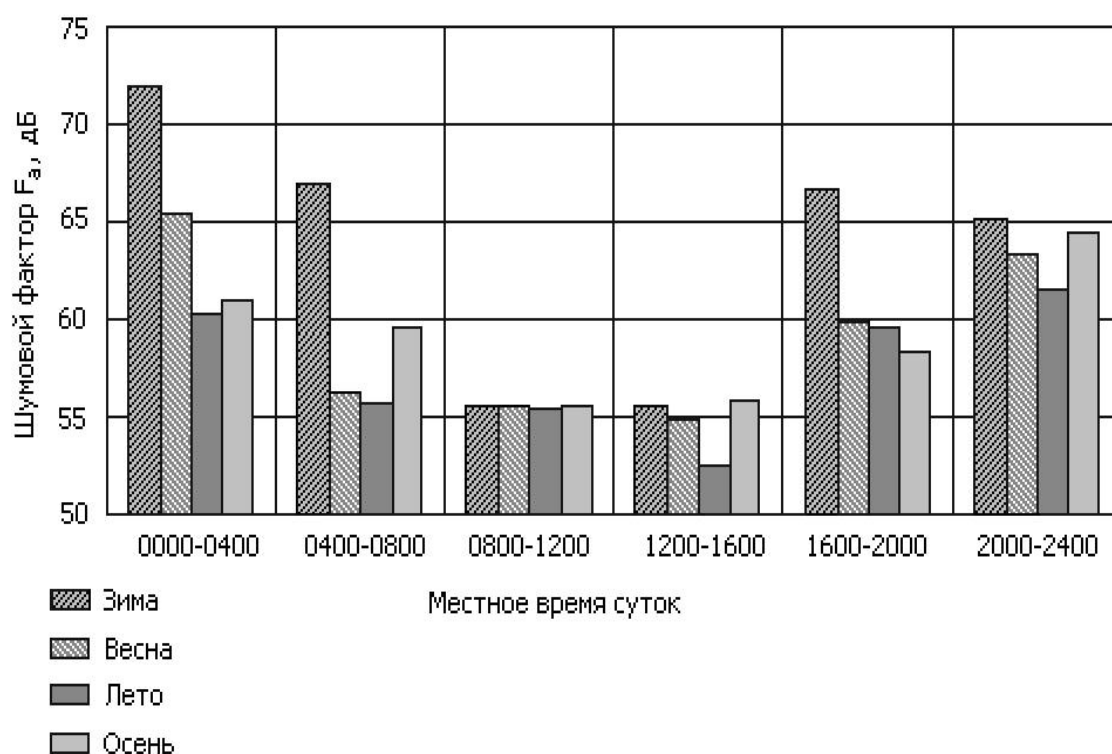


Рис. 3. Диаграммы зависимости атмосферного шумового фактора  $F_a$  в районе Фолклендских островов от сезона года и времени суток на частотах ПВ диапазона радиоволн [5]

Диаграммы, приведенные на рис. 3, показывают, что для района Фолклендских островов наиболее благоприятные и стабильные условия для ПВ радиосвязи существуют в дневное время в промежутке с 8 до 16 часов местного времени, практически независимо от сезона года. Это характерно для любых районов Мирового Океана.

И хотя летом в это время шумовой фон меньше, чем в другое время года, границы морского района А2 определяются исходя из шумового фактора не летнего, а наихудшего из сезонов года [5].

Как это следует из приведенных на рис. 3 диаграмм, в утреннее и вечернее время, особенно зимой, шумовой фактор  $F_a$  значительно повышается, что может ухудшить возможности радиотелефонной связи до тех пор, пока не создались достаточно благоприятные условия для распространения ПВ радиоволны, так называемым, ионосферным лучом [10].

Поэтому часы перед восходом солнца и часы после его заката являются самыми неблагоприятными для ПВ радиосвязи, для которых и необходимо оценивать границы возможного района А2 ГМССБ.

Увеличение уровня шумов в эти периоды, когда ионосферный луч уже отсутствует (утром) или еще отсутствует (вечером) уменьшает дальность такой радиосвязи.

Оценить изменение дальности радиотелефонной ПВ связи в периоды улучшения шумовой обстановки относительно наихудшей можно, используя формулу (2) и переведя уменьшение шумового фактора  $F_a$  в эквивалентное увеличение мощности судового радиопередатчика.

Величина  $Fa$ , как известно [9], является, выраженным в дБ, среднеквадратическим отклонением напряженности электрического поля, создаваемого шумами, а, следовательно, мощность шума в этих же единицах пропорциональна удвоенному значению  $Fa$ .

Из равенства  $1/2(\lg(\frac{P}{60}) + Fa = 6(D - Da)/100$ , следует возможность привести формулу (2) к следующему виду:

$$\Delta D = 45 \lg\left(\frac{P}{60}\right) - 9\Delta Fa = \Delta Dp - \Delta Da, \text{ nm}, \quad (3)$$

где  $\Delta Fa$  – разность между  $Fa$  в расчетный период и  $Fa$  в период, принятый для определения границы морского района А2 ГМССБ, а  $\Delta Da = 9\Delta Fa$  – разница в границах дальности, вызванная этой  $\Delta Fa$ .

Например, если для определения границ этого района, по приведенным выше соображениям, принята величина  $Fa = 67\text{дБ}$ , то, исходя из диаграммы на рис.3, для наиболее благоприятного периода радиосвязи (летом в полуденное время)  $\Delta Fa = -14.5\text{дБ}$ .

По формуле (3) увеличение дальности границы такого морского района, для которой  $\frac{P}{60} = 1$ , зимой произойдет на величину  $\Delta Da = 9 \times 14.5 = 130.5\text{nm}$ , как это показано на рис. 4.

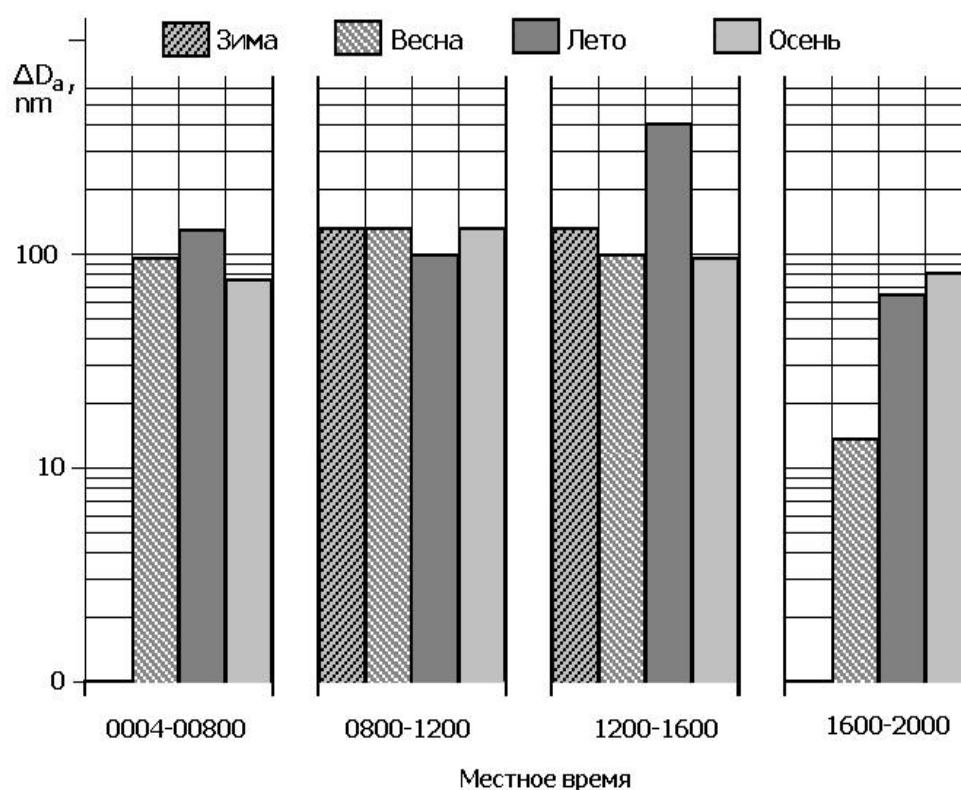


Рис. 4. Диаграммы увеличения дальности границы морского района А2 ГМССБ при снижении уровня атмосферного шума в различные сезоны года и времена суток

Как это видно из приведенных на рис. 4 диаграмм, в подавляющей части дневного времени суток с весны по осень, запас дальности ПВ радиотелефонной связи относительно границы морского района А2 ГМССБ, определенный по уровню атмосферных шумов в зимние утренние и вечерние часы, составляет около 100 nm.

Наибольший дисбаланс в дальности такой радиосвязи, естественно, наблюдается в зимнее дневное время, что иллюстрируют диаграммы рис. 4.

В заключение следует отметить, что помимо ПВ радиостанций СКЦ дальность действия прочих ПВ береговых радиостанций, как правило, неизвестна.

Но, судя, по публикуемым сведениям, о таких радиостанциях [11], они, чаще всего, используют свои антенны совместно с СКЦ.

Например, радиостанция JEDDAH RADIO используется как в качестве радиостанции упомянутого СКЦ JEDDAH, так и в качестве радиостанции, предоставляющей телефонные и телексные услуги судам для связи с абонентами соответствующих береговых сетей.

В подобных случаях, очевидно, можно использовать дальность границ морского района А2, определенных для соответствующего СКЦ, для пересчета реальной дальности доступности его радиостанции для любого вида ПВ радиосвязи судна.

Выводы:

1. Русскоязычный перевод текста п.1.13 Конвенции СОЛАС 74 нуждается в смысловой и терминологической коррекции.

2. Реальная дальность радиотелефонной связи судов с береговыми ПВ радиостанциями существенно зависит от целого ряда факторов, которые необходимо учитывать при ее оценке, не полагаясь на декларируемые границы морских районов А2 или численные оценки этой дальности в учебной или справочной литературе.

3. В диапазоне ПВ радиоволн линейная аппроксимация потерь в радиолинии «судно-берег» достаточно точно отражает зависимость потерь напряженности электрического поля в этой линии от ее дальности.

4. Предложена методика оценки реальной дальности ПВ телефонной радиосвязи в направлении «судно-берег» относительно публикуемых дальностей границ морских районов А2 ГМССБ, использующая такую аппроксимацию потерь.

5. По этой методике выполнены численные оценки изменений дальности этой радиосвязи при использовании различных мощностей судовых ПВ радиотелефонных передатчиков для различных сезонов года и периодов суток.

6. Эти численные оценки показали весьма существенное увеличение реальной дальности ПВ телефонной радиосвязи в указанном направлении относительно публикуемых дальностей границ морских районов А2 ГМССБ.

7. Публикуемые в подавляющем большинстве учебной литературы оценки дальности действия судовых ПВ радиосредств ГМССБ (чаще всего это 100-150 nm), которые приводятся безотносительно условий такой оценки, являются, в общем случае, некорректными и способными ввести в заблуждение.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Master plan of shore-based facilities for the Global Maritime Distress and Safety System (GMDSS MASTER PLAN)// GMDSS.1/Circ.21. London: IMO, 2017. P.138.

Режим доступа URL: <https://www.marsat.ru/files/> (дата обращения 20.06.2018).

2. СОЛАС-74 = SOLAS 1974 (на рус. и англ. яз.).Спб.: АО ЦНИИМФ, 2015. 928с

3. Регламент Радиосвязи. В 4-х т. Т. 1. Статьи. Женева: МСЭ, 2016. 430 с.

4. Руководство МАМПС. В 3-х т. Т. 3. Подвижные средства. Лондон=Монреаль: ИМО=ИКАО, 2016. 310 с.

5. Рек. МСЭ-R М.1467. Предварительное определение границ действия для морской зоны А2 и NAVTEX и защита канала оповещения о бедствиях Глобальной морской системы для случаев бедствия и обеспечения безопасности (ГМСББ) в районе А2. Женева: МСЭ, 2001-2006. 16 с.

6. IMO Res. A.801(19). Provision of radio services for the Global Maritime Distress and Safety System (GMDSS). London: IMO, 1995. P.15.

7. Рек. МСЭ-R Р.368. Кривые распространения земной волны для частот между 10 кГц и 30 МГц. Женева: МСЭ, 1951-2007. 54 с.

8. Рек. МСЭ-R Р.526. Распространение радиоволн за счет дифракции. Женева: МСЭ, 1978-2007. 37 с.

9. Рек. МСЭ-R Р.372-13. Радишум. Женева: МСЭ, 1951-2016. 77 с.

10. Propagation of Radiowaves (edition of L.M. Barclay). 482P. Режим доступа URL: <https://ru.scribd.com/doc/75916665/propagation-of-radio-wave> (дата обращения 20.06.2018).

11. Maritime mobile Access and Retrieval System. Режим доступа URL: [https://www.itu.int/online/mms/mars/coast/coast\\_search.sh](https://www.itu.int/online/mms/mars/coast/coast_search.sh) (дата обращения 20.06.2018).

#### **THE BOUNDARIES OF SEA AREAS A2 AND REAL RANGE OF MF RADIOCOMMUNICATION IN THE DIRECTION OF THE "SHIP-TO-SHORE"**

Stepanenko Dmitrii Petrovich, Associate Professor, Candidate of Engineering Sciences

Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,  
e-mail: stepanenko49@yandex.ru

*It is noted incorrect Russian translation of the text of claim 1.13 of SOLAS 74 to determine the boundaries of sea areas A2. A translation option corresponding to the terminology of the Radio Regulations and the organizational nature of these areas is proposed. The technique and results of the real range evaluation of the ship radio communication with the coastal radio station of the surface MF radio wave with linear approximation of the dependence of the losses of electric field strength in the radio line on its length are presented. Seasonal-annual and daily changes of the real range of MF radiotelephony in the direction of "ship-shore" are illustrated.*

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СРЕДСТВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ПРОКЛАДКИ (САРП) ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ РЫБОПРОМЫСЛОВЫХ СУДОВ НА ПРОМЫСЛЕ В ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ, СВЯЗАННОЙ С НАПАДЕНИЕМ ПИРАТОВ

<sup>1</sup>Тимофеев Владимир Константинович, д-р воен. наук, профессор

<sup>1</sup>Сухорук Александр Иванович, ст. преподаватель

<sup>2</sup>Сергиенко Илья Михайлович, аспирант

<sup>1</sup> Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ», Калининград, Россия, e-mail: kaf\_bm@bga.gazinter.net; srts@bga.gazinter.net

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет», Калининград, Россия, e-mail: kaf\_bm@bga.gazinter.net

*Районы промысла рыбопромысловых судов нередко совпадают с районами потенциально опасными от нападений пиратов. Во время выборки/постановки рыболовных снастей практически весь экипаж занят производственными обязанностями. Наблюдение за надводной обстановкой ведется не на должном уровне, в результате судно, экипаж и выловленный улов могут быть захвачены пиратами. Для повышения безопасности судов на промысле можно использовать САРП. В статье предлагается методика его переоборудования и использования для этой цели*

На рисунках 1а,б приведены карты промысловых районов северо-западной части Индийского океана и района высокого риска от пиратских атак. Границы этого района определены циркуляром Международного комитета безопасности (МСС) Международной морской организацией .1/CIRC.1339 от 14 сентября 2011 г. Наиболее эффективные методы защиты от пиратства, базирующегося на территории Сомали [1].

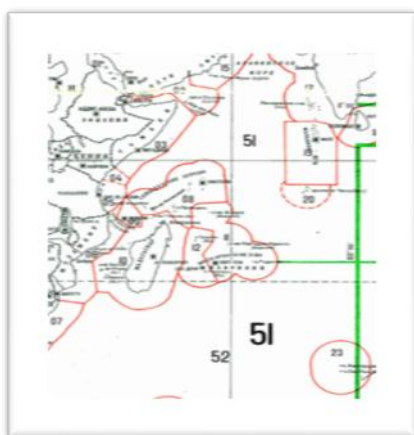


Рис. 1,а. Карта промысловых районов Северо-западной части Индийского океана

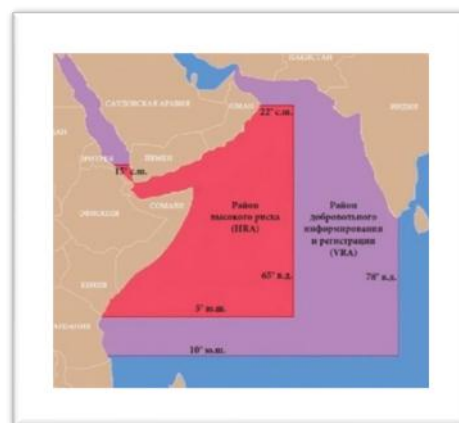


Рис. 1,б. Границы района повышенного риска в Индийском океане

Из представленных на рисунках 1а,б картах видно, что промысловые районы вдоль побережья Сомали, к северу от Мадагаскара, район Сейшельских островов и др.

расположены в районе высокого риска и соседнего с ним района где суда судам рекомендуется зарегистрироваться в центрах оказания содействия военно-морских сил.

Благодаря принимаемым мерам по противодействию пиратству, количество нападений на суда уменьшается, но опасность попасть в заложники к пиратам сохраняется, об этом говорят статистические данные Международного морского бюро (ИМВ) приведенные на рисунке 2. По вертикальной оси показано количество нападений на суда, по горизонтальной - годы с 2005 г. по 2017 г. Из рисунка видно, что количество нападений снизилось более чем в 2 раза. Эта ситуация дала повод некоторым капитанам/судовладельцам игнорировать рекомендации НЭМ-4 и Международного кодекса охраны судов и портовых средств (ОСПС) в части выполнения положений относительно плана охраны судна по различным уровням угроз. Однако проведенный анализ данных по нападению показывает, что количество захваченных судов пиратами остаются на прежнем уровне. Если нападению в северо-западной части Индийского океана может подвергнуться 1 судно из 500, то быть захваченным может оказаться каждое 2-е из атакованных. Пираты стали «работать более эффективно»[2].

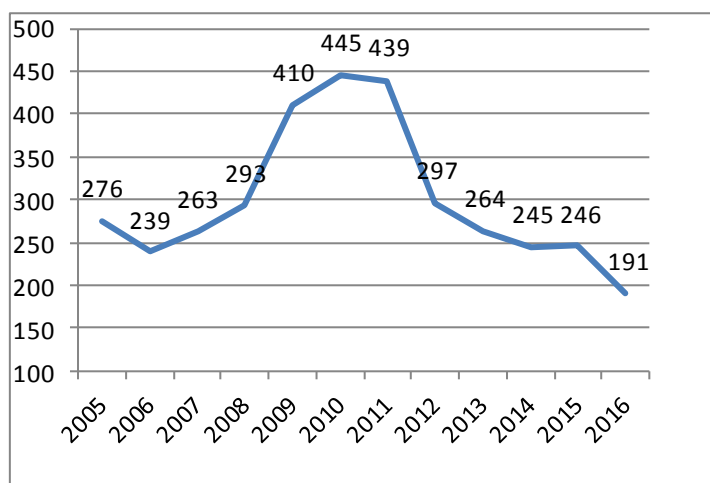


Рис. 2. Данные по пиратским нападениям ММВ по годам

Особенно уязвимы рыбопромысловые суда средних размеров, с высотой надводного борта до 6 метров, и скоростью ниже 20 узлов. В период выборки или постановки рыболовных снастей, эти суда сбавляют ход, ограничены в возможности маневра (рисунок 3а,б). На верхней палубе, особенно в районе кормы невозможно создать барьер из режущей проволоки, он будет мешать производственной деятельности. Так как на средних рыболовных судах экипаж малочислен, и он практически весь занят работой по выборке или постановки рыболовных снастей, наблюдение за окружающей надводной обстановкой снижается и пираты появляются «неожиданно».

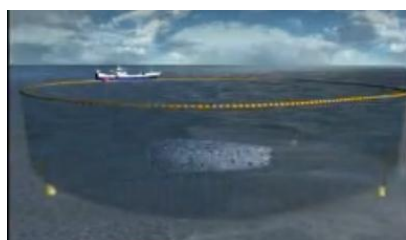


Рис.3а. Кошельковый способ лова тунца, рыбный косяк в центре.



Рис. 3б. Положение снастей на поверхности перед началом «затягивания» кошелька

Анализ случаев захвата судов позволяет спрогнозировать следующие варианты развития событий [3]:

1. Пиратская атака отбита или силами и средствами самообороны судна или силами частной морской охранной компанией (ЧМОК), пираты ушли от судна. Все люди целы, судно продолжает выполнять свои задачи.
2. Пираты высадились на судно и захватили членов экипажа в заложники. Военно-морские силы (ВМС) не могут предпринять штурм судна, с целью его освобождения, так как могут пострадать заложники. Судно следует к побережью Сомали и находится там до получения выкупа (до 1 года).
3. При атаке пиратов, капитан судна, оценив обстановку и видя что захват судна неизбежен, даёт команду – всем укрыться в убежище (цитадели). Подает радиодонесение, что в заложников никого из экипажа нет. В этом случае ВМС посылают вертолет со штурмовой группой, при подлете открывается огонь на поражение. Пираты спешно покидают судно или сдаются, судно освобождается, все люди целы.

Создать эффективную систему самообороны рыбопромыслового судна не представляется возможным, так как на промысле, создать барьеры из режущей проволоки не возможно. Брать с собой на промысел представителей ЧМОК, дорого и не безопасно. На длительный срок рейса необходимо обеспечить сохранность оружия и боеприпасов к нему, оружие может попасть в руки других лиц.

Реалистичным выглядит вариант, при котором на судне создано убежище, в котором можно переждать до подхода ВМС. Опыт использования цитаделей говорит, что пираты никогда не пытались взорвать его, если только экипаж не проявлял агрессивных устремлений. Для пиратов главное получить выкуп, а не убивать членов экипажа [4].

Успеть спрятаться в убежище, не оказаться в заложниках – вот главные задачи экипажа судна при ведении промысла в потенциально опасных районах мирового океана. Тактика пиратов сводится к следующему [5]:

1. Патрулировать районы промысла на рыболовном судне – матке, в трюмах или на палубе которого находятся замаскированные быстроходные лодки, оборудованные штурмовыми лестницами, запасом оружия, средствами связи и др.
2. Маскируясь под рыбаков, они выбирают жертву нападения и в подходящий момент спускают на воду лодки и на них, на большой скорости (до 30 узлов) атакуют выбранное судно.

У капитана остаётся мало времени на принятие решения, а у экипажа укрыться в убежище. Высота мостика тунцеловного судна ( $e$ ) составляет от 5 до 7 метров над водой. На этой высоте дальность визуального обнаружения ( $D_n$ ) лодки с высотой борта ( $h$ ) до 0,75 метра составит [6]:

$$D_n = 2,08\sqrt{e} + 2,08\sqrt{h} = 7,3 \text{ мили} \quad (1)$$

где:

$D_n$  – географическая дальность видимости предмета (мили);

$e$  – высота глаза наблюдателя над уровнем моря (метры);

$h$  – высота наблюдаемого предмета над уровнем моря (метры).

При скорости в 24 узла, пиратская лодка пройдет расстояние 7,3 мили за 18,25 минуты. Время на необходимые действия у экипажа в 25 человек очень мало. Учитывая человеческий фактор, дальность обнаружения атакующей лодки может быть еще меньше.

Если использовать САРП и его составную часть радиолокацию (РЛС), то при высоте антенны над уровнем моря ( $h_a$ ) в 17 метров, географическая дальность радиолокационного горизонта ( $D_p$ ) составит [6]:

$$D_p = 2,39 \sqrt{h_a} = 9,9 \text{ мили} \quad (2)$$

где:

$D_p$  - географическая дальность радиолокационного горизонта (мили);

$h_a$  - высоте антенны над уровнем моря (метры).

При скорости 24 узла расстояние в 10 миль будет пройдено за 25 минут. Если установить в САРПе функцию, что при обнаружении быстроходной цели и сближении ее с рыбопромысловым судном, автоматически включиться сигнал тревоги, транслируемый по судовой трансляции и одновременно радиостанция передаст установленный заранее сигнал ВМС с обязательным сообщением, что все в убежище и заложников нет, помощь придет быстрее [7].

На рисунке 4 представлена функциональная схема устройства системы оповещения при приближении пиратоопасных целей (СОПП) к рыбопромысловому судну.

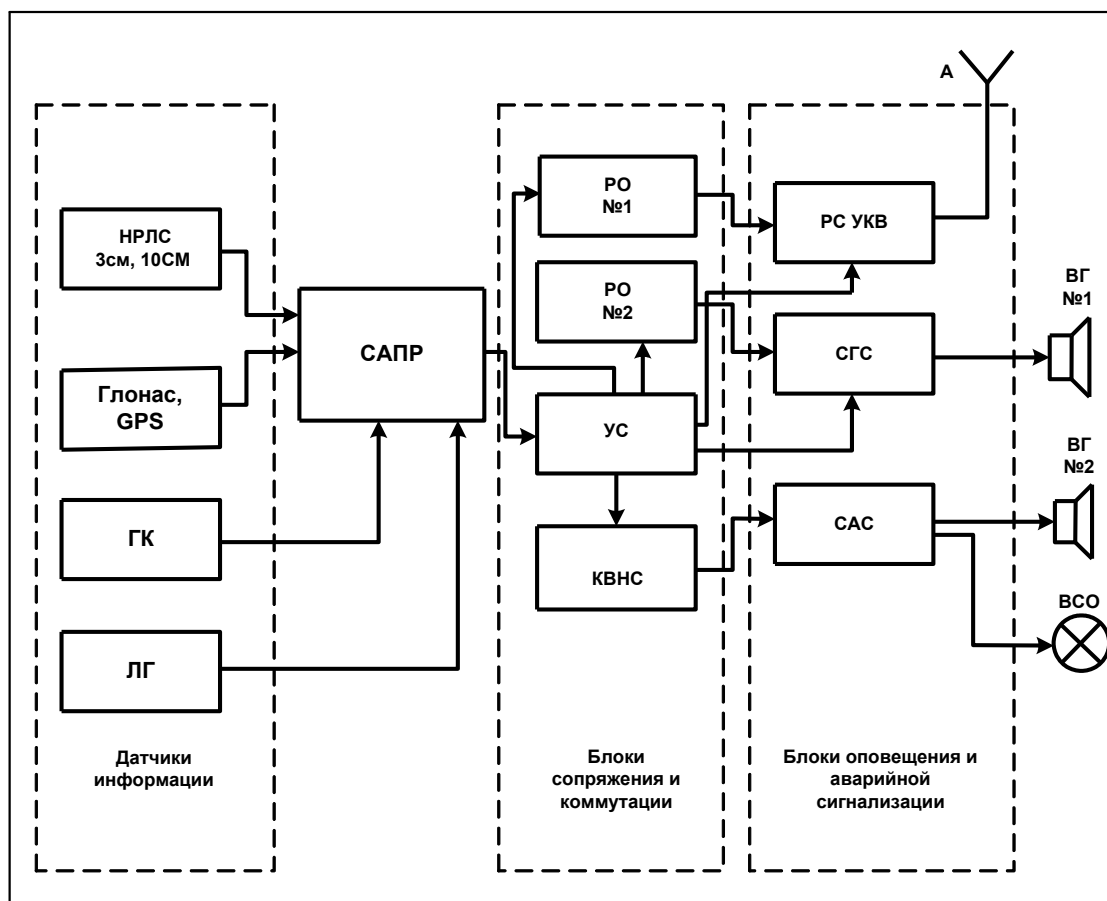


Рис. 4. Функциональная схема системы оповещения о приближении пиратоопасных целей к рыбопромысловому судну (СОПП)

Составными частями СОПП являются:

1. НРЛС - Навигационная радиолокационная станция (3 см или 10 см в зависимости от судна).
2. САПР - средство автоматической радиолокационной прокладки.



3. ГЛОНАС, GPS - приборы определения координат судна.
4. ГК – Гирокомпас, прибор определения курса судна.
5. ЛГ – Лаг, прибор определения скорости судна.
6. РО №1 - речевой оповещатель предназначенный для записи и передачи сообщения о нападении пиратов.
7. РО №2 - речевой оповещатель предназначенный об оповещении экипажа о необходимости немедленно прекратить все работы и укрыться в убежище.
8. КВНС - коммутатор включения наружной сигнализации.
9. УС - устройство сопряжения, позволяющее передать одновременно сигнал поступающий с САПР об угрозе нападения пиратов на РО №1, РО №2, СГС и КВНС.
10. РС УКВ - УКВ радиостанция несущая вахту на 16 канале.
11. СГС - судовая громкоговорящая связь.
12. САС - судовая аварийная связь.
13. ВГ №1 - внешний громкоговоритель, подключённый к СГС.
14. ВГ №2 - внешний громкоговоритель, подключённый к САС сирена.
15. ВСО - внешний световой оповещатель, подключённый к САС.
16. А - антенна судовой УКВ радиостанции.

Описание работы предлагаемой системы предупреждения о нападении пиратов:

1. Сигналы от НРЛС, гирокомпаса и лага поступают в средство автоматической радиолокационной прокладки. Вахтенный помощник капитана устанавливает в САПР безопасный радиус обнаружения быстро движущихся в направлении судна целей.

2. При захвате САПР быстродвижущуюся цель в направлении судна система выдаёт сигнал тревоги на УС которое, в свою очередь подключает РО №1, РС УКВ, РО №2 к судовой громкоговорящей сети и к судовой аварийной сигнализации.

3. В речевой оповещатель №1 заранее записывается сообщения о нападении пиратов и о том что весь экипаж спрятался в цитадель, которое на 16 канале передаётся в эфир с сообщением координат места судна, которые автоматически поступают от ГЛОНАС/GPS.

4. В речевой оповещатель №2, подключённый к судовой СГС, записывается сообщение о немедленном прекращении всех работ и эвакуации в убежище, последний убывает капитан, обеспечивая закрытие всех дверей и люков, ведущие в убежище.

5. На верхней палубе автоматически включается сигнал сирены и проблесковые световые сигналы. Эти меры необходимы для быстрого нахождения захваченного судна и психологического воздействия на пиратов.

Предлагаемая система оповещения о предупреждении нападения пиратов на рыболовные суда на промысле повысит безопасного самого судна и экипажа в чрезвычайной ситуации при захвате судна пиратами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Циркуляр MSC.1/CIRC.1339 от 14 сентября 2011 г. Наиболее эффективные методы защиты от пиратства, базирующегося на территории Сомали.
2. Тимофеев В.К., Хирамагомедов М.М., Учёт пиратской активности. Вероятность захвата судна пиратами. Журнал: Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций, № 2. – 2018 г. с.14-20.
3. Бондарев В.А., Тимофеев В.К., Хирамагомедов М.М.. Анализ статистических данных Международного Морского Бюро Международной Торговой Палаты по чрезвычайным ситуациям с судами при захвате их пиратами в период 2005-2015гг.

Сборник: IV Международный Балтийский Морской Форум материалы Международного Морского Форума, 2016. – С. 16-19.

4. Тимофеев В.К. Морской терроризм и пиратство: учеб. пособие / В.К. Тимофеев. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2012. – 204с.

5. Методические рекомендации капитану торгового судна при осуществлении плавания в пиратоопасном районе. – М: Главный штаб ВМФ РФ, 2010. – 21 с.

6. Мореходные таблицы (МТ-2000). – СПб: Главное управление навигации и океанографии МО РФ, 2000. – 578 с.

7. Пестонюк Р.В., Тимофеев В.К., Хирамагомедов М.М.. Элементы оценки риска для предотвращения чрезвычайной ситуации при захвате судна пиратами. Сборник: IV Международный Балтийский Морской Форум материалы Международного Морского Форума, 2016. – С. 112-115.

### **USE OF AUTOMATIC RADAR PLOTTING AIDS (ARPA) TO IMPROVE THE SAFETY OF FISHING VESSELS IN THE FISHERY IN AN EMERGENCY INVOLVING PIRATE ATTACK**

<sup>1</sup> Timofeev Vladimir Konstantinovich, Doctor of Military Sciences, Professor

<sup>1</sup> Sukhoruk Alexandr Ivanovich, Senior Lecturer

<sup>2</sup> Sergienko Ilya Mikhailovich, graduate student

<sup>1</sup> Baltic fishing fleet state academy FSBEI HE "KSTU", Kaliningrad, Russia,  
e-mail: kaf\_bm@bga.gazinter.net; e-mail: srts@bga.gazinter.net

<sup>2</sup> Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,  
e-mail: kaf\_bm@bga.gazinter.net

*Fishing areas of fishing vessels often coincide with areas potentially dangerous of pirate attacks. During the selection / installation of fishing gear, almost the entire crew is engaged in production duties. Surveillance of the above-water situation is not at the proper level, as a result, the vessel, crew and caught catch can be captured by pirates. To improve the safety of vessels in the fishery, ARPA can be used. The article suggests a technique for its re-equipment and use for this purpose.*

## О НЕОБХОДИМОСТИ УЧЁТА ПОГОДНЫХ УСЛОВИЙ В СУДОВЫХ ПРОГРАММАХ РАСЧЁТА ОСТОЙЧИВОСТИ И ОБЩЕЙ ПРОДОЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ

Якута Ирина Владимировна, канд. техн. наук, доцент  
Гуральник Борис Самуилович, канд. техн. наук, доцент  
Филимонов Илья Валерьевич, курсант

Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО  
«КГТУ», Калининград, Россия, e-mail: kaf.bm @bga.gazinter.net

*Даны рекомендации о необходимости обоснования учёта разницы между фактической погодой и параметрами погодных условий, установленных в судовых компьютерных программах. Использование полученных результатов проведенного исследования позволяет выработать рекомендации для судоводителей касательно грамотной эксплуатации судовых программ и учёта фактических погодных условий при расчёте параметров остойчивости и общей продольной прочности судна*

Остойчивость и общая продольная прочность – два важнейших свойства, определяющих состояние судна на переходе и его способность к такому переходу при размещении на борту определённого количества перевозимого груза. Представляет интерес статистика морских аварий, связанных с потерей остойчивости и нарушением общей продольной прочности. Согласно [1] в 2005 году в мире было зарегистрировано 1150 аварийных случаев на море, в 2006-м – 1283, в 2007-м – 1609, в 2008-м – 1623 и на сентябрь 2009-го – 988. В таблице 1 представлена информация о причинах морских аварий и их количестве в этот период.

Таблица 1

**Типы и количество морских аварий по данным [1]**

Типы аварий	2005	2006	2007	2008	2009
Нарушение прочноси	438	394	534	521	367
Столкновения с судами	237	276	336	375	191
Посадка на мель	235	308	393	372	199
Столкновения с другими объектами (кроме судов)	133	144	165	188	92
Пожары / взрывы	95	100	117	119	84
Потеря остойчивости	4	51	54	38	32
Аварии в результате смещения груза и т.п.	5	9	4	2	9
Пропавшие суда	1	0	2	2	1
Повреждения или потеря судна в результате военных или других боевых действий	2	1	4	6	2
Общее количество аварий	1150	1283	1609	1623	988

Как видно из таблицы 1, причины, связанные с нарушением прочности, т.е. с нанесением повреждений корпусу судна вследствие внешнего воздействия (погодных условий), занимают ведущее место в статистике, что является весьма неутешительным фактом, особенно при обращении внимания на сами цифры таких аварийных случаев. Количество аварий, связанных с нарушением прочности в период с 2006 по 2009 г. в среднем ежегодно в 10 раз превышало количество аварийных случаев, связанных с потерей остойчивости, в основном также вызванных влиянием ненастной погоды, а в 2005 году на 4 случая потери остойчивости пришлось 438 случая нарушения прочности – и это разница более, чем в 100 раз [1].

В число задач судоводителя входит расчёт остойчивости и общей продольной прочности судна, а также ведение постоянного контроля за основными параметрами этих свойств в процессе перехода. Расчёт остойчивости и общей продольной прочности всегда был весьма трудоёмким и кропотливым процессом и соответственно отнимал у судоводителя много времени. До внедрения в работу судоводителя компьютерных технологий такие расчёты проводились им вручную. За счёт очень большого числа элементов и параметров, которые необходимо было учесть при проведении таких расчётов, нередко допускались ошибки. Однако с внедрением компьютерных технологий ситуация в корне изменилась.

В настоящее время существует большое количество различных судовых компьютерных программ, предназначенных для расчётов остойчивости и общей продольной прочности судна, а также для составления грузового плана и проведения анализа загрузки судна. Такие программы также именуется «грузовыми».

Несмотря на явное преимущество такого рода судовых компьютерных программ перед ручным счётом, а именно быстрота и качество самих расчётов (разумеется, при верном вводе исходных данных в программу), они не могут быть предметом абсолютного доверия к себе со стороны тех, кто их использует, а именно судоводителей. Существуют обстоятельства, при которых судоводителю объективно нельзя полагаться на достоверность выполнения расчётов судовыми программами. В качестве примера взята программа «Loadstar», широко распространённая на судах разного типа, в частности, на контейнеровозах, в число которых входит судно «Nordic Stani», на примере которого была рассмотрена и проанализирована исследуемая тема.

В статье рассматриваются нормированные значения параметров, характеризующих погодные условия, в которых может оказаться судно, такие как скорость и давление ветра, а также высота волны, значения которых уже занесены в программу и автоматически учитываются ею при выполнении расчётов. Именно эти, заложенные внутри программы значения соответствующих параметров, могут быть причиной возникновения таких ситуаций, в которых судоводитель может неверно интерпретировать информацию, полученную в результате расчётов. Ведь фактические погодные условия могут значительно отличаться от тех, характеристики которых заложены в программу, а что более важно, они могут превышать установленные в программе значения, что является наиболее опасным фактором и может представлять серьёзную угрозу для судна, груза и экипажа.

Несмотря на то, что рассматриваемая тема исследуется на примере одной конкретной судовой программы, её суть распространяется и на все подобные сертифицированные компьютерные программы расчёта остойчивости и общей продольной прочности судна, т. к. перед внедрением какой-либо из таких программ в эксплуатацию на соответствующем судне, она должна быть одобрена классификационным обществом этого судна, а значит соответствовать международным и национальным требованиям, предъявляемым к ней.

Что касается устойчивости, то эти требования изложены в Резолюции ИМО А. 749 (18) [2], а требования по общей продольной прочности устанавливаются самим классификационным обществом. Для контейнеровоза «Nordic Stani», который используется в качестве примера, такие требования устанавливаются классификационным обществом Бюро Веритас.

Актуальность проблемы подчёркивает и тот факт, что в настоящее время погода действительно становится всё менее предсказуемой, что особенно характерно для выбранного на рассмотрение участка Мирового океана – акватории Северной Атлантики от пролива Пентленд-Фёрт до Исландии. Кроме того, неутешительные данные вытекают и из анализа статистики аварийности морских судов, связанных с потерей устойчивости и нарушениям норм общей продольной прочности.

В соответствии с [3] в таблице 2 приведена статистика основных параметров, характеризующих погодные условия в Северной Атлантике.

Таблица 2

**Статистические характеристики штормов разной интенсивности в Северной Атлантике по данным [3]**

Параметр	h ≥ 5 м			h ≥ 7 м			h ≥ 9 м		
	Сред-нее	СКО	Max	Средне-е	СКО	Max	Средне-е	СКО	Max
Наибольшая значительная высота, м	7,03	2,34	22,6	9,3	2,41	22,6	11,5	2,3	22,6
Условная площадь шторма в зависимости от наибольшей, км <sup>2</sup>	596,9	1089,9	10116,8	409,6	654,4	6113,9	320,6	420	4094,8
Время жизни шторма, ч	26,4	28,5	243	26,7	24,6	150	26,1	20,4	138
Время увеличения (роста), ч	13,5	15,09	174	13,6	12,9	93	13,5	12,9	93
Максимальная площадь на траектории, км <sup>2</sup>	724,7	1361,8	13593,9	496,2	804,4	8017,6	387,1	517,0	4654,1
Время усиления (роста) площади, ч	14,61	43,83	174	14,76	14,4	99	14,76	14,4	99
Длина траектории, км	905,9	4700,38	31400,9	926,7	1052,4	5925	926,3	887,8	5118
Среднее направление траектории	219,5	82,63	360	223,0	80,4	360	233,6	73,0	360

Длина траектории роста, км	389,9	612,2	6098	426	585,4	4123	406,9	456,4	3251
Среднее направление траектории усиления шторма	209,1	71,17	360	215,4	72,8	360	224,8	71,2	359
Длина траектории ослабления шторма, км	451,0	673,5	8117	500,1	636,0	4344	519,4	567,9	3844
Среднее направление траектории ослабления шторма	210,7	77,94	360	217,2	77,5	360	227,2	73,8	360
Общее число штормов	4682			2367			1032		

Представленная выше таблица представляет собой результат обработки статистической информации за 40-летний период посредством реанализа, т.е. процесса восстановления пространственно-временных полей метеорологических характеристик, по данным наблюдений с использованием модели динамики атмосферы.

Проанализировав данную таблицу можно сделать следующие выводы:

- с увеличением интенсивности происходит увеличение высоты волны, а наибольшее её значение за весь период наблюдений составило 22,6 м;
- условная площадь шторма, а также максимальная площадь траектории по мере увеличения интенсивности, уменьшаются, ровно, как и длины самих траекторий роста и ослабления;
- с увеличением интенсивности время жизни шторма уменьшается;
- общее количество штормов по мере увеличения интенсивности снижается.

Все выше сказанное показывает необходимость учёта разницы между фактической погодой и параметрами погодных условий, установленных в судовой программе и выработке рекомендаций для судоводителей при их столкновениях с такими ситуациями на примере исследования поведения контейнеровоза «Nordic Stani» в экстремальных погодных условиях, характеристики которых превышают установленные в программе.

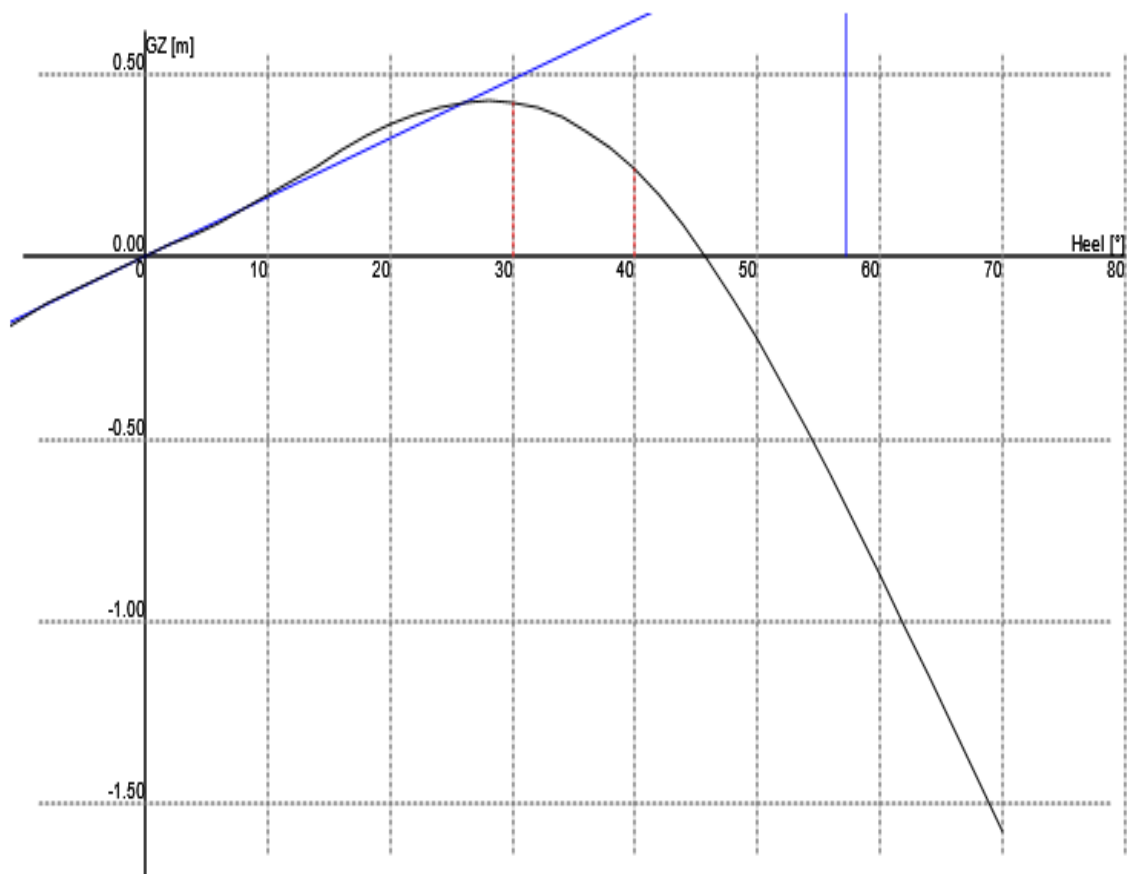
«Loadstar» – это судовая компьютерная программа расчёта остойчивости и общей продольной прочности судна, а также для составления грузового плана и проведения анализа загрузки судна. Это сертифицированная компьютерная программа, а это значит, что расчёт остойчивости судна с её помощью производится полностью в соответствии с [2] и Правилами Бюро Веритас. В этом кодексе установлены требования по остойчивости, предъявляемые как ко всем судам, независимо от их типа, так и применительно к каждому типу. Помимо этого, любая судовая компьютерная программа, а также все судовые компьютеры (в том числе и тот, на котором

установлена такая программа) должны также соответствовать определённым требованиям Международной морской организации, изложенным в [4] и [5].

Так, при определении плеча кренящего момента от воздействия постоянного ветра для последующей оценки остойчивости по критерию погоды, в соответствии с Резолюцией А. 749 (18) [2] давление ветра принимается равным 504 Па (скорость ветра – 26 м/с – 10 баллов по шкале Бофорта). Высота волны 9-12 м соответствует 8 баллам по официальной шкале Всемирной морской организации, обозначаемое также как «very high», т.е. «очень сильное волнение», что соответствует диапазону высот 30-45 футов или 9-14 метров. Это означает, что все суда, построенные в соответствии с требованиями, указанными выше, при попадании в погодные условия, чьи характеристики превышают указанные выше, рискуют потерять остойчивость и прочность, независимо от состояния загруженности судна и других факторов, поскольку уже конструктивно они не приспособлены к плаванию в таких условиях, и разобранная ранее статистика аварийности подтверждает данный факт, поскольку большое количество аварийных случаев на море как раз связано с нарушениями норм остойчивости и общей продольной прочности при попадании в условия ненастной погоды. Конечно, какой-то запас остойчивости и прочности с учётом погодных условий, превышающих нормативные, вполне может присутствовать у судов при их конструировании, но необходимо понимать, что судоводитель не обладает такой информацией, находясь на судне, поскольку данное знание является вопросом крайне щекотливым в плане своей надёжности и достоверности, так как у каждого судна такой запас будет совершенно разным, а у многих он и вовсе может отсутствовать, а истинное влияние экстремальных погодных условий на остойчивость и общую продольную прочность судна представляет собой результат учёта многочисленных факторов, не все из которых учесть зачастую представляется возможным.

Сертифицированная судовая программа в своём алгоритме берёт в расчёт именно это значение, а значит, оценка остойчивости по критерию погоды будет справедлива для погодных условий, при которых сила ветра не будет превышать 10 баллов по шкале Бофорта. Для данного случая загрузки судна диаграмма статической остойчивости, построенная посредством судовой программы, представлена на рисунке 1. Что касается общей продольной прочности, то результаты по определению изгибающих моментов и перерезывающих сил, и проверка на соответствие их требованиям классификационного общества, согласно которым действительные значения не должны превышать предельно допустимые, представлены на рисунке 2.

При использовании программы «Loadstar» для расчётов остойчивости и общей продольной прочности, оператору собственноручно необходимо составить грузовой план и проверить таблицу весовой нагрузки на предмет актуальности.



#### Intact Stability Details

A.749(18)	Area 0-30 [m-rad]	Area 30-40 [m-rad]	Area 0-40 [m-rad]	GZ(30+) [m]	GZ Max at [deg]
Required	0.055	0.030	0.090	0.200	25.000
Actual	0.132	0.062	0.194	0.422	27.905

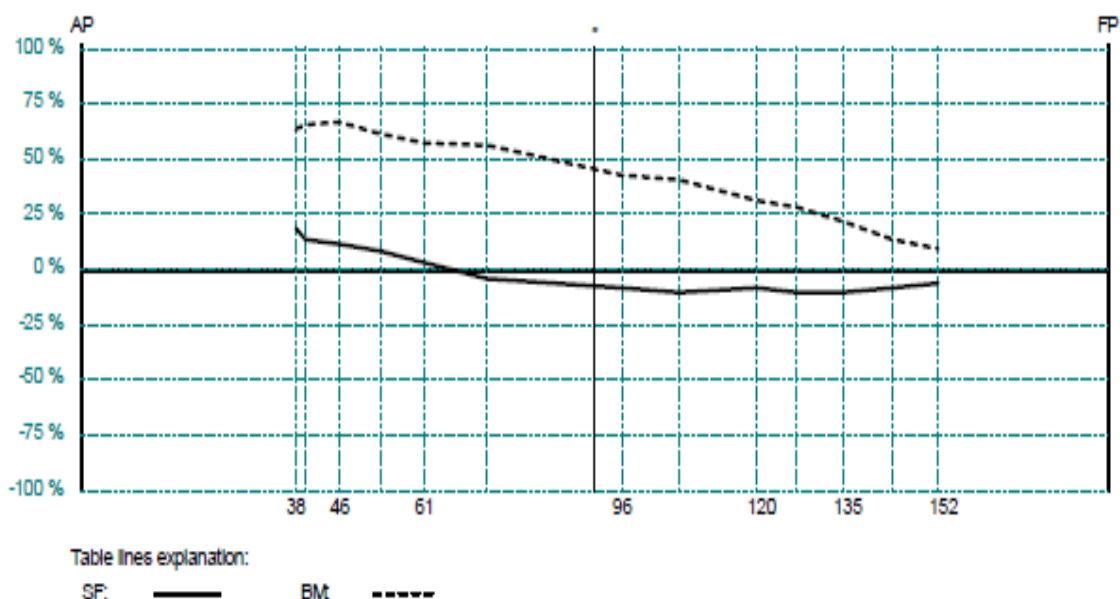
#### Weather Criterion Details

	Initial Heel [°]	Ab / Aa	Ab / Aa [m-rad]/[m-rad]	Area [m^2]	Z Lever [m]	Max heel [°]
Required	14.9	1.0000	N/A	N/A	N/A	N/A
Actual	Port 5.7	2.2905	0.1290 / 0.0563	2347	11.61	43.5

Рис. 1. ДСО, построенная в судово́й программе

Вес судна порожнем и масса всех его частей по отдельности с указанием координат центра тяжести каждой из них для построения ступенчатой линии веса уже занесены в протокол исходных данных программы. Данные о запасах в танках поступают либо непосредственно с датчиков в соответствующих танках там, где они имеются, либо посредством ручного ввода конкретных значений, полученных после проведения точных замеров.





### Still Water Shear Force and Bending Moment Limits

Frame No.	Distance to AP m	BENDING MOMENT				SHEAR FORCE			
		Actual Value tm	Min Allow tm	Max Allow tm	Relative %	Actual Value t	Min Allow t	Max Allow t	Relative %
152	118.56	1674	-3935	19460	9	-236	-3444	3257	7
144	112.32	3699	-12610	28135	13	-332	-3590	3403	9
135	105.30	6579	-18410	31101	21	-352	-3144	2957	11
127	99.06	9289	-28542	33772	27	-424	-4058	3885	10
120	93.60	11876	-17329	38736	31	-450	-5349	5291	8
106	82.68	15564	-17329	38736	40	-348	-3279	3279	11
96	74.88	19263	-28542	45872	42	-428	-5071	5071	8
72	56.16	25235	-28542	45872	55	-228	-4885	4885	5
61	47.58	25557	-28542	45872	56	126	-4798	4895	3
53	41.34	24419	-27196	40439	60	365	-4585	4758	8
46	35.88	22285	-24245	33965	66	481	-4237	4409	11
40	31.20	19985	-21716	30887	65	570	-4141	4313	13
38	29.64	19134	-20873	30887	62	609	-3181	3353	18

Max. SF :		18.2 % at	29.64 m	Displacement :	17376 t	Draft FP :	7.10 m
Max. Shear Force :	609 t	18.2 % at	29.64 m	Deadweight :	12086 t	Draft AP :	8.26 m
Max. BM :		65.6 % at	35.88 m	Seawater Dens. :	1.025 t/m <sup>3</sup>	Draft Mean :	7.68 m
Max. Bending :	25660 tm	55.9 % at	50.31 m			Heel P :	0.00 °
						Trim :	1.16 m

Рис. 2. График распределения изгибающих моментов и перерезывающих сил по длине судна, построенный в судовой программе

Далее программа по определённому алгоритму считает все необходимые параметры для проведения оценки остойчивости и общей продольной прочности судна, строит график кривых изгибающих моментов и перерезывающих сил, представляющий собой график зависимости положения момента изгибающего и перерезывающей силы

на шпангоуте от его действительного значения в процентном соотношении от предельно допустимого, а также диаграммы статической остойчивости и выполняет проверку на соответствие полученных величин требованиям по остойчивости и общей продольной прочности. На указанных рисунках особое внимание стоит обратить на последние четыре строки. Они подтверждают, что выполненные программой расчёты в полной мере соответствуют всем предъявляемым требованиям по общей продольной прочности, остойчивости, а также в соответствии с требованиями [6].

На финальной стадии обработке данных программа предоставляет судоводителю итоговый бланк с обобщёнными результатами расчётов. Особое внимание следует обратить на строку «Mode of Calculation», т.е. на режим, в котором проводились расчёты. В данном случае – это «Sea Condition», т.е. режим морского перехода. Это значит, что в расчётный алгоритм программы при выборе данного режима, вносятся коррективы на погодные условия, а именно на высоту волны для расчётов общей продольной прочности. В программе также есть режим стоянки в порту, при котором высота волны не учитывается.

В соответствие с расчётами, выполненными при помощи судовой программы, в таблице 3 представлена итоговая проверка остойчивости и общей продольной прочности судна на соответствие требованиям ИМО и Бюро Веритас. Поскольку расчёт остойчивости и общей продольной прочности судна перед выходом в рейс должен выполняться на два состояния загрузки судна: на отход судна из текущего порта и на его заход в следующий порт, то судовая программа выполняет расчёты в соответствие с этим требованием, и в таблице представлены результаты проверки на оба состояния загрузки. Однако, посредством ручного счёта оценка остойчивости и общей продольной прочности судна при экстремальных погодных условиях в работе проводилась исключительно на отход судна, поскольку разница между фактическими результатами расчётов незначительная и для проведения оценки лишь на один из указанных случаев загрузки является достаточным.

Таблица 3

**Проверка остойчивости и общей продольной прочности судна  
на соответствие требованиям ИМО и Бюро Веритас**

Параметр	Требуемое значение		Отход	Заход
	Отход	Заход		
Метацентрическая высота, м	Отход	Заход	0,95	0,93
	≤ 0,87	≤ 0,89		
Осадка средняя, м	≤ 8,02		7,68	7,62
Суммарный момент перерезывающих сил, %	≤ 100		18,2	18,2
Суммарный изгибающий момент, %	≤ 100		65,6	65,5
Площадь ДСО (0°-30°), м·рад	≥ 0,055		0,134	0,132
Площадь ДСО (30°-40°), м·рад	≥ 0,030		0,063	0,062
Площадь ДСО (0°-40°), м·рад	≥ 0,090		0,196	0,194
Плечо ДСО при $\theta \geq 30^\circ$ , м	≥ 0,200		0,426	0,422
Максимальный угол крена ДСО	≥ 25,000		27,928	27,905

Угол крена на наветренный борт в момент начала действия порыва ветра	$\leq 14,9$	5,7 л/б	5,6 л/б
Отношение площадей ДСО $b/a$ (критерий погоды)	$\geq 1,0000$	2,3072	2,2905

Как видно из таблицы, выполненные судовой программой расчёты полностью соответствуют требованиям ИМО и Бюро Веритас.

Посредством ручного счёта был выполнен расчёт остойчивости при скорости ветра 42 м/с, что соответствует давлению ветра 1068 Па. Эта величина более, чем в 2 раза превышает нормированное значение в соответствии с требованиями ИМО. ДСО и оценка остойчивости по критерию погоды при этом представлена на рисунке 3. По критерию погоды отношение площадей ДСО  $b/a$  должны быть больше единицы, чтобы остойчивости считалась обеспеченной. Однако для данного случая  $b/a$  оказалось равным 0,436, что в 2,3 раза меньше минимально допустимого значения. Посредством ручного счёта определения площадей проводилось с использованием методики Симпсона.

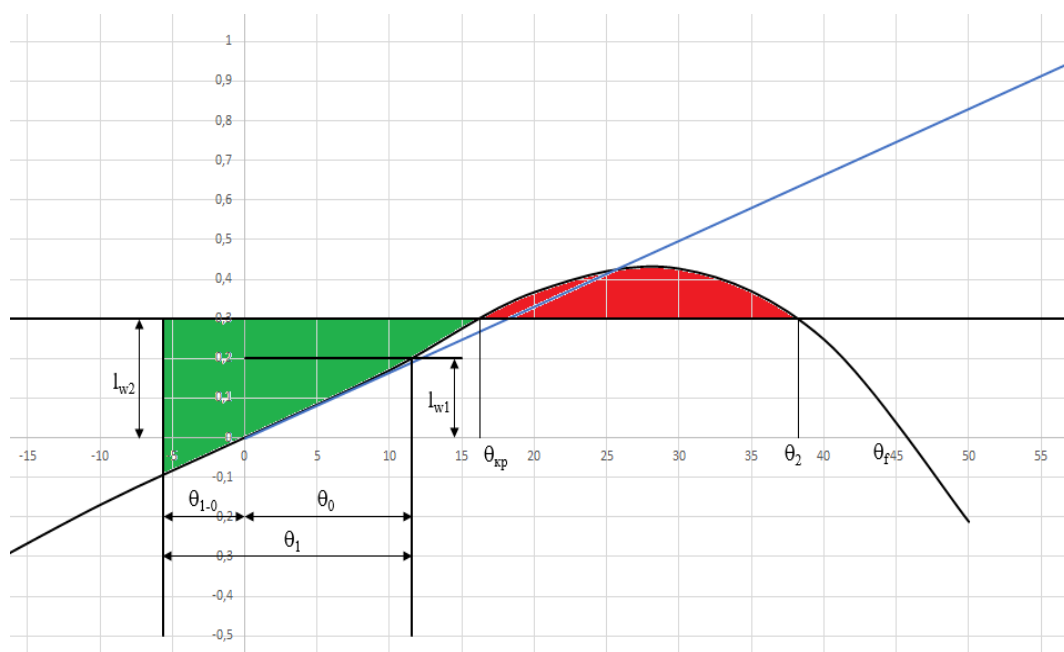


Рис. 3. ДСО и оценка остойчивости по критерию погоды при экстремальных погодных условиях

На рисунке 4 представлен график распределения изгибающих моментов по длине судна, однако, если на рисунке 2 такой же график давал представление о действительных значениях изгибающих моментов в процентном отношении от предельно допустимых, то на рисунке 4 представлены конкретные величины. Кривые  $M(V=12)$ ,  $M(V=5)$  и  $M(V=3)$  соответствуют значениям изгибающих моментов с учётом динамических изгибающим моментам, вызванных ударами волн в носовую оконечность судна. Значение этого момента зависит от формы скуловых образований судна и от скорости хода. Посредством ручного счёта по приближённой методике определения основных элементов и параметров общей продольной прочности было выявлено отсутствие учёта данных величин в алгоритме судовой программы. Как видно из рисунка, значения изгибающих моментов с учётом ударов волн в развал бортов даже на минимальном ходу при  $V=3-5$  уз выходят за рамки установленных

пределов в носовой части судна, где, собственно, и происходит непосредственный контакт с волной. Однако в общем случае критические изгибающие моменты при этом могут возникнуть в любой части судна, в зависимости от распределения нагрузки и общих изгибающих моментов по длине судна. Несмотря на то, что это не статический изгибающий момент, и столь значительное его значение представляется реальным исключительно при движении судна на волну, этот факт должен обязательно учитываться судоводителем, ведь большинство аварий, связанных с потерей прочностью на волнении, связано именно с возникновением и частым повторением таких динамических изгибающих моментов.

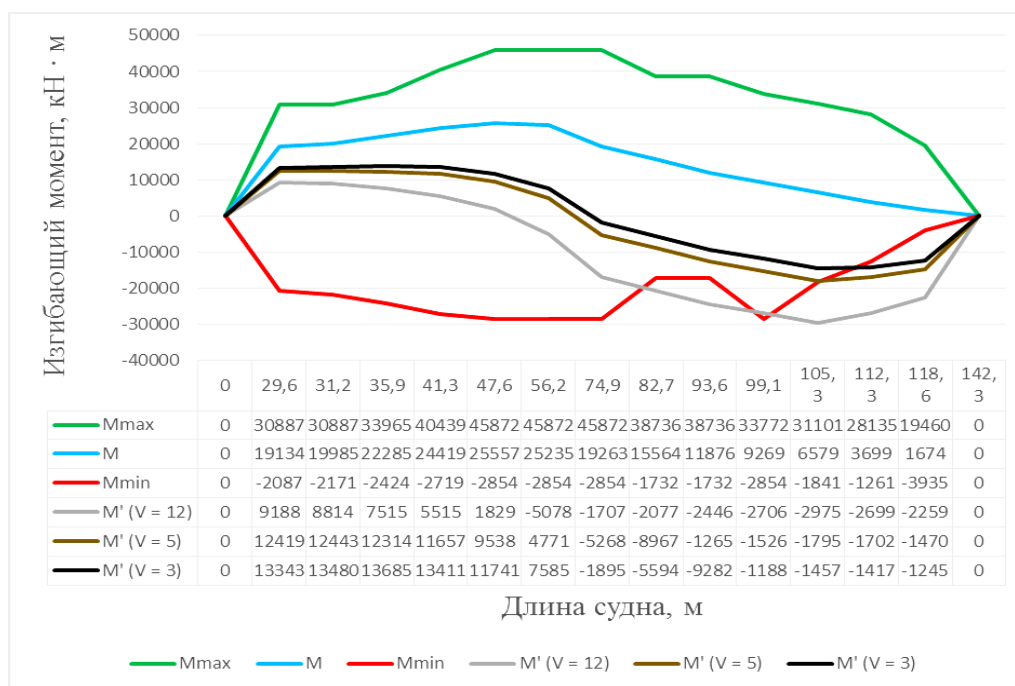


Рис. 4. Распределение изгибающих моментов по длине судна

Таким образом, факт того, что судовые программы производят расчёт остойчивости для погодных условий, не превышающих 10 баллов по шкале Бофорта (сила ветра – 26 м/с), а расчёт общей продольной прочности не учитывает динамическое воздействия волн в носовую оконечность судна, должен служить объектом повышенного внимания со стороны судоводителей. Обладая знаниями по данной теме, судоводитель должен понимать, что в случае возникновения необходимости, в рамках рейсового задания или по другим причинам, в прохождении такого участка Мирового океана, где фактические погодные условия будут превышать те, что установлены в программе, объективно полагаться на актуальность и надёжность грузовых программ нельзя. В некоторых случаях может потребоваться ручной пересчёт основных элементов и параметров остойчивости и общей продольной прочности судна, а с учётом того, что в последнее время климатические изменения становятся всё более суровыми, данное обстоятельство является как никогда актуальным и особенно значимым. Необходимо тщательно прорабатывать грядущий маршрут перехода на предмет преобладающих и вероятных погодных условий, а также быть предельно внимательным и следить за своевременной метеосводкой в процессе перехода, быть уверенным в её актуальности и надёжности. Имея на борту возможность заблаговременно получать прогноз погоды с достаточной точностью (например, при помощи компьютерной программы SPOS), судоводитель может грамотно спланировать

предстоящий переход и выполнить расхождение с ожидаемым штормом с целью избежать непосредственного контакта с ним. Однако не всегда осуществление расхождения со штормом представляется возможным, и по тем или иным причинам судно попадает под воздействие циклонической деятельности. В таких случаях ключевым является грамотное управление судном. Существуют различные способы управления судном в штормовую погоду, и судоводителю необходимо их знать и уметь применять на практике. Ключевыми действиями в этом случае будут сбавлением скорости до минимальной, при которой судно продолжает уверенно слушаться руля и воздействие ударов волн, особенно в носовую оконечность, наименее существенны, а также выбор таких курсов, при которых судно в наименьшей степени будет подвержено влиянию таких негативных факторов, как бортовой качки, слеминга и сильных ударов волн в носовую оконечность.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аварийность на море: реальный взгляд на жизнь // Электрон. дан. Режим доступа URL: <http://pandia.ru/text/78/115/31075.php>, свободный (дата обращения 12.05.2018).
2. Резолюция ИМО А. 749 (18). Международный кодекс остойчивости судов в неповреждённом состоянии. – Введ. 04.11.1993 – 242 с.
3. Бухановский А. В., Лопатухин Л. И. Статистика штормов на морских акваториях (альтернативный подход) // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2015, т. 8, №4. – С. 86-91.
4. Циркуляционное письмо ИМО MSC. Circ. 854. Руководство по судовым компьютерным программам расчёта загрузки и остойчивости. – Введ. 12.06.1998. – 14 с.
5. Циркуляционное письмо ИМО MSC. Circ. 891. Руководство по использованию компьютеров на судах. – Введ. 21.12.1998. – 24 с.
6. Международная конвенция о грузовой марке 1966 г., изменённая Протоколом 1988 г. к ней (КГМ – 66 / 88) (пересмотренная в 2003 г.). – 2-е изд., доп. – СПб.: ЗАО ЦНИИМФ, 2007. – 320 с.

#### **ASSESSMENT OF BARGE SEAWORTHINESS FOR TRANSPORTION OF HEAVY LIFT CARGO**

Yakuta Irina Vladimirovna, candidate of techn. sci., associate professor  
Guralnik Boris Samuilovich, candidate of techn. sci., associate professor  
Filimonov Iliia Valerievich, cadet

Baltic fishing fleet state academy FSBEI HE "KSTU", Kaliningrad, Russia,  
e-mail: kaf.bm@bga.gazinter.net

*Recommendations on the necessity of rationale of difference's accounting between actual weather and parameters of weather conditions which are used in ship computer programs are given in this article. The results of the analysis allow to produce recommendations on the competent ship programs exploitation and actual weather conditions accounting for calculation of the intact stability and general longitudinal strength parameters of the vessel for navigators.*

## **СЕКЦИЯ «ИННОВАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, ПОСТРОЙКИ И РЕМОНТА СУДОВ»**

### **SECTION "INOVATIVE METHODS IN SHIP DESIGN, CONSTRUCTION AND REPAIR"**

УДК 629.12.011

#### **СПОСОБ ПОСТРОЙКИ СУДОВ В ЧИСТЫЙ РАЗМЕР С ПОЭТАПНЫМ КОНТРОЛЕМ ТОЧНОСТИ СБОРКИ И СВАРКИ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ГРУППОЙ КОНТРОЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

Аннаоразов Мухаммед М., магистрант  
Дектярев Александр Владимирович, аспирант  
Морозов Владимир Николаевич, канд. техн. наук, доцент

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,  
Калининград, Россия, e-mail: muha.annaor@yandex.ru; nwasanches@mail.ru;  
mvn3613@gmail.com.

*Предложены инженерные и организационные инструменты, дающие возможность кооперационного строительства судов крупными интегрированными блоками в «чистый размер» (без припусков) с поставкой блоков для одного изделия от нескольких производителей на головную линию сборки одного из предприятий группы объединённой судостроительной корпорации (ОСК) отрасли*

Точность изготовления корпуса судна во многом зависит от погрешностей изготовления отдельных деталей, узлов, секций и блоков. Как правило, секции и блоки собираются разными бригадами, что также вносит погрешности при строительстве судна. Неточности изготовления деталей, узлов, секций и блоков могут быть увеличены последующей их сваркой. Таким образом, проблема точности, а, следовательно, и повышение качества в судостроении является актуальной, сложной и многоаспектной. Решение данной задачи актуально еще и потому, что оно связано с основными направлениями развития технологии судостроения. [1]

Основными параметрами, влияющими на точность изготовления секций и блоков корпуса судна, являются:

1. Точность вырезки деталей;
2. Точность гибочных работ;
3. Наладка, установка и причерчивание лекал и коксов постелей для сборки секций;
4. Укладка деталей в соответствии с геометрией секции с учетом упреждений;
5. Контроль при сборке секций, гарантирующий достоверный результат по ее геометрии;
6. Учет и проверка смежных секций по геометрии, совпадение по пазам и стыкам.

На первые два пункта влияет, главным образом, точность применяемого на предприятии оборудования. Сейчас, на АО «ПСЗ Янтарь» из-за морального и

физического износа оборудования точность вырезки деталей составляет до  $\pm 0,8$  мм, гибочных работ – до  $\pm 10,0$  мм. Однако, в наличии имеется оборудование (как на мировом, так и на российском рынках), способное достичь точности вырезки и гибочных работ до 0,01 мм (см. [2], [3], [4]).

Приведенное выше в указанных работах оборудование требует больших экономических затрат, что является не слишком благоприятным фактором для успешного развития так называемого «бережливого производства». Особенно это стоит учитывать в текущих реалиях – сложной экономической обстановки в стране, нарастания напряжения отношений с европейскими поставщиками, усиления политики импортозамещения и т.д. В этих условиях любому предприятию необходимо соблюдать политику совмещения одновременного повышения качества продукции и снижения материальных затрат на ее изготовление.

Перед тем как раскрыть предлагаемое решение, стоит отметить понятие изготовления в «чистый размер». Это значит, что:

- 1) формирование секции производится с минимальным припуском, который будет удален после виртуальной сборки с ответной частью.
- 2) учет сварочных деформаций, при соблюдении одной и той же технологии сборки и сварки секции.

Из этого следует, что при формировании корпуса, секция поступает на крупно-узловую сборку без припусков.

Для успешной реализации поставленных задач, нами разработано следующее предложение, которое обеспечит возможность строительства судов крупными интегрированными блоками точно в размер с поставкой блоков для одного изделия (судна) от нескольких производителей на головную линию сборки одного из предприятий – что позволит наладить кооперационное взаимодействие предприятий группы ОСК, а также будет наименее затратным вариантом. Предложение звучит следующим образом – ввести на всех предприятиях ОСК специальную сквозную бригаду, т.н. группа контрольных измерений, функции которой представлены на рис. 1.

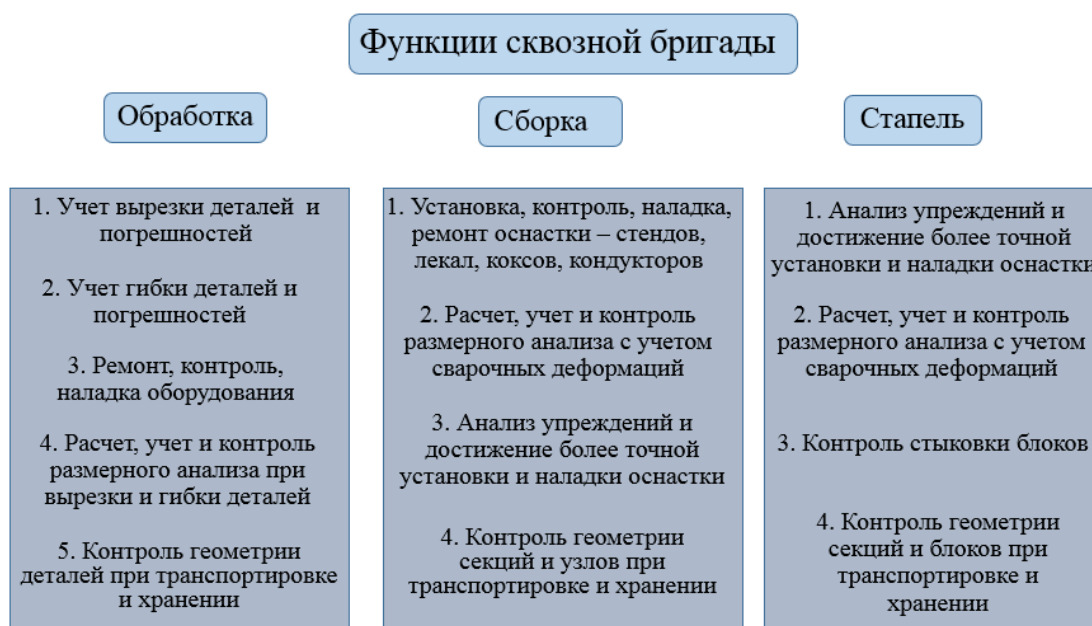


Рис. 1. Функции сквозной бригады

Предположительно группа контрольных измерений (ГКИ) будет состоять из 5-7 инженеров и 10-12 квалифицированных рабочих – сборщиков корпусов судов.

Состав оборудования для работы ГКИ:

- 3 лазерных трэкера;
- 5 тахеометров;
- 3 лазерных сканера.

Были проведены технико-экономические расчеты, из работы группы контрольных измерений, на основе собранных статистических заводских данных, результатом которых явились следующие показатели:

- на этапе гибки и резки повышается точность до 0,05 мм;
- на этапе сборочно-сварочных производства на 5% сокращаются работы по изготовлению секций, повышается точность изготовления конструкции, следовательно, снижаются дополнительные работы;
- сокращение объема стапельных работ на 20-25%.

При этом возникают затраты по внедрению этих мероприятий: на оборудование около 55млн. руб., зарплата около 45-50 тыс. рублей, увеличивается трудоемкость и время на проверочные работы примерно на 15- 20 н/ч на секцию.

Из этого всего следует, что мы экономим около 20% на один заказ, а внедрение данного способа начнет приносить прибыль уже через 6-8 месяц при постройке одного крупнотоннажного заказа (около 250 секций).

Так в настоящее время на АО «ПСЗ Янтарь», согласно ОСТам, вводится система припусков в +30 и +50 мм соответственно, по длине и ширине секции/блока. Эти значения учитывают остаточные сварочные деформации секций, погрешности при изготовлении деталей, сборке и т.д. Однако, при существующем оборудовании, при достоверном расчете с учетом фактора прогнозирования ожидаемых сварочных деформаций, эти значения можно существенно уменьшить, тем самым снизить расход металла, трудоёмкость и тем самым повысить эффективность производства.

Ниже представлен один из сегментов расчета ожидаемых сварочных деформаций и системы припусков днищевой секции (L = 8000 мм, В = 9350 мм, Н = 800 мм) среднего рыболовного траулера пр. 1332 типа «Баренцево море». Расчет сварочных деформаций выполнен по методике, предложенной в работе [5], усовершенствованной в работах [8, 9,10] и расчёта припусков – согласно рекомендациям, изложенным в работах [6], [7].

Определение общих сварочных деформаций заключалось в суммировании всех значения укорочений секций в продольном и поперечном направлениях по отдельности, полученные на всех этапах сварки:

$$\Delta B = \left\{ \sum_{i=1}^m W_i + \sum_{j=1}^n V_j \right\} \cdot \frac{1}{F_L}, \text{ см}$$

– в продольном направлении

где:

$W_i$  – объём поперечного укорочения одного продольного соединения, см<sup>3</sup>;

$V_j$  – объём продольного укорочения одного поперечного соединения, см<sup>3</sup>;

$F_L$  – площадь продольного сечения полотнища на данном этапе; n, m – количество поперечных и продольных швов соответственно.

$$\Delta L = \left\{ \sum_{j=1}^n W_j + \sum_{i=1}^m V_i \right\} \cdot \frac{1}{F_e},$$

– в поперечном направлении



где:  
 $W_j$  – объём поперечного укорочения одного поперечного сварного соединения, см<sup>3</sup>  
 $V_i$  – объём продольного укорочения одного продольного сварного соединения, см<sup>3</sup>  
 $F_e$  – площадь поперечного сечения полотнища; n, m – количество поперечных и продольных швов соответственно.

Определение остаточной стрелки прогиба в поперечном и продольном направлениях производилось согласно формулам:  
 $f_B = \frac{\varphi_B \cdot B}{8}$  – для продольного и  
 $f_L = \frac{\varphi_L \cdot L}{8}$  – для поперечного, где: L, B – соответственно усредненная длина и ширина секции,  $\varphi_L$  – угол поворота одного конца СКС относительно другого в поперечной плоскости,  $\varphi_B$  – угол поворота одного конца СКС относительно другого в продольной плоскости. Результаты расчётов представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Общие сварочные деформации и остаточные стрелки прогиба секции**

Наименование секции, шп. 46-60	Укорочение в продольном направлении, см	Укорочение в поперечном направлении, см	Стрелка прогиба в продольном направлении, см	Стрелка прогиба в поперечном направлении, см
Днищевая	1,40	2,03	1,2	3,8

Расчет припусков основывается на результатах проведенного расчета сварочных деформаций и представлен в табл. 2 (по длине) и табл. 3 (по ширине).

Таблица 2

**Расчет припуска днищевой секции по длине**

№	Параметры	n	k	$\alpha$	P	$\delta$	$\Delta$	$t_H$	$t_B$
1	Погрешность вырезки листов	2	1	0	1	0,5	0	-1	1
2	Погрешность сборки полотнища	2	1	0	1	2,0	0	-2,0	2,0
3	Погрешность разметки мест установки балок набора, образующих монтажную шпацию	2	1	0	1	2,0	0	-2,0	2,0
4	Погрешность установки балок набора, образующих монтажную шпацию	2	1	0	1	2,0	0	-2,0	2,0
5	Сварочные укорочения	1	1	0	-1	14,0	7,0	-7,0	21,5
6	Замыкающее звено: погрешность секции по длине					14,6	-7,0	-21,6	7,6
Параметры замыкающего звена									
$K_{\Sigma} = 1 + \frac{0,55}{\sum  1  \cdot 0,5 + 1 \cdot 2 + 1 \cdot 2 + 1 \cdot 2 - 1 \cdot 15} \cdot (0) = 1$									

Полуширина поля рассеивания, мм	$\delta_{\Sigma} = \frac{1}{1} \sqrt{\sum_{i=1}^n 2 \cdot (0,5)^2 + 2 \cdot (2)^2 + 2 \cdot (2)^2 + 1 \cdot (14,0)^2} = 14,6$
Координаты середины поля рассеивания, мм	$\Delta_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n 1 \cdot (-1) \cdot 7,0 = -7,0$
Нижняя граница поля рассеивания, мм	$t_{H_{\Sigma}} = \Delta_{\Sigma} - \delta_{\Sigma} = -7,0 - 14,6 = -21,6$
Верхняя граница поля рассеивания, мм	$t_{B_{\Sigma}} = \Delta_{\Sigma} + \delta_{\Sigma} = -7,0 + 14,6 = 7,6$
Допуск, мм	$\pm 10$
Припуск, мм	$П =  t_{H_{\Sigma}}  -  Д  =  -21,6  -  10  = 11,6$
Вывод: принимаем припуск П=10 мм	

Таблица 3

### Расчет припуска днищевой секции по ширине

№	Параметры	n	k	a	P	δ	Δ	t <sub>н</sub>	t <sub>в</sub>
1	Погрешность вырезки листов	2	1	0	1	0,5	0	-1	1
2	Погрешность установки листов на оснастку	2	1	0	1	2,0	0	-2,0	2,0
3	Сварочные укорочения	1	1	0	-1	20,3	10,2	-10,2	30,6
4	Замыкающее звено					20,7	-10,2	-30,9	10,5
Параметры замыкающего звена									
Полуширина поля рассеивания, мм		$\delta_{\Sigma} = \frac{1}{1} \sqrt{\sum_{i=1}^n 2 \cdot (0,5)^2 + 2 \cdot (2)^2 + (20,5)^2} = 20,7$							
Координаты середины поля рассеивания, мм		$\Delta_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n 1 \cdot (-1) \cdot 10,2 = -10,2$							
Нижняя граница поля рассеивания, мм		$t_{H_{\Sigma}} = \Delta_{\Sigma} - \delta_{\Sigma} = -10,2 - 20,7 = -30,9$							
Верхняя граница поля рассеивания, мм		$t_{B_{\Sigma}} = \Delta_{\Sigma} + \delta_{\Sigma} = -10,2 + 20,7 = 10,5$							
Допуск, мм		$\pm 10$							
Припуск, мм		$П =  t_{H_{\Sigma}}  -  Д  =  -30,6  -  10  = 20,6$							
Вывод: принимаем припуск П=20 мм									

Где в приведенных выше таблицах: n – количество контролируемых параметров; p – передаточное отношение (p = 1, но для сварки p = -1, т.к. сварка приводит к укорочению длины полотна); k – коэффициент относительного рассеивания значения звена (k = 1 т.к. значения звеньев распределены по нормальному закону); a – коэффициент относительной асимметрии поля рассеивания значений звена (a = 0, т.к. закон распределения нормальный); δ – полуширина поля рассеивания значений звена, мм; Δ – координата середины поля рассеивания значения звена, мм; t<sub>н</sub> – нижняя граница практически предельного поля рассеивания вероятных отклонений контролируемого параметра, мм; t<sub>в</sub> – верхняя граница практически предельного поля рассеивания вероятных отклонений контролируемого параметра, мм.

В результате расчета установлено, что для данной секции в условиях применяемого оборудования с учетом предупреждений сварочных деформаций припуски в 10 и 20 мм по длине и ширине – наиболее оптимальный вариант.

Похожая методика [8, 9, 10] ранее (1985-1990 г.г.) использовалась на заводе «Балтия» в г. Клайпеде и позволила производить изготовление основных секций корпусов судов типа БМРТ в «чистый размер». Стоит отметить, что подобная методика изготовления секций возможна только при:

- учете сварочных деформаций при одной и той же технологии их сборки и сварки;
- поступление секций на крупно-узловую сборку при изготовлении корпуса без припусков.

Что касается вопросов географической увязки обществ группы ОСК при их кооперационном взаимодействии – тут сначала необходимо взглянуть на их расположение (рис. 2).

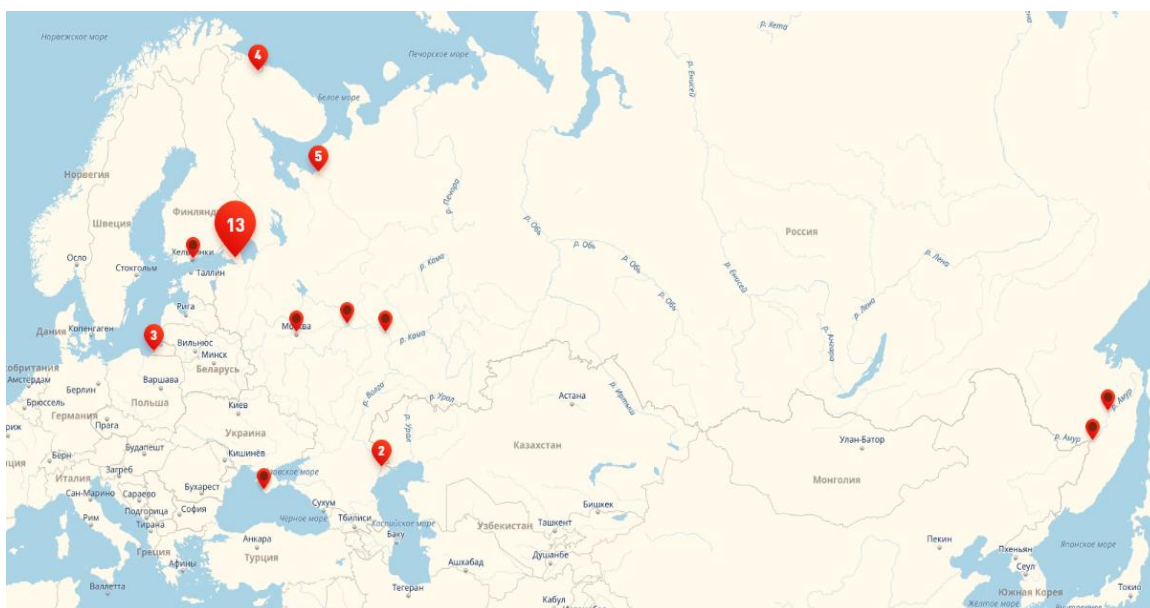


Рис. 2. География расположения обществ группы ОСК

Из анализа географического расположения обществ группы ОСК и их кооперации можно сделать следующие выводы:

- на Дальнем Востоке находятся АО «Хабаровский судостроительный завод» (г. Хабаровск) и ПАО «Амурский судостроительный завод» (г. Комсомольск-на-Амуре);
- в средней полосе России находятся АО «СКТБЭ» (г. Москва), ПАО Завод «Красное Сормово» (г. Нижний Новгород), АО «Зеленодольское ПКБ» (г. Зеленодольск);
- на юге находятся АО «Севастопольский морской завод» (г. Севастополь), КНРГ (г. Астрахань), АО Судостроительный завод «Лотос» (г. Нариманов, Астраханской обл.);
- на Северо-Западе России в относительной близости друг от друга и в зоне досягаемости с позиции транспортировки отдельных блоков находятся «35 СРЗ», ОАО «База технического обслуживания флота» (г. Мурманск), СРЗ «Нерпа» (г. Снежногорск Мурманской обл.), АО «10 СРЗ» (г. Полярный Мурманской обл.), АО НИПТБ «Омега», АО СПО «Арктика», АО ПО «Севмаш», АО КБ «Рубин-север», АО ЦС «Звездочка» (г. Северодвинск), АО ПСЗ «Янтарь» (г. Калининград), АО «33 СРЗ» (г. Балтийск Калининградской обл.), ПАО «Выборгский судостроительный завод» (г. Выборг), АО «СНСЗ», ПАО «Пролетарский завод», АО СПМБМ «Малахит», АО ЦМКБ «Алмаз», ПАО СЗ «Северная верфь», АО «Северное ПКБ», АО ЦКБ МТ «Рубин», АО

«Адмиралтейские верфи», ПАО «Невское ПКБ», АО «Кронштадтский морской завод», ООО «Балтийский завод-судостроение», АО ЦКБ «ОСК-Айсберг» (г. Санкт-Петербург);

- за пределами России, в Финляндии находится «Арктэк Хельсинки Шипъярд» (г. Хельсинки).

Предлагаемая организационная схема кооперативного строительства судов и кораблей по географическому принципу между указанными предприятиями состоит в следующем: выбрать головное предприятие, где будет изготавливаться судно в «чистый размер» с внедрением на них группы контрольных измерений → выбрать предприятия-изготовителя блоков и других различных конструкций (с подобным внедрением) → выбрать конструкторские бюро, которые будут обеспечивать расчетное обоснование и прогнозирование сварочных деформаций либо по усовершенствованной методике [5, 10], либо использовать метод конечных элементов (МКЭ) [11], а также собранные на головном предприятии статистические данные по отклонениям размеров секций и блоков строящихся судов.

Выбор головного предприятия должен вестись с учетом местоположения его возможных партнеров-поставщиков блоков судна и возможности наиболее экономичной их транспортировки. Тут наиболее лучшими вариантами, на наш взгляд, являются предприятия условной группы «Северо-Запад» (выделены красной линией на рис. 3). Тут большинство предприятий находятся в Санкт-Петербурге, следовательно, этот город наиболее значимый с точки зрения выбора головного предприятия. Так же, немаловажен тот факт, что блоки, изготовленные на предприятиях этой условной группы, можно будет доставлять морскими путями (см. рис. 4). Остальные предприятия (выделены синей линией на рис. 3) расположены на довольно значительном расстоянии от предполагаемой группы головных, им предстоит самим выполнять расчетную функцию – прогнозировать сварочные деформации и обосновывать схемы припусков.

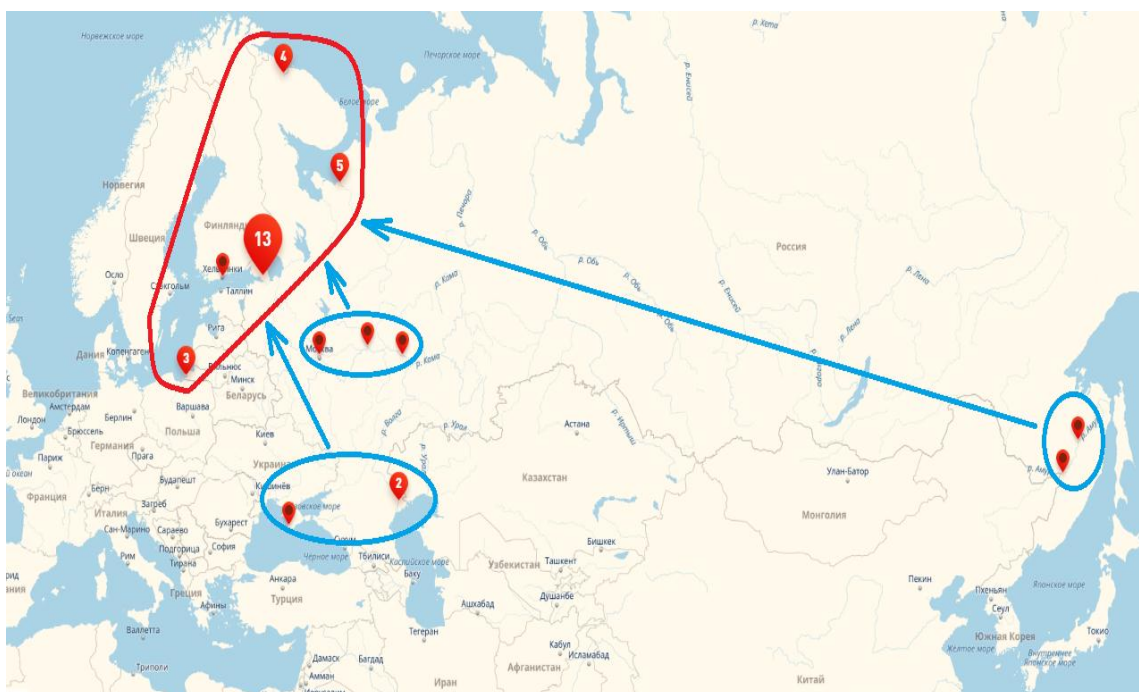
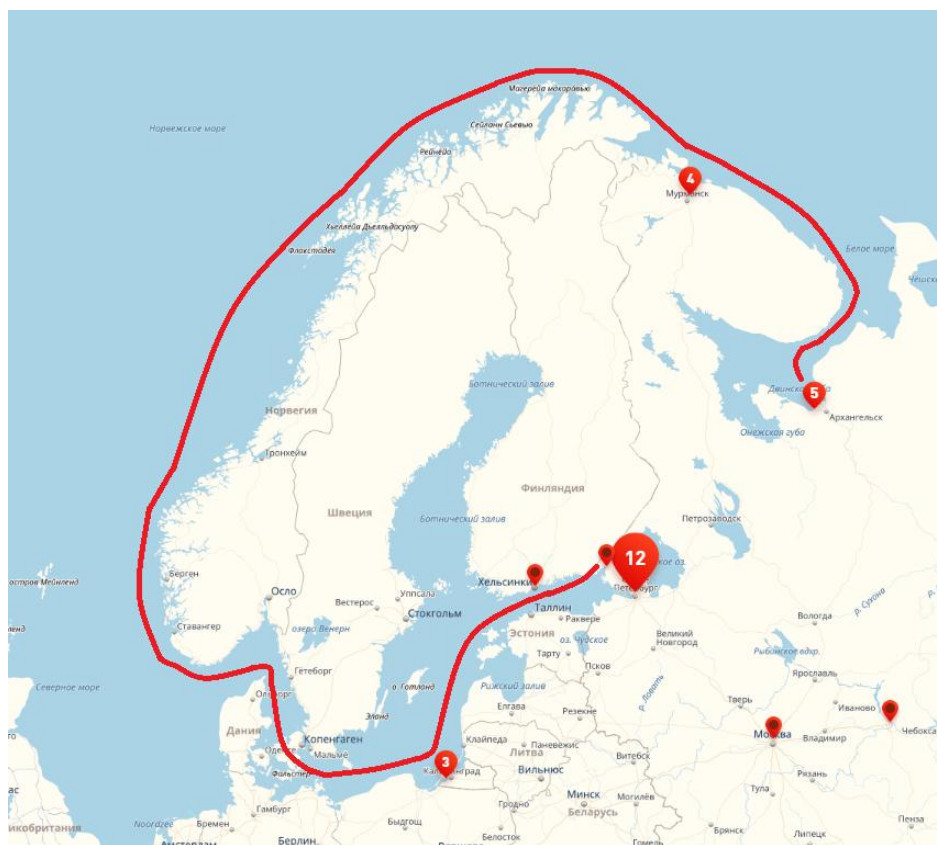


Рис. 3. Схема кооперационного строительства. Поставка на головную линию сборки расчетных данных по сварочным деформациям и припускам



*Рис. 4. Схема кооперационного строительства. Схема транспортировки блоков для предприятий возможной головной линии сборки*

### Заключение

1. Постройка судов крупными интегрированными блоками в «чистый размер» возможна при введении на предприятиях группы контрольных измерений с отдельно возложенными на нее функциями;
2. Увязка блоков при их сборке с кооперационным взаимодействием между предприятиями ОСК возможна только при изготовлении секций в «чистый размер»;
3. Варианты организационных схем кооперативного строительства судов и кораблей по географическому принципу для обществ группы ОСК предусматривают выбор головного предприятия из условной группы «Северо-Запад», где будет осуществляться строительство судна. Строительство блоков будет вестись предприятиями этой же условной группы. Расчет сварочных деформаций и припусков будут осуществлять наиболее отдаленные предприятия и конструкторские бюро, имеющие в своём составе компьютерную технику и соответствующее программное обеспечение.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нгуен Ч.А. Точность сборки корпусных конструкций судна и её обеспечение за счёт применения оптико-электронных приборов. «Астраханский государственный технический университет», 2016. – 158 с.
2. Гидроабразивные станки // Galika [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://galika.ru/pcategories/gidroabrazivnyj-stanok/> (дата обращения: 3.09.2017)

3. Лазерный станок для резки металла Vanad Fiber Laser Kompakt // Vanadrus [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.vanadrus.ru/Vanad-Fiber-Laser-Kompakt> (дата обращения: 7.09.2017)
4. Станок плазменной резки с ЧПУ Gammatec // Koike [Электронный ресурс]. - Режим доступа: [http://koike-ussia.ru/catalog/stanki\\_plazmennoj\\_rezki/stanki\\_plazmennoj\\_rezki/gammatec/](http://koike-ussia.ru/catalog/stanki_plazmennoj_rezki/stanki_plazmennoj_rezki/gammatec/) (дата обращения: 1.09.2017)
5. Кузьминов С.А. Сварочные деформации судовых корпусных конструкций. Судостроение, 1974. – 286 с.
6. Телянер Б.Е., Турмов Г.П., Финкель Г.Н. Технология ремонта корпуса судна. - Л: Судостроение, 1984. - 288 с.
7. Адлерштейн Л.Ц. Точность изготовления и монтажа корпусных конструкций судов. - Л: Судостроение, 1978. - 168 с.
8. Морозов В.Н., Соколова О.И. К вопросу повышения точности изготовления судовых корпусных конструкций. Вестник Российской академии естественных наук. Сборник научных трудов вып. 6. Калининград, изд. ФГБОУ ВО "КГТУ", 2012. с.77-86
9. Морозов В.Н., Цветков В.В. К вопросу выбора схемы изготовления днищевых секций корпусов судов. Вестник Российской академии естественных наук. Сборник научных трудов. вып. 7. – Калининград: Изд. ФГБОУ ВО "КГТУ", 2013. с. 80-85.
10. Морозов В.Н., Сморгыо К.И. От совершенства прогнозирования остаточных сварочных деформаций судовых корпусных конструкций к повышению качества при их изготовлении. Вестник Российской академии естественных наук. Сборник научных трудов. вып. 9., Калининград, изд. ФГБОУ ВО "КГТУ", 2015. с. 43-51.
11. Алфёров В.И. Методы расчёта сварочных деформаций и напряжений судовых корпусных конструкций: Монография. – СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2014. – 332 с.

**METHOD OF CONSTRUCTION IN THE NET DIMNSION  
WITH THE PHASED CONTROL OF ACCURACY OF ASSEMBLY  
AND WELDING OF HULL STRUCTURES GROUP CONTROL MEASUREMENTS**

Annaorazov M.M., graduate students

Dektyarev Alexandr Vladimirovich, graduate students

Morozov Vladimir Nikolaevich, assistant professor, candidate of technical sciences

Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,

e-mail: [mvm3613@gmail.com](mailto:mvn3613@gmail.com), [nwasanches@mail.ru](mailto:nwasanches@mail.ru)

The work suggests engineering and organizational tools that enable cooperative construction of ships with large integrated blocks of "clean size" (without allowances), with the supply of blocks for one product from several manufacturers to the assembly line of one of the enterprises of the group of the United Shipbuilding Corporation. In addition, variants of organizational schemes of cooperative construction of ships and ships on a geographical basis for companies of the USC group are justified, and approaches to the production of separate blocks for cooperation and their linkage during assembly have been developed.

## СТАТИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ БУКСИРНОГО КАНАТА НА БОТ

Батуев Альберт Дорнаевич, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,  
Научно-исследовательский центр судостроения, Калининград, Россия,  
e-mail: albert.batuev@mail.ru

*Актуальность темы определена неудовлетворением малых рыболовных ботов как буксиров правилам Речного Регистра в части статического действия буксирного каната. В статье показана чрезмерная жесткость этих правил, что создает мотив для их корректировки. Предложены методы расчета остойчивости при статическом действии, когда крепление буксирного каната находится вблизи оси руля*

Малые рыболовные боты (МРБ) проекта 902, 902Т и слегка измененные при ремонтах плавают в Куршском и Калининградском заливах и работают со ставными неводами. Они буксируют 3...5 лодок к неводам и после выборки улова с лодок рыбаками (до 6 человек) буксируют груженные лодки обратно. В качестве лодок используются мотолодки без мотора типа «Прогресс» или списанные спасательные шлюпки. Суммарный вес буксируемых гуськом лодок – до 15т. Водоизмещение бота  $\approx$  10 т. Установленная мощность двигателя 50 л.с.,  $L*В*Н = 10,5* 3*1,2$  м – длина, ширина и высота борта 902Т.

Во время составления информации об остойчивости для нескольких судов 902Т на класс Р1,2 выявилось следующее.

Раз суда занимаются буксировкой, значит, по правилам Регистра [1] эти суда можно считать буксирами. Раз так, они должны выдерживать рывок буксирного каната. Они выдерживают. Но не выдерживают требование о «статическом действии буксирного каната» (СДК) с большим «запасом». Не помогает даже крепление буксирного каната на ватерлинии и укладка разумного количества балласта.

Это требование было введено значительно позже постройки этих МРБ. Ввиду многолетней безаварийной эксплуатации, получается, что требование о СДК в современной формулировке по отношению к данным судам слишком сурово.

В связи с этим произведено расчетное исследование СДК по отношению к МРБ в одной из ситуаций.

Ситуация такая. МРБ буксирует большое судно. Это судно настолько неустойчиво на курсе, что идет сбоку от диаметральной плоскости МРБ. Худший для остойчивости случай - когда МРБ при полной мощности двигателя имеет руль положенный почти на борт. Остаток хода руля нужен для удержания на курсе. Похожая ситуация – это когда буксируемое судно зарыскнуло, а буксир старается его выправить. Или когда оба проходят поворот узкого канала. Поскольку канат в этих случаях всегда натянут, и все происходит медленно, можно говорить о статическом действии буксирного каната, то есть рассматривать остойчивость в статике.

Буксирное устройство МРБ такое: буксирный канат проходит через киповую планку в ДП на транце и крепится на кнехте.

Поскольку расстояние в плане между киповой планкой и центром давления пера руля на порядок меньше длины МРБ, пренебрегаем моментом, стремящимся изменить курс МРБ. Крен МРБ возникает от пары сил: поперечной силы пера руля и проекции

натяжения буксирного каната. Эта проекция равна поперечной силе пера руля, параллельна ей и приложена к киповой планке.

Рассчитаем крен вновь проектируемого МРБ с размерениями близкими к 902Т ( $L \cdot B \cdot H = 10,3 \cdot 3,3 \cdot 1,4$  м), но с удвоенной мощностью двигателя. Рассмотрим худший для остойчивости случай. Это - наибольшая мощность двигателя; гребной винт спроектирован для буксировки пяти «Прогрессов» с рыбой; общее водоизмещение буксируемых лодок 15 т; МРБ с грузом 0,9 т на палубе при пустом трюме и свободной поверхностью в широкой топливной цистерне. Теоретический чертеж бота дан на рис. 1.

### *Исходные данные для расчета*

Водоизмещение МРБ 9,3т  
Высота центра тяжести 1,2м  
Отстояние центра тяжести в корму от миделя 0,38м  
Угол входа палубы в воду  $23^{\circ}$ .  
Наибольшая мощность двигателя 75,8квт при 2500 об/мин.  
Длительная мощность 68,2 квт.  
Передаточное отношение редуктора 2,4.  
Диаметр винта 0,6м, шаговое отношение 0,77.  
КПД винта 0,35  
Буксировочное сопротивление с возом 0,75т.  
Коэффициент попутного потока 0,25.  
Коэффициент засасывания 0,2  
Скорость буксировки 7,6 узла  
Хорда пера руля 0,4м  
Удлинение руля в пределах струи винта 1,5  
Угол перекладки руля  $30^{\circ}$ .  
Отстояние оси винта от верха транца с учетом высоты киповой планки 1,4м.

В расчете использованы буксировочные модельные испытания МРБ, а сопротивление лодок определено по [2]. Диаграмма статической остойчивости рассчитана по программе «Проект 1».

### *Результаты расчета*

Ниже даны результаты определения поперечной силы на руле в тоннах при разных предпосылках.

- |   |      |
|---|------|
| 1. Проектный руль   | 0,43 |
| 2. Руль с увеличенной в 1,5 раза хордой                           | 0,44 |
| 3. По отклонению струи винта на $30^{\circ}$ и упору винта        | 0,45 |
| 4. По отклонению струи на $30^{\circ}$ и удельной тяге 10 кг/л.с. | 0,52 |

Здесь в п.п. 1 и 2 поперечная сила найдена по [3] – формула 5,36, с. 176 при угле перекладки  $300$ . При этом пренебрегли влиянием несколько выступающей за пределы струи винта площадью руля.

В п.3 принято, что для отклонения струи на  $300$  потребна поперечная сила  $T \sin 300 = 0,5T$ , где  $T$  - упор винта.

В п.4 – по той же формуле, но вместо упора принята тяга буксира. Она определена по предложению «Для приближенной оценки возможностей буксира принято считать, что при скорости 5 узлов он способен создать тяговое усилие в 10 кг/л.с.» - [4, с. 258].



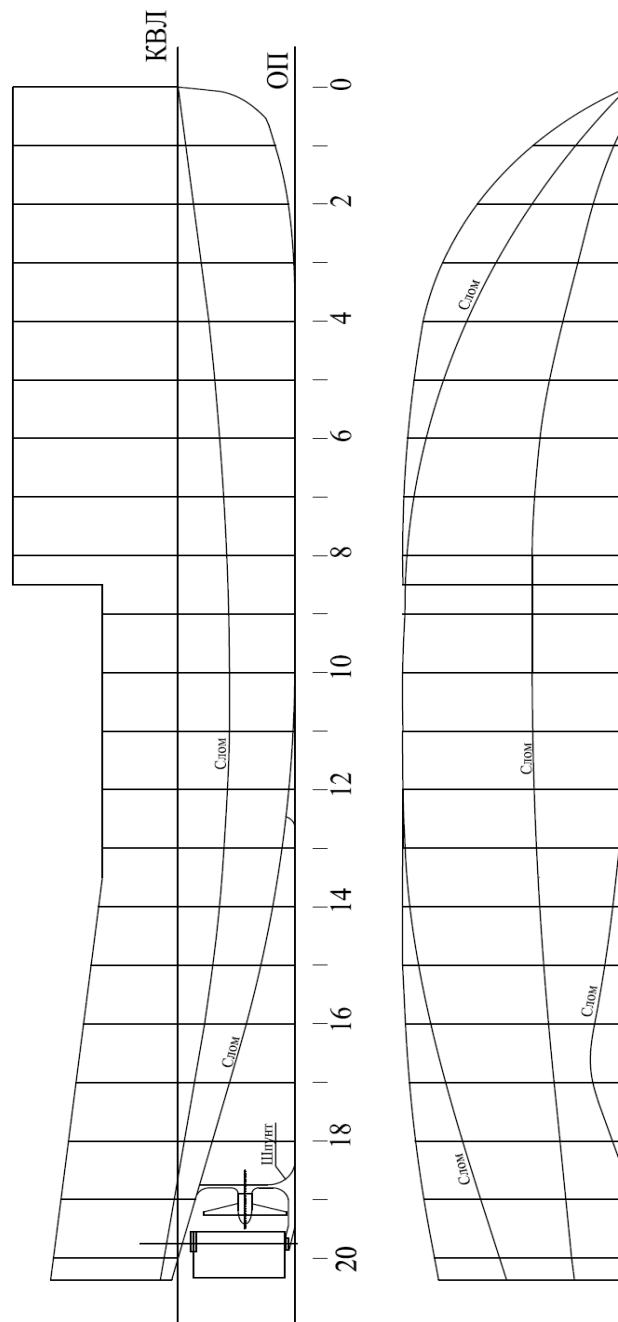
В худшем случае (п.4 - 0,52т) получаем кренящий момент  $0,52 \cdot 1,4 = 0,728$  тм и кренящее плечо  $0,728/9,3 = 0,078$  м. Ему соответствует крен 50.

РРР требует, чтобы при статическом действии буксирного каната палуба не входила в воду. Она входит в воду при крене 230, а по расчету крен не превышает 50. Таким образом, в исследованной ситуации судно представляет собой нормальный буксир с большим запасом остойчивости.

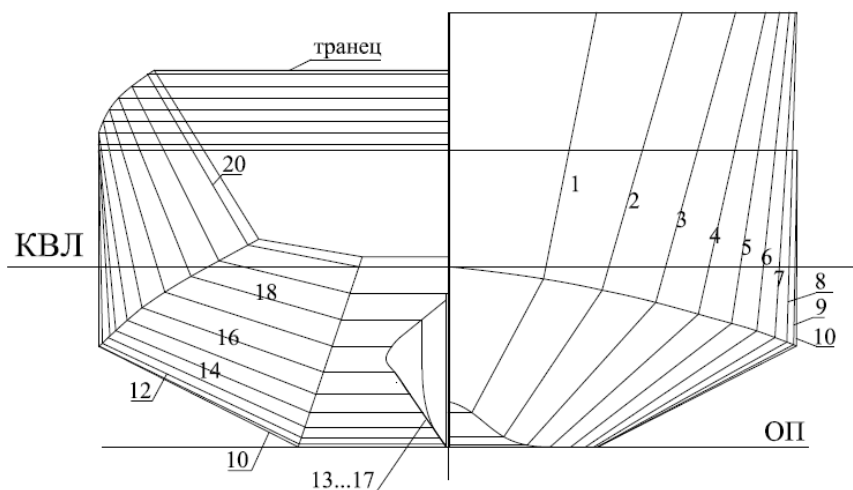
### **Выводы**

Требование РРР о статическом действии буксирного каната на буксир с креплением каната вблизи оси руля слишком сурово.

Предложены способы расчета кренящего момента таких судов.



*Рис. 1А. Теоретический чертёж*



Длина наибольшая	10,2м
Длина по перпендикулярам	10,0 м
Ширина	3,3 м
Высота борта на миделе	1.4 м
Осадка по КВЛ	0.85 м
Водоизмещение по КВЛ	15,2 куб. м

*Рис. 1Б. Теоретический чертёж*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила постройки и классификации судов внутреннего плавания Российского Речного Регистра (ПСВП), 2008.
2. Буньков М.М., Гринпрес В.М., Садовников Ю.М. «Мотолодка «Прогресс» плюс мотор «Вихрь-30», «Катера и яхты», № 5, 1975. С. 39.
3. Гофман А.Д. «Движительно-рулевой комплекс и маневрирование судна», Л., «Судостроение», 1988. 360 с.
4. «Справочник по управлению кораблем», Воениздат, М., 1974, 509 с.

#### STATIC ACTION OF THE TOW ROPE ON THE BOT

Batuev Albert Dornaevith, Candidate of Engineering Sciences, Senior

Researche Shipbuilding Research and Development Center, Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia, e-mail: albert.batuev@mail.ru

*The relevance of the topic chosen due to the dissatisfaction of small fishing boats as the tugs to the Riverain Register rules in static action of the towing cable. At the article the ultra-hardness of that rules is present. This is the motive for correction of rules. The methods for stability calculation are given, when towing cable attachment is near the rudder axis.*

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСТОЙЧИВОСТИ СУДОВ ПРИ ПРОДОЛЬНОЙ КАЧКЕ В УСЛОВИЯХ ЗАЛИВАЕМОСТИ НОСОВОЙ ОКОНЕЧНОСТИ

Бураковский Евгений Петрович, д-р техн. наук, профессор  
Бураковский Павел Евгеньевич, канд. техн. наук, доцент  
Злыгостев Денис Валерьевич, директор научно-исследовательского центра судостроения  
Сивограков Алексей Анатольевич, модельный инж. лаборатории мореходных качеств судов  
Чуреев Евгений Андреевич, зав. лабораторией мореходных качеств судов

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,  
Калининград, Россия, e-mail: denis.zlygostev@klgtu.ru; e.chureev@klgtu.ru;  
e.chureev@klgtu.ru; burakovsky@mail; rupaul\_b@mail.ru

*Настоящая работа посвящена экспериментальным исследованиям проблемы гибели судов в штормовых условиях вследствие потери остойчивости. Показано, что при залипании носовой оконечности водой в процессе качки судна возникает значительная гидродинамическая сила, действие которой может привести к опрокидыванию судна. Экспериментально подтверждены теоретические выводы о том, что процесс залипания на встречном волнении носовых оконечностей судов, содержащих плоские поверхности палуб, может привести к гибели судов*

Аварийная статистика по судам свидетельствует о том, что их гибель по причине потери остойчивости является одним из наиболее распространенных видов аварий. При этом в большинстве случаев основной причиной гибели судов от потери остойчивости считается человеческий фактор. В настоящей работе рассматриваются вопросы остойчивости судов при захвате волной их носовой оконечности в процессе продольной качки при условии «зарывания» носовой оконечности в воду. В ряде работ авторов [1-4] уже указывалось на опасность ситуации, возникающей при погружении носовой оконечности в воду и залипания носовой оконечности судна из-за продольной качки, когда на плоских участках палубы генерируется гидродинамическая сила, ведущая либо к опрокидыванию судов, либо к разрушению их корпусов. Это явление авторы назвали захватом волной носовой оконечности судна.

Настоящая работа посвящена проверке теоретических выводов авторов [1-4], показавших, что в условиях развитого волнения разворот судна носом на волну (а эту процедуру выполняют все капитаны), является небезопасным маневром, и в определенных условиях может привести к гибели судна. Экспериментальные исследования проводились на самоходной модели в опытовом бассейне научно-исследовательского центра судостроения КГТУ.

Размеры опытового бассейна составляют: длина  $L_б = 50$  м, ширина  $B_б = 7$  м, глубина  $a_б = 4$  м. Он оснащен буксировочной тележкой, пневматическим волнопродуктором и комплексом волногасителя. Максимальная скорость движения тележки составляет 3 м/с. Параметры волн, генерируемых в бассейне, находятся в

диапазоне: длина волны  $\lambda = 0,5 \div 15$  м, высота волны  $h = 0 \div 0,5$  м. На измерительной тележке установлены:

-измерительно-вычислительный комплекс МИС, исполнение МИС-026 (свидетельство об утверждении типа средств измерений RU.C.34.010.A№36450), заводской номер 0026092 (Свидетельство о поверке №СП 1059652) – предназначен для приема, записи и первичной обработки сигналов с внешних датчиков;

-измеритель периода волны (ИПВ) – предназначен для фиксации периода перекладки заслонок распределительного устройства волнопродуктора, соответствующего периоду смоделированного волнения;

-датчик – волнограф струнный емкостной – предназначен для фиксации характеристик волнения в опытовом бассейне (работает в комплексе со ИВК МИС-026).



а)



б)



в)



г)

*Рис. 1. Изготовление корпуса модели*

Базовая самоходная модель была изготовлена в масштабе 1:100 по чертежу реального танкера с тем лишь отличием, что палуба в носовой оконечности была принята плоской на уровне высоты надводного борта на миделе.

Технология изготовления модели состояла в следующем. По теоретическому чертежу танкера в масштабе 1:100 сначала выпиливались шпангоуты из фанеры. Затем на плоском столе (стапеле) выставлялись и закреплялись все шпангоуты килем вверх в соответствии с теоретической шпацией. В продольном направлении все шпангоуты перевязывались продольными связями, установленными в районе вертикального киля и бортов и палубы (рис. 1). В образовавшиеся ячейки между шпангоутами и продольными связями по бортам и днищу клеивались пластины пенопласта, которые после просушки обрабатывались на копировально-фрезерном станке Kempf&Remmers и дорабатывались заподлицо со шпангоутами. Для обеспечения водонепроницаемости и жесткости корпус модели обклеивался стеклотканью (рис. 2). После полимеризации связующего состава модель была загрунтована и окрашена. После просушивания

корпус модели отделили от плоского стола (стапеле) и перевернули килем вниз для монтажа двигательной установки, штанги с грузами и балласта, моделирующего условия загрузки судна (рис. 3).

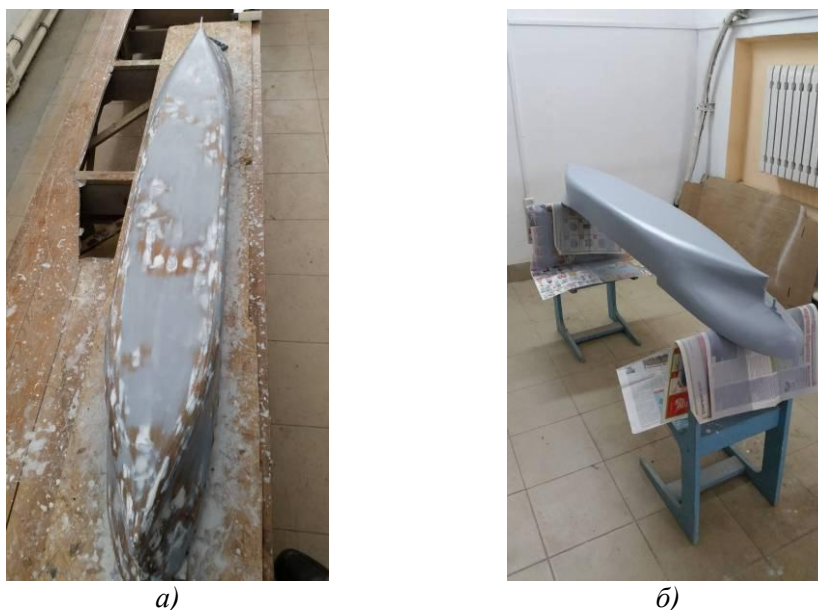


Рис. 2. Герметизация и окраска корпуса модели

Движение модели обеспечивалось при помощи коллекторного электродвигателя 775 серии с рабочим напряжением 12 вольт, который обеспечивал максимальное количество оборотов вала, равное 4500 об/мин. На валу двигателя за корпусом был установлен четырехлопастной винт диаметром 60 мм. Питание электродвигателя осуществлялось от аккумулятора марки LiPO 4200 mAh 11,1V. В модели был установлен приемник для передатчика P/Y FLYSKY. К приемнику подключены сервомашинка и регулятор скорости. Соответственно сервомашинка воздействует через систему тяг на руль модели, а регулятор скорости на обороты двигателя и его реверс. Аккумулятор также подключен к регулятору скорости.

Моделирование момента инерции масс модели относительно поперечной оси осуществлялось путем раскачки модели на специальном стенде.

Контроль скорости хода модели на волнении осуществлялся путем замера времени прохождения ей мерного участка.

Для возможности вариации метацентрической высоты модели на ней была установлена специальная мачта с закрепленной на ней штангой. Перемещая по высоте мачты штангу, представляется возможным изменять метацентрическую высоту. Контроль метацентрической высоты осуществлялся по периоду качки модели судна.

В носовой оконечности судна был установлен фальшборт, где для обеспечения смещения гидродинамической силы из диаметральной плоскости в процессе испытаний он снимался с одного из бортов.

Методика проведения экспериментальных исследований предусматривала два варианта загрузки модели: порожнем и в полном грузу. Скорость движения модели на волнении выбиралась из расчета, чтобы всегда выполнялось условие  $Fr \leq 0,25$ .

Экстремальная высота волны выбиралась из условия  $h = \frac{1}{20} L$ , где  $L$  – длина модели.

Перед началом испытаний модель находилась на исходной позиции в конце бассейна. Затем задавался выбранный режим регулярного волнения, который контролировался

датчиком-волнографом (рис. 4). После того, как режим волнения устанавливался, начиналось движение самоходной модели на встречном волнении.



а)



б)



в)

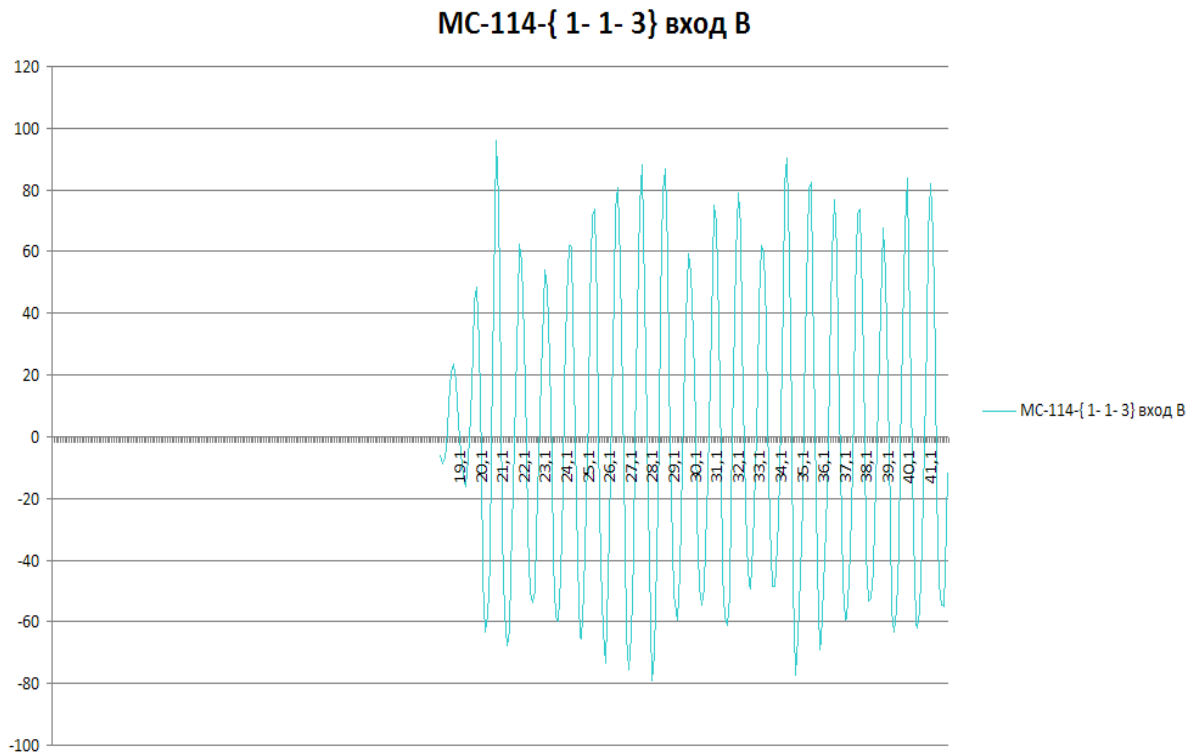


г)

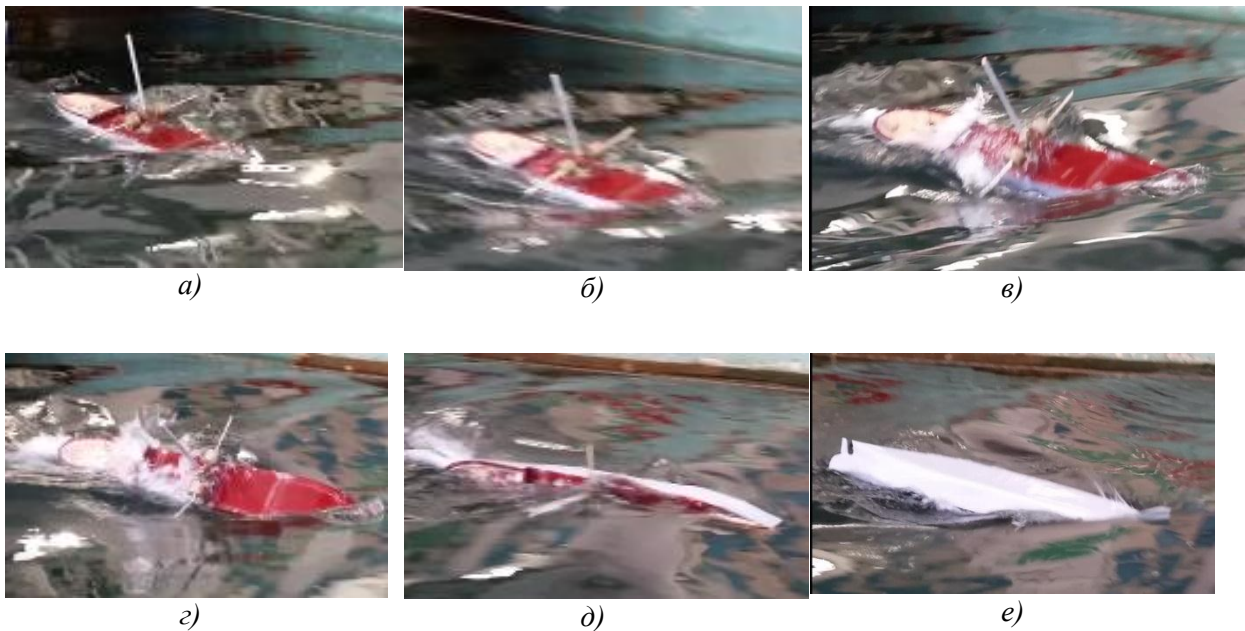
*Рис. 3. Подготовка модели к испытаниям*

Главное условие, которое необходимо достичь в процессе испытаний, это процесс заливания волной носовой оконечности модели судна. Поведение модели на волнении фиксировалось видеосъемкой (рис. 5).

Из рис. 5 видно, как развивается аварийная ситуация при заливании водой носовой оконечности судна. Удар волны по палубе в носовой оконечности судна за счет смещения равнодействующей гидродинамических сил давления от диаметральной плоскости создает кренящий момент, который постепенно увеличивается, приводя в итоге к опрокидыванию судна.



*Рис. 4. Параметры волнения при испытании модели*



*Рис. 5. Опрокидывание модели судна на встречном волнении при залипании носовой оконечности*

В настоящей работе экспериментально подтверждены теоретические выводы [1-4], что свидетельствует об опасности процесса заливания носовых оконечностей судов, содержащих плоские поверхности палуб.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бураковский, Е.П. Некоторые проблемы обеспечения общей прочности судов в чрезвычайных ситуациях / Е.П. Бураковский, П.Е. Бураковский // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2014. – Вып. 82(366). – С. 21–30.
2. Бураковский, Е.П. Эксплуатационная прочность судов: учеб./ Е.П. Бураковский, Ю.И. Нечаев, П.Е. Бураковский, В.П. Прохнич. – СПб.: Лань, 2017. – 404 с.
3. Бураковский, П.Е. Разработка конструктивных решений, направленных на предотвращение захвата волной носовой оконечности судна / П.Е. Бураковский // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия «Морская техника и технология». – 2017. – № 2. – С.7–14.
4. Бураковский, П.Е. Построение алгоритма контроля ситуации захвата волной носовой оконечности судна методами современной теории катастроф / П.Е. Бураковский, Ю.И. Нечаев // Известия КГТУ.– Калининград: ФГБОУ ВПО «КГТУ», 2015. – № 37. – С. 178–185.

#### **EXPERIMENTAL STUDIES OF STABILITY OF SHIPS AT LONGITUDINAL SURGING MOTIONS IN CONDITIONS OF FORE END POURING**

Burakovskiy Evgeny Petrovich, Doctor of Technical Sciences, professor  
Burakovskiy Pavel Evgenievich, Ph. D., assistant professor  
Zlygostev Denis Valerievich, head of research center of shipbuilding  
Sivograkov Alexej Anatolievich, model engineer  
Chureev Evgeny Andreevich, head of head of the laboratory of seaworthiness of ships

Baltic fishing fleet state academy FSBEI HE "KSTU", Kaliningrad, Russia,  
e-mail: paul\_b@mail.ru; denis.zlygostev@klgtu.ru; e.chureev@klgtu.ru

*The present work is devoted to experimental studies of the problem of ship deaths in stormy conditions due to loss of stability. It is shown that when the bow tip is poured with water during the rolling process, a significant hydrodynamic force appears, the effect of which can lead to the ship's overturning. Theoretical conclusions have been experimentally confirmed that the process of flooding on the oncoming waves of the fore end of vessels containing flat decks surfaces can lead to the wreck of ships.*



## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ДАВЛЕНИЙ НА ПАЛУБЫ СУДОВ В НОСОВОЙ ОКОНЕЧНОСТИ В ШТОРМОВЫХ УСЛОВИЯХ ПЛАВАНИЯ

Бураковский Евгений Петрович, д-р техн. наук, профессор  
Бураковский Павел Евгеньевич, канд. техн. наук, доцент

Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО  
«КГТУ», Калининград, Россия, e-mail: e\_burakovsky@mail.ru; paul\_b@mail.ru

*Настоящая работа посвящена проблеме обеспечения безопасности судов в штормовых условиях. Получены уравнения нелинейной качки судна с учетом заливания носовой оконечности на встречном волнении, представлены результаты моделирования. Показано, что возникающая при этом гидродинамическая сила может привести как к опрокидыванию судна, так и к разрушению его корпуса. Обоснована необходимость совершенствования конструктивного оформления носовых оконечностей корпусов морских судов*

Одной из главных причин гибели судов, попавших в шторм, является генерирование гидродинамических сил непосредственно на палубе судов в их носовой оконечности. Это усилие, как уже было показано в ряде работ авторов, приводит либо к разрушению корпусов судов, либо к их опрокидыванию [3,4,5]. Для каждого типа судна величина опасных усилий различна и зависит от водоизмещения судна, метацентрической высоты и т.д. Поэтому крайне важно уметь оценивать величину этих гидродинамических усилий. Такая процедура может быть осуществлена из рассмотрения уравнений килевой и вертикальной качки судов в условиях зарывания их носовой оконечности в воду.

Рассмотрим качку судна при движении на встречном волнении. В соответствии с [1, 2] запишем:

$$(J_y + \lambda_{55}) \cdot \ddot{\psi} + \nu_{55} \cdot \dot{\psi} + D \cdot H \cdot \psi = -r_w \cdot [\sigma_k \cdot b'_1 \cdot \cos(\sigma_k \cdot t) + (\gamma \cdot b_1 - \sigma_k^2 \cdot b_1'') \cdot \sin(\sigma_k \cdot t)]; \quad (1)$$

$$\left( \frac{D}{g} + \lambda_{33} \right) \cdot \ddot{\zeta}_g + \nu_{33} \cdot \dot{\zeta}_g + \gamma \cdot S \cdot \zeta_g - \nu \cdot \lambda_{33} \cdot \dot{\psi} - \nu \cdot \nu_{33} \cdot \psi =$$

$$= r_w \cdot [(\gamma \cdot a_0 - \sigma_k^2 \cdot a_0'') \cdot \cos(\sigma_k \cdot t) - \sigma_k \cdot a_0' \cdot \sin(\sigma_k \cdot t)]; \quad (2)$$

где  $D$  – водоизмещение судна;

$J_y$  – момент инерции массы судна относительно центра тяжести судна;

$g$  – ускорение силы тяжести;

$\gamma$  – удельный вес воды;

$\lambda_{33}$  – суммарная присоединенная масса для судна при вертикальной качке;

$\nu_{33}$  – суммарный коэффициент сопротивления для судна при вертикальной качке;

$\lambda_{55}$  – суммарная присоединенная масса (присоединенный момент инерции) при килевой качке;

$\nu_{55}$  – суммарный коэффициент сопротивления для судна при килевой качке;

$S$  – площадь ГВЛ судна;

$H$  – продольная метацентрическая высота;

$a_0, b_1$  – коэффициенты главной части возмущающих сил, определяемые по приближенным формулам А.В. Герасимова;

$a_0'', b_1''$  – коэффициенты для дифракционных компонентов возмущающих сил инерционной природы, определяемые по приближенным формулам А.В. Герасимова;

$a_0', b_1'$  – коэффициенты для демпфирующих дифракционных компонентов возмущающих сил, определяемые по приближенным формулам А.В. Герасимова;

$v$  – скорость судна;

$\sigma_k$  – кажущаяся частота волны;

$r_w$  – радиус орбиты на свободной поверхности воды.

Эти уравнения позволяют описывать качку судна при малых углах дифферента  $\psi$ , т.е. другими словами если палуба судна не входит в воду, а, следовательно, восстанавливающий момент будет линейно зависеть от  $\psi$ . В случае захвата волной носовой оконечности последняя находится под водой и дальнейшее увеличение угла дифферента будет вести к резкому падению скорости роста восстанавливающего момента с увеличением  $\psi$ .

Кроме того, резко падает и момент инерции ватерлинии относительно поперечной оси. В этом случае гидродинамическое давление будет стремиться еще сильнее увеличить угол дифферента.

Величину гидродинамического давления  $P_N$  на носовую оконечность будем определять из условия движения частиц воды в волне по окружности по методике, представленной в [3,4,5].

Для оценки гидродинамических воздействий на корпус судна во время качки при погружении носовой оконечности в воду палуба в первом приближении может рассматриваться как крыло конечного удлинения. В результате обтекания возникает гидродинамическая сила  $P_R$ , которая может быть разложена на перпендикулярную к палубе составляющую  $P_N$ , а также касательную к палубе  $P_T$  (рис. 1, где  $\psi$  – угол дифферента судна;  $\beta$  – угол наклона результирующей скорости обтекания палубы по отношению к вертикали).

Горизонтальная составляющая скорости обтекания палубы  $V_H$  определяется выражением

$$V_H = v + V_{WH}, \quad (3)$$

где  $v$  – скорость движения судна;

$V_{WH}$  – горизонтальная скорость движения волны.

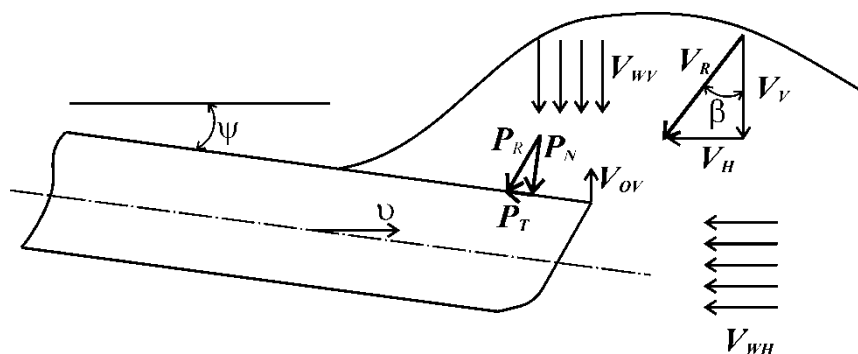


Рис. 1. Схема обтекания носовой части корпуса судна

Скорость обтекания палубы в вертикальном направлении  $V_V$  складывается из двух составляющих

$$V_V = V_{wV} + V_{OV}, \quad (4)$$

где  $V_{wV}$  – вертикальная скорость частиц воды;

$V_{OV}$  – вертикальная скорость носовой оконечности, обусловленная качкой судна.

Абсолютное значение результирующей скорости обтекания палубы определится из выражения

$$V_R = \sqrt{V_H^2 + V_V^2}. \quad (5)$$

Для приближенной оценки значений  $P_N$  и  $P_T$  можно воспользоваться формулами для крыла бесконечного удлинения с некоторыми поправками:

$$P_N \cong \frac{1}{2} c_N \rho V_R^2 F, \quad (6)$$

где  $V_R$  – результирующая скорость обтекания палубы;

$F$  – погруженная площадь палубы;

$\rho$  – плотность воды;

$c_N$  – коэффициент нормальной силы крыла, зависящий в числе прочего от угла атаки, формы носовой оконечности в плане, телесности носовой оконечности, наличия надпалубных конструкций, характера обтекания палубы вблизи раздела двух сред и т.д.

Считая углы дифферента малыми, можем принять, что синус и тангенс угла дифферента равны самому углу, а косинус угла дифферента приближается к единице. В этом случае с учетом направления осей координат, принятых на рис. 2, можно записать

$$V_{OV} = -\dot{\zeta}_g - \dot{\psi} \cdot \xi_F, \quad (7)$$

где  $\xi_F$  – центр тяжести погруженной площади палубы.

В принятой на рис. 2 системе координат плоскость  $O\xi\eta$  совпадает с невозмущенной поверхностью жидкости, начало координат  $O$  движется с постоянной скоростью  $v$ , направление оси  $O\xi$  совпадает с направлением этой скорости, ось  $O\zeta$  направлена вертикально вниз.

В соответствии с рис. 2 значения скоростей частиц волны в зависимости от ее фазы могут быть записаны в виде

$$V_{wV} = \sigma \cdot r_w \cdot \sin\left(\frac{2\pi\xi_w}{\lambda} + \sigma_k \cdot t\right); \quad (8)$$

$$V_{wH} = -\sigma \cdot r_w \cdot \cos\left(\frac{2\pi\xi_w}{\lambda} + \sigma_k \cdot t\right), \quad (9)$$

где  $\xi_w = L/2 - a$  – координата, отсчитывая от миделя, начиная с которой палуба погружена в воду;

$\sigma_k$  – кажущаяся частота волны;

$\sigma$  – частота волны;

$r_w$  – радиус орбиты на свободной поверхности воды.

Значение  $\xi_w$  может быть определено из условия нахождения текущего уровня воды на уровне высоты надводного борта с учетом вертикальной и килевой качки судна

$$h - \zeta_g - \psi \cdot \xi_w + r_w \cdot \cos\left(\frac{2\pi\xi_w}{\lambda} + \sigma_k \cdot t\right) = 0, \quad (10)$$

где  $h$  – высота надводного борта.

Подставляя (7) и (8) в (4), а (9) в (3) с учетом (5) получим

$$V_R = \sqrt{\left[ \nu - \sigma \cdot r_w \cdot \cos\left(\frac{2\pi\xi_w}{\lambda} + \sigma_k \cdot t\right) \right]^2 + \left[ \sigma \cdot r_w \cdot \sin\left(\frac{2\pi\xi_w}{\lambda} + \sigma_k \cdot t\right) - \dot{\zeta}_g - \dot{\psi} \cdot \xi_F \right]^2}. \quad (11)$$

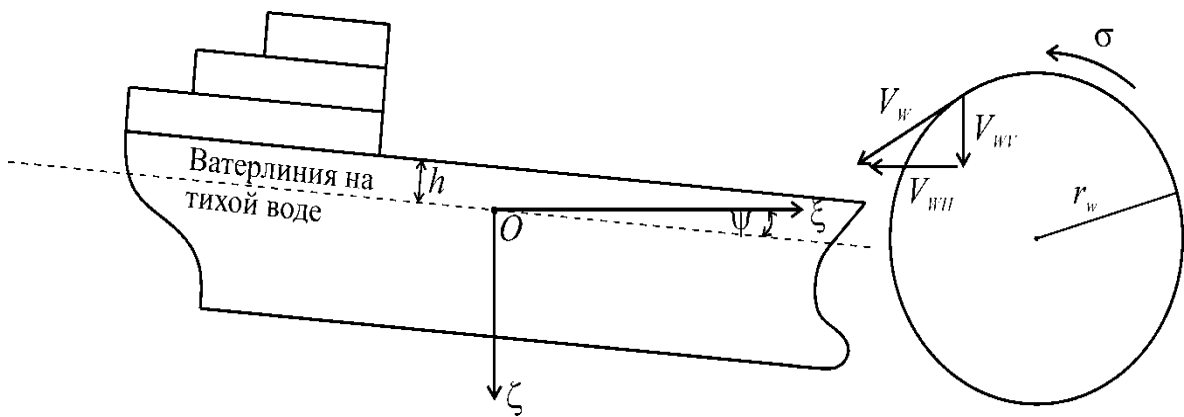


Рис. 2. Схема движения частиц воды в волне

Теперь нормальная составляющая гидродинамической силы, действующей на носовую оконечность при ее обтекании, может быть оценена с использованием формулы (6). В первом приближении можно принять, что указанная гидродинамическая сила приложена в центре тяжести погруженной площади палубы  $\xi_F$ , и при больших значениях коэффициента полноты ватерлинии, проведенной на уровне верхней палубы, в соответствии с [3,4,5] дифференцирующий момент может быть определен из выражения

$$M_{\text{диф}} = P_N \cdot \left(\frac{L}{2} - \frac{a}{2}\right) = P_N \cdot \xi_F \quad (12)$$

В первом приближении можно считать, что найденная гидродинамическая сила влияет главным образом на килевую качку судна, пренебрегая влиянием этой силы на вертикальную качку. При этом влияние гидродинамической силы на килевую качку судна может быть учтено за счет уменьшения восстанавливающего момента на величину дифференцирующего момента при зарывании судна носом в волну.

Помимо этого, уменьшение восстанавливающего момента происходит и за счет потери площади ватерлинии и ее момента относительно поперечной оси. Эту величину можно оценить из выражения

$$\Delta I = I_F + F \cdot \xi_F^2, \quad (13)$$

где  $F$  – погруженная в воду площадь палубы, вычисляемая на основании теоретического чертежа;

$\xi_F$  – координата центра тяжести погруженной площади палубы, отсчитываемая от миделя;

$I_F$  – собственный момент инерции погруженной в воду площади палубы относительно оси, перпендикулярной диаметральной плоскости.

В соответствии с [2] можно принять, что продольный метацентрический радиус приближенно равен продольной метацентрической высоте, т.е.  $R \approx H$ , поэтому

$$DH_W \approx \gamma \cdot (I_y - \Delta I = I_F + F \cdot \xi_F^2) = \gamma \cdot (I_y - I_F - F \cdot \xi_F^2) = DH - \gamma \cdot (I_F + F \cdot \xi_F^2), \quad (14)$$

где  $H_W$  – откорректированная продольная метацентрическая высота, определяемая с учетом потери площади ватерлинии при погружении носовой оконечности в волну.

Входящие в выражение (14) величины  $I_F$  и  $\xi_F$  могут быть рассчитаны на основании данных теоретического чертежа для любой длины погруженного в воду участка палубы, который определяется в соответствии с (10)

Подставляя (6) в (12), а полученное выражение в (1), получаем уравнение килевой качки с учетом (14) в следующей форме:

$$\begin{aligned} & (J_y + \lambda_{55}) \cdot \ddot{\psi} + \nu_{55} \cdot \dot{\psi} + D \cdot H \cdot \psi - \gamma \cdot (I_F + F \cdot \xi_F^2) - \frac{1}{2} c_N \rho V_R^2 F \cdot \xi_F = \\ & = -r_w \cdot [\sigma_k \cdot b_1' \cdot \cos(\sigma_k \cdot t) + (\gamma \cdot b_1 - \sigma_k^2 \cdot b_1'') \cdot \sin(\sigma_k \cdot t)] \end{aligned} \quad (15)$$

Данное уравнение является нелинейными по восстанавливающему моменту и представляет собой новую модификацию уравнения Дуффинга. Модифицированное уравнение Дуффинга уже использовалось в [6] для описания бортовой качки поврежденного судна на нерегулярном волнении, а в [7] было предложено использовать его для описания динамики судна в бортовой интеллектуальной системе обеспечения безопасности мореплавания для контроля чрезвычайной ситуации, связанной с захватом носовой оконечности судна волной. Уравнение (15) совместно с уравнением (2) позволяет описать механизм взаимодействия судна с волной при погружении носовой оконечности в воду.

Результаты расчета продольной качки судна на регулярном волнении по уравнениям (2) и (15) и значения гидродинамических сил, действующих на носовую оконечность, представлены на рис. 3 и рис. 4.

Расчет выполнялся для судна длиной 110 м, идущего вразрез волне, скорость судна варьировалась. При этом принимались следующие значения характеристик судна:  $L=110$  м,  $B=15,5$  м,  $T=5,64$  м,  $S=1260$  м<sup>2</sup>,  $J_y=331000$  т·м·с<sup>2</sup>,  $R=172$  м,  $D=5100$  т,  $I_x=18400$  м<sup>4</sup>,  $I_f=849200$  м<sup>4</sup>,  $x_f=-4,52$  м.

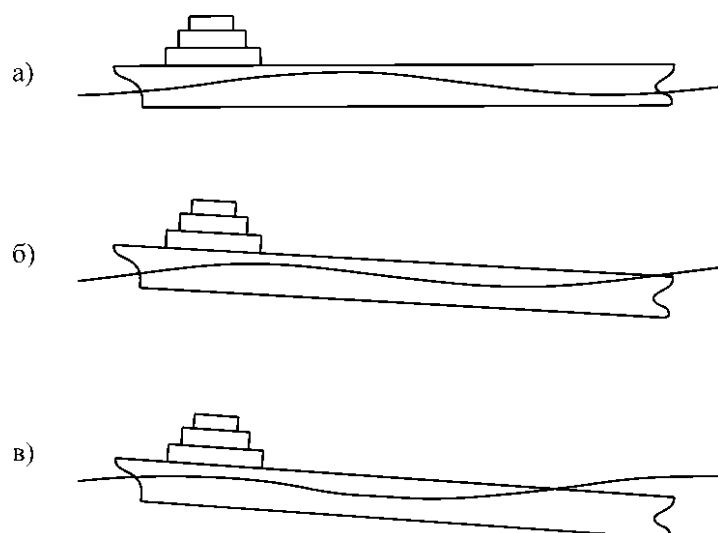


Рис. 3. Результаты моделирования движения судна на волнении

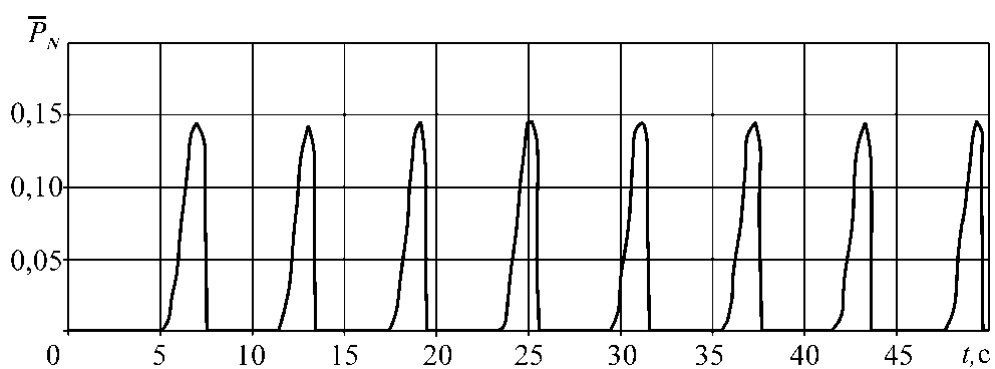


Рис. 4. Экстремальные значения гидродинамической силы, действующей на носовую оконечность судна при ее обтекании при погружении в волну

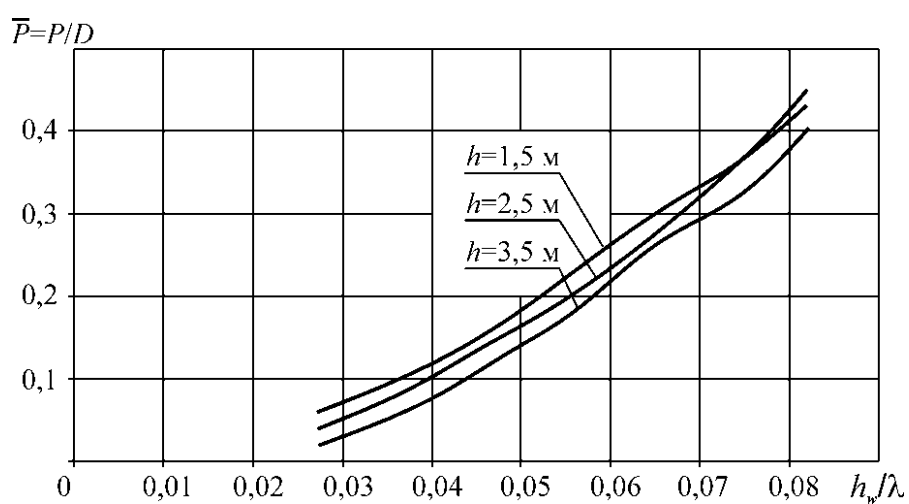


Рис. 5. Зависимость гидродинамического давления на палубу судна в носовой оконечности от высоты волны при захвате волной

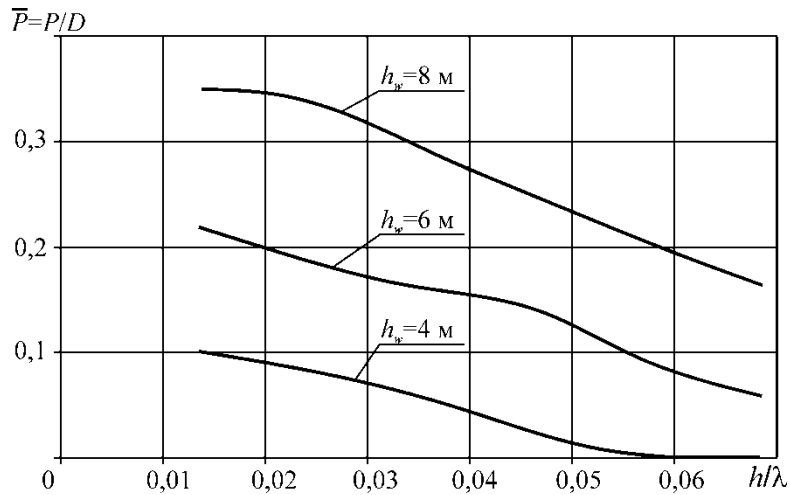


Рис. 6. Зависимость гидродинамического давления на палубу судна в носовой оконечности от высоты надводного борта при захвате волной

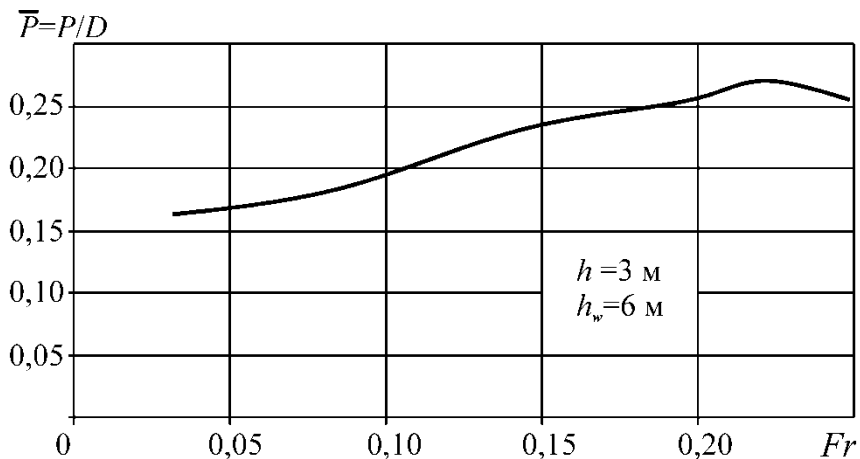


Рис. 7. Зависимость гидродинамического давления на палубу судна в носовой оконечности от скорости хода при захвате волной

Величины расчетных гидродинамических давлений на палубу в носовой оконечности представлены на рис. 4. Видно, что величины экстремальных давлений имеют порядок с. Если сравнить эти значения гидродинамического давления с критическими значениями, ведущими к перевороту судна, которые приведены в предыдущем разделе ( $\bar{P}_{\text{крит}} = 0,135 \cdot D$ ), то можно сделать вывод, что величины гидродинамического давления, полученные по настоящей методике, оказываются на уровне, при котором суда могут быть опрокинуты. Предложенный упрощенный анализ расчета гидродинамических нагрузок на регулярном волнении показывает, что их величина может варьироваться в довольно широких пределах  $\bar{P} = (0,05 \div 0,4) \cdot D$  в зависимости от высоты надводного борта  $h$ , высоты волны  $h_w$ , а также скорости хода судна  $v$  (рис. 5–7).

Так, при увеличении высоты волны экстремальные значения давлений на палубу в носовой оконечности судна растут (рис. 5), а с увеличением высоты надводного борта – падают (рис. 6). Увеличение скорости хода судна с  $Fr = 0,03$  до  $Fr = 0,22$  приводит к возрастанию давления на палубу примерно с  $\bar{P} = 0,16$  до  $\bar{P} = 0,27$  (рис. 7). Как видно из представленных графиков, диапазон давлений, генерируемых при захвате волной

носовой оконечности судна, изменяется в достаточно широких пределах, что создает реальную опасность гибели практически любых судов, имеющих плоские участки палуб в носовой оконечности. Снизить вероятность гибели судов возможно как путем разработки эффективных успокоителей продольной качки, позволяющих ограничить глубину «зарывания» носовой оконечности судна в воду, так и ограничений гидродинамической силы за счет изменения архитектуры судов в носовой оконечности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Благовещенский, С.Н. Качка корабля / С.Н. Благовещенский. – Л.: Судпромгиз, 1954. – 520 с.
2. Благовещенский, С.Н. Справочник по статике динамике корабля. В 2 т. Т. 2. Динамика (качка) корабля / С.Н. Благовещенский, А.Н. Холодилин. – Л.: Судостроение, 1976. – 176 с.
3. Бураковский, Е.П. Некоторые проблемы обеспечения общей прочности судов в чрезвычайных ситуациях / Е.П. Бураковский, П.Е. Бураковский // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2014. – Вып. 82(366). – С. 21–30.
4. Бураковский, Е.П. Эксплуатационная прочность судов: учеб. / Е.П. Бураковский, Ю.И. Нечаев, П.Е. Бураковский, В.П. Прохнич. – СПб.: Лань, 2017. – 404 с.
5. Бураковский, П.Е. Разработка конструктивных решений, направленных на предотвращение захвата волной носовой оконечности судна / П.Е. Бураковский // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия «Морская техника и технология». – 2017. – № 2. – С. 7–14.
6. Нечаев, Ю.И. Теория катастроф: современный подход при принятии решений / Ю.И. Нечаев. – СПб.: Арт-Экспресс, 2011. – 392 с.
7. Бураковский, П.Е. Построение алгоритма контроля ситуации захвата волной носовой оконечности судна методами современной теории катастроф / П.Е. Бураковский, Ю.И. Нечаев // Известия КГТУ. – Калининград: ФГБОУ ВПО «КГТУ», 2015. – № 37. – С. 178–185.

#### **DETERMINATION OF HYDRODYNAMIC PRESSURES ON DECKS OF VESSELS AT FORE END IN STORMY CONDITIONS OF NAVIGATION**

Burakovskiy Evgeny Petrovich, Doctor of Technical Sciences, professor  
Burakovskiy Pavel Evgenievich, Ph. D., assistant professor

Baltic fishing fleet state academy FSBEI HE "KSTU", Kaliningrad, Russia,  
e-mail: e\_burakovsky@mail.ru

*The present work is devoted to the problem of ensuring the safety of ships in stormy conditions. Equations of non-linear pitching of the vessel are obtained taking into account the flooding of the fore end in a counter-wave, the results of the simulation are presented. It is shown that the resulting hydrodynamic force can lead both to the overturning of the vessel and to the destruction of its hull. The necessity of improving the design of the bow ends of hulls of sea ships is substantiated.*



## **УЧЕТ УПРУГИХ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИИ ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ ЛОКАЛЬНО ЗАГРУЖЕННЫХ ШПАНГОУТОВ В ЗАПРЕДЕЛЬНОМ СОСТОЯНИИ**

Бураковский Евгений Петрович, д-р техн. наук, профессор  
Бураковский Павел Евгеньевич, канд. техн. наук, доцент  
Мысник Артем Владимирович, аспирант

Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО  
«КГТУ», Калининград, Россия, e-mail: artem9306@gmail.com

*В настоящей работе представлена методика расчета балок судовых перекрытий в запердельном состоянии, позволяющая учитывать упругие свойства звеньев образующегося кинематически изменяемого механизма. Выполнено сопоставление результатов расчета с использованием предложенной методики и упрощенных решений, в которых звено принималось абсолютно жестким*

Главной причиной повреждений бортовых перекрытий судов является действие интенсивных локально распределенных нагрузок. Поэтому для объективной оценки технического состояния корпусов судов, разработки эффективных схем подкрепления и оптимизации весовых характеристик корпусных конструкций необходимо располагать методами расчета корпусных конструкций за пределом упругости. В рамках гипотезы «о мгновенном раскрытии пластических шарниров» были разработаны методики расчета балок судовых корпусов в упруго-пластической стадии, в том числе в запердельном состоянии [1-4]. При этом до образования кинематически изменяемого механизма расчет сводится к рассмотрению локально загруженной упруго-пластической балки, лежащей на многослойном упруго-пластическом основании, роль которого выполняет бортовая обшивка. Параметры жесткости данного основания изменяются при достижении его прогибами пороговых величин и определяются путем построения и аппроксимации зависимости сила – прогиб балки-полоски обшивки. После образования кинематически изменяемого механизма дальнейшее нагружение конструкции сопровождается движением внешнего нестационарного пластического шарнира к месту нагружения, а звенья кинематически изменяемого механизма считаются абсолютно жесткими [3,4]. В таком случае действующие на обрушившиеся звенья шпангоута реакции со стороны упруго-пластического основания, роль которого выполняет бортовая обшивка, изменяются по длине звена по линейному закону. Однако в действительности звенья шпангоута изгибаются под действием внешней нагрузки и реакций упруго-пластического основания, вследствие чего силы поддержания изменяются по длине звена по закону, отличному от линейного. Для оценки влияния данного эффекта на поведение локально загруженных балок судовых корпусов в запердельном состоянии в настоящей работе выполнено исследование деформирования шпангоута под действием сосредоточенной силы после образования кинематически изменяемого механизма с учетом упругих свойств балки.

В отличие от [3, 4] для описания деформирования шпангоута в запердельном состоянии воспользуемся дифференциальным уравнением балки, лежащей на упругом основании, и работающей в условиях сложного изгиба [5]:

$$EI \cdot w''''(x) - T \cdot w''(x) + k \cdot w(x) = q(x), \quad (1)$$

где  $EI$  – жесткость балки по отношению к изгибу;  
 $w(x)$  – упругая линия балки;  
 $T$  – продольная сила;  
 $k$  – коэффициент жесткости упругого основания;  
 $q(x)$  – интенсивность внешней распределенной нагрузки, действующей на балку.

Решение данного уравнения имеет вид [5]

$$w(x) = C_1 \operatorname{ch}(\delta \cdot x) \cdot \cos(\gamma \cdot x) + C_2 \operatorname{ch}(\delta \cdot x) \cdot \sin(\gamma \cdot x) + C_3 \operatorname{sh}(\delta \cdot x) \cdot \cos(\gamma \cdot x) + C_4 \operatorname{sh}(\delta \cdot x) \cdot \sin(\gamma \cdot x) + \frac{q(x)}{k}, \quad (2)$$

где

$$\delta = \alpha \sqrt{1 + \beta}; \quad (3)$$

$$\gamma = \alpha \sqrt{1 - \beta}; \quad (4)$$

$$\alpha = \sqrt[4]{\frac{k}{4 \cdot E \cdot I}}; \quad (5)$$

$$\beta = \frac{T}{2\sqrt{E \cdot I \cdot k}}. \quad (6)$$

Для балки, лежащей на упруго-пластическом основании с линейным упрочнением, после образования кинематически изменяемого механизма возможны три варианта деформирования в зависимости от прогибов звена: все звено лежит на основании с жесткостью  $k_1$ , звено лежит одновременно на основаниях с жесткостью  $k_1$  и  $k_2$ , все звено находится на основании с жесткостью  $k_2$ . Рассмотрим первый случай (рис. 1,а), граничные условия для которого имеют вид

$$w''(0) = -\frac{M_1(T)}{EI}; \quad (7)$$

$$w'''(0) = \frac{P}{2EI} + \frac{T}{EI} \cdot w'(0); \quad (8)$$

$$w''(l) = \frac{M_2(T)}{EI}; \quad (9)$$

$$w'''(l) = 0, \quad (10)$$

где  $P$  – внешняя нагрузка, действующая на шпангоут;  
 $M_1(T)$  – предельный момент сечения шпангоута при сжатом присоединенном пояске (центральный пластический шарнир);  
 $M_2(T)$  – предельный момент сечения шпангоута при растянутом присоединенном пояске (внешний нестационарный пластический шарнир).

Значения моментов  $M_1(T)$ ,  $M_2(T)$  определяются в соответствии с [6,7] в зависимости от профиля балки шпангоута, а продольная сила  $T$  может быть найдена из уравнения совместности деформаций [3,4]:

$$T = \frac{E \cdot F \cdot K_{\text{ршп}}}{l} \cdot \left[ \frac{1}{2} \int_0^l [w'(x)]^2 dx - \sum_i \theta_i \frac{\partial M_i(T)}{\partial T} \right], \quad (11)$$

где  $E$  – модуль Юнга;  
 $F$  – площадь сечения профиля шпангоута;  
 $K_{\text{ршп}}$  – коэффициент распора шпангоута;  
 $w(x)$  – упругая линия шпангоута;  
 $l$  – длина звена шпангоута;  
 $\theta_i$  – угол слома в  $i$ -м пластическом шарнире;  
 $M_i(T)$  – предельный момент сечения для  $i$ -го пластического шарнира.

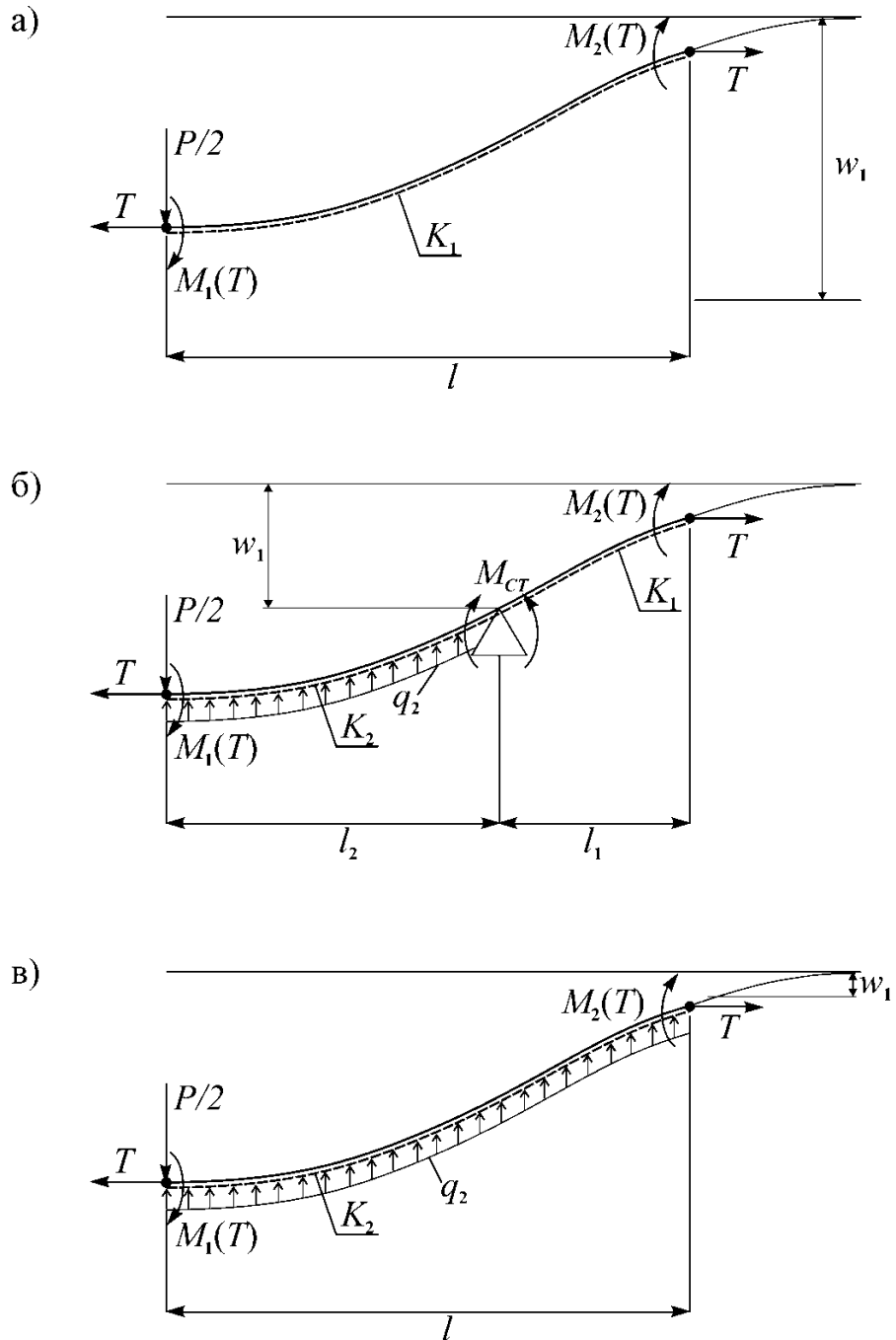


Рис. 1. Расчетные схемы шпангоута в предельном состоянии

Коэффициент распора шпангоута определяется в соответствии с [1,3,4]

$$K_{\text{рши}} = \frac{0,08 + 0,6 \frac{2 \cdot l}{a}}{1,08 + 0,6 \frac{2 \cdot l}{a}}, \quad (12)$$

где  $a$  – шпация перекрытия.

После определения постоянных интегрирования, входящих в (2), в соответствии с граничными условиями (7)-(10) внешняя нагрузка, действующая на балку, увеличивается на величину  $\Delta P$  и определяется новое положение внешнего нестационарного пластического шарнира. При этом изменяется коэффициент распора балки и продольная сила согласно выражениям (11) и (12). Процесс повторяется до тех пор, пока часть звена не перейдет на основание с жесткостью  $k_2$  (рис. 1,б), либо пока продольная сила не достигнет предельного значения  $T_0 = \sigma_T \cdot F$ , где  $\sigma_T$  – предел текучести материала балки. В последнем случае балка превращается в гибкую нить, лежащую на упруго-пластическом основании с переменными характеристиками жесткости.

Если звено одновременно лежит на основаниях с жесткостью  $k_1$  и  $k_2$  (рис. 1,б), то его следует разделить на два участка, каждый из которых находится на основании с одной жесткостью. Установим на границе участков фиктивную опору и будем считать, что деформирование участков балки, лежащих на основаниях жесткостью  $k_1$  и  $k_2$ , описываются упругими линиями  $w_1(x)$  и  $w_2(x)$  соответственно. При этом начало координат для каждого из участков балки примем на их левом конце, прогибы  $w_1(x)$  будем отсчитывать от недеформированного состояния шпангоута, а прогибы  $w_2(x)$  от порогового значения  $w_1$ , при котором происходит смена жесткости упруго-пластического основания шпангоута. Запишем граничные условия для каждого из участков балки:

$$w_2''(0) = -\frac{M_1(T)}{EI}; \quad (13)$$

$$w_2'''(0) = \frac{P}{2EI} + \frac{T}{EI} \cdot w'(0); \quad (14)$$

$$w_2''(l_2) = \frac{M_{CT}}{EI}; \quad (15)$$

$$w_2(l_2) = 0; \quad (16)$$

$$w_1''(0) = \frac{M_{CT}}{EI}; \quad (17)$$

$$w_1(0) = w_1; \quad (18)$$

$$w_1''(l_1) = \frac{M_2(T)}{EI}; \quad (19)$$

$$w_1'''(l_1) = 0, \quad (20)$$

где  $M_{CT}$  – изгибающий момент, действующий на фиктивной опоре, установленной в месте изменения жесткости упруго-пластического основания с  $k_1$  на  $k_2$ .

Значение изгибающего момента  $M_{CT}$  может быть найдено из условия равенства углов поворота сечений балки слева и справа от фиктивной опоры, в районе которой

происходит смена жесткости основания, т.е.

$$w_2'(l_2) = w_1'(0). \quad (21)$$

В том случае, если все звено лежит на основании с жесткостью  $k_2$  (рис. 1,в), граничные условия определяются выражениями (7)-(10). Но в отличие от варианта деформирования, представленного на рис. 1,а, все звено будет загружено распределенной нагрузкой интенсивностью  $q_2 = k_1 \cdot w_1$ , направленной против действия внешней нагрузки  $P$ .

Результаты расчета по предложенной методике (кривая 1) представлены на рис. 2, где  $P_2$  – нагрузка, приводящая к образованию в балке кинематически изменяемого механизма;  $f$  – прогиб балки в месте нагружения;  $a$  – шпация перекрытия. На рисунке также представлена зависимость сила – прогиб для той же балки набора, построенная с использованием допущения об абсолютной жесткости звеньев кинематически изменяемого механизма (кривая 2) [3,4]. Расчет выполнялся для шпангоутов, изготовленных из несимметричного полосульба 18а, шпация бортового перекрытия принималась равной 600 мм, толщина обшивки  $t = 13$  мм.

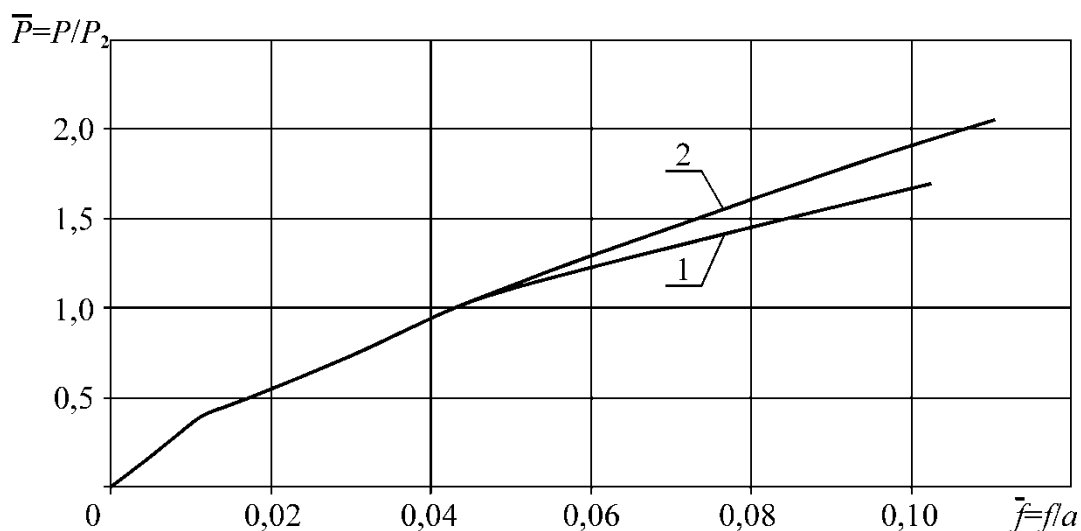


Рис. 2. Зависимости сила – прогиб для локально загруженного шпангоута:  
1 – деформирование звена описывается дифференциальным уравнением; 2 – жесткое звено

Видно, что в зоне больших прогибов наблюдается некоторое расхождение при расчете с использованием различных допущений. Следует заметить, что использование дифференциального уравнения (1) для описания деформирования балки набора в запредельном состоянии сопряжено с возникновением погрешности, увеличивающейся с ростом прогибов, т.к. в уравнение (1) не входят слагаемые, нелинейные относительно функции  $w(x)$  и ее производных. Кроме того, использование расчетных методик [3,4], в рамках которых обрушившиеся звенья балки набора считаются недеформируемыми, позволяет производить расчет по упрощенным формулам. Это позволяет ускорить процесс вычисления, что делает возможным использование методик [3,4] при разработке бортовых интеллектуальных систем контроля прочности судов, когда требуется выполнять расчет конструкций корпуса для оценки и прогнозирования их технического состояния в режиме реального времени [8, 9].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бураковский, П.Е. Учет жесткости обшивки при деформировании связей судовых бортовых перекрытий, воспринимающих интенсивные локальные нагрузки / П.Е. Бураковский // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова.– 2008.– Вып. 41(325). – С. 157–170.
2. Бураковский, П.Е. К вопросу о выборе жесткости промежуточного шпангоута / П.Е. Бураковский // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова.– 2010.– Вып. 55(339).– С. 57–62.
3. Бураковский, П.Е. Обеспечение прочности корпусных конструкций судов в процессе эксплуатации: монография / П.Е. Бураковский. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2015. – 298 с.
4. Бураковский, Е.П. Эксплуатационная прочность судов: учеб. / Е.П. Бураковский, Ю.И. Нечаев, П.Е. Бураковский, В.П. Прохнич. – СПб.: Лань, 2017. – 404 с.
5. Короткин, Я.И. Строительная механика корабля и теория упругости. В 2 т. Т. 1. Изгиб и устойчивость стержней и стержневых систем / Я.И. Короткин, В.А. Постнов, Н.Л. Сиверс. – Л.: Судостроение, 1968. – 424 с.
6. Апполонов, Е.М. Предельные нагрузки и упругопластическое деформирование судовых балочных конструкций / Е.М. Апполонов, О.В. Таровик. – СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2012. – 128 с.
7. Беленький, Л.М. Расчет судовых конструкций в пластической стадии / Л.М. Беленький. – Л.: Судостроение, 1983. – 448 с.
8. Бураковский, П.Е. Практическая реализация графоаналитической системы контроля прочности промысловых судов при посадке на мель, столкновении судов и входе в ледовое поле на основе современной теории катастроф / П.Е.
9. Бураковский, Ю.И. Нечаев // Морские интеллектуальные технологии.– 2014.– №3(25).– С.99–104.
10. Бураковский, П.Е. Практическая реализация графоаналитической системы контроля эксплуатационной прочности промысловых судов при коррозии корпуса, швартовых операциях и восприятии многократных нагрузок на основе современной теории катастроф / П.Е. Бураковский, Ю.И. Нечаев // Морские интеллектуальные технологии.– 2014.– №4(26).– Т. 2.– С. 24–31.

### **CONSIDERATION OF ELASTIC PROPERTIES OF CONSTRUCTION IN DEFORMATION OF LOCALLY LOADED BEAMS IN EXTREME STATE**

Burakovskiy Evgeny Petrovich, Doctor of Technical Sciences, professor  
Burakovskiy Pavel Evgenievich, Ph. D., assistant professor  
Mysnik Artem Vladimirovich, postgraduate student

Baltic fishing fleet state academy FSBEI HE "KSTU", Kaliningrad, Russia,  
e-mail: artem9306@gmail.com

*The work represents a technique for calculating beams of ship's overlapping in an over-bound state, allowing to take into account the elastic properties of the links of the resulting kinematically variable mechanism. The results of the calculation are compared using the proposed methodology and simplified solutions, in which the link was taken absolutely rigid.*

## **СНИЖЕНИЕ ТРУДОЕМКОСТИ ЗАЩИТЫ СВАРНЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ОТ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ КОРРОЗИИ**

Веревкин Валерий Иванович, профессор, д-р техн. наук  
Игушев Валерий Федорович, доцент, канд. техн. наук  
Терюшева Светлана Александровна, доцент, канд. хим. наук

Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО  
«КГТУ», Калининград, Россия, e-mail: Verevkin1945@mail.ru

*Для снижения склонности к электрохимической коррозии сварной металлоконструкции при изготовлении или ремонте её из близких по свойствам и толщинам заготовок (прежде всего – обшивок морских судов и металлических трубопроводов широкого назначения) предложено снижать термоэлектродвижущие силы (ТЭДС), возникающие в сварных соединениях заготовок. За счет перестановок добиваются снижения ТЭДС во всех сварных соединениях обшивок. Многократное снижение трудозатрат и времени на постановку защиты обеспечивается, прежде всего, за счет значительного сокращения объема экспериментальных работ, необходимых для оптимизации взаимного расположения заготовок*

Наибольшие разрушения от коррозии сварных металлоконструкций, в том числе, обшивок судов, нефте- и газопроводов, несет электрохимическая коррозия. Причем разрушения происходят, прежде всего, в сварных соединениях.

Главной причиной этого явления является эффект Зеебека, вызывающий термоэлектродвижущую силу (ТЭДС) между сваренными деталями в условиях высокой электропроводности окружающей жидкости, например, морской воды. Две детали, даже выполненные из одной и той же стали, обязательно отличаются химическими составами. Зональная температура морской воды почти всегда несколько отличается от температуры корпуса судна. В результате сваривания этих деталей образуется термопара, многократно ускоряющая в условиях электропроводящей морской воды процесс коррозии шва и околошовной зоны.

Скорость износа сварных швов чрезвычайно высока – достигает 1,0-3,0 мм/год, в то время как скорость коррозии наружной обшивки в подводной части корпуса судна много ниже, и не превышает 0,19 мм/год [1].

Известны различные способы защиты от коррозии [1]. Среди них наибольшее применение получили электрохимические (катодная и протекторная) способы в сочетании с лакокрасочными противокоррозионными покрытиями. Данные способы трудо- и материально затратные, и имеют ограниченный срок действия, т.е., требуют периодического повторения.

Также известен способ защиты от коррозии сварной металлоконструкции, включающий нанесение сплошного высокоэлектропроводящего слоя на поверхность деталей с обратной стороны сварного шва [2]. Однако наименее защищенными при использовании данного способа оказываются слои материала, наиболее удаленные от антикоррозийного покрытия. То есть те, которые непосредственно контактируют с морской водой, и для защиты которых и направлен способ.

Перспективным способом защиты является способ снижения самих ТЭДС, а, значит, и подавления электрохимической коррозии зон сварки корпуса морского объекта [3]. Измеряют максимальные значения ТЭДС между всеми предназначенными для сварной металлоконструкции заготовками и расставляют заготовки в металлоконструкции так, чтобы минимизировать в среднем по всем фактически образующимся контактам значения создаваемых ТЭДС, которые ни в одном из контактов не должны превышать 5-8 мВ. Способ предусматривает измерение большого числа ТЭДС, поэтому трудоемкий и занимает много времени. Кроме того способ не использует полученную на предыдущих стадиях производства металлоконструкции и доступную для использования информацию, способную сократить трудозатраты и ускорить его реализацию во время изготовления или ремонта конструкции.

Была поставлена задача снижения трудоемкости и длительности постановки защиты металлоконструкции от электрохимической коррозии за счет многократного сокращения объема самых трудозатратных операций по измерению ТЭДС сочетаний заготовок в полотнощах, секциях корпусов судов при изготовлении и ремонте. Для решения задачи была предложена следующая технология.

Перед разметкой свариваемые заготовки располагают в непосредственной близости друг от друга. Последовательно измеряют значения термоэлектродвижущих сил, создаваемых в термопарах, образованных в контактах сочетаний заготовок. В ходе каждого акта измерений температур обоих рабочих спаев термопары, образованной в контакте двух заготовок известными регулярными или случайными процедурами, находят наилучшее распределение заготовок в сварной металлоконструкции так, чтобы, во-первых, в среднем по всем образованным контактам листов в металлоконструкции минимизировались максимальные по модулю значения создаваемых термоэлектродвижущих сил, а во-вторых, не превышались предельно допустимые по модулю значения термоэлектродвижущих сил в размере 5-8 мВ. Причем нижний предел используют при повышенных сроках эксплуатации судна, верхний – для рядовых условий. Если условия не выполняются, то заготовки с недопустимо большими термоэлектродвижущими силами в контакте с другими заготовками заменяются на новые и находятся максимальные термоэлектродвижущие силы заменяющих заготовок с другими заготовками. Процесс повторяется вплоть до удовлетворения всех отобранных заготовок обоим условиям. Затем выполняют оставшиеся заготовительные, сборочно-сварочные и антикоррозийные операции.

Для снижения трудоемкости процедуры антикоррозийной защиты предложено многократно сократить объем измерений термоэлектродвижущих сил. Для этого используют существующие элементы технологи производства (проката) заготовок. Как известно, на этапе технического контроля качества проката производят отбор темплетов в трех заготовках каждой партии заготовок (разлитых и прокатанных из одной плавки стали) – в первой, средней и последней. Все заготовки в партиях маркируют, делают экспресс-анализ каждого темплета и вносят данные его химического состава в сертификат качества партии заготовок. Сертификат передается с заготовками на судостроительное или судоремонтное предприятие для реализации. Там перед измерением термоэлектродвижущих сил заготовки предложено распределять по партиям. Из каждой партии изымают и транспортируют на измерительную площадку легко доступную, расположенную сверху пакета последнюю в партии заготовку – заготовку-представитель. На неё, как и на первую заготовку из каждой партии, в сертификате качества имеется информация о её химическом составе.

Все заготовки-представители укладывают в стопу (стопы) с последовательной веерообразной сдвижкой заготовок-представителей относительно вертикальной оси



стопы. Термоэлектродвижущие силы измеряют только между заготовками-представителями всех партий заготовок, а значения термоэлектродвижущих сил каждого из оставшихся контактов всех допустимых в сварной металлоконструкции сочетаний заготовок определяют с привлечением информации из сертификата качества каждой партии заготовок о химическом составе первой и последней заготовок.

По другому варианту технологии экспресс-анализ химических составов первой и последней заготовок каждой партии заготовок выполняют на самих судостроительных или судоремонтных предприятиях. По третьему варианту для расширения технологических возможностей способа значения термоэлектродвижущих сил каждого контакта всех допустимых в сварной металлоконструкции сочетаний заготовок определяют по химическим составам всех заготовок.

Основная идея работы состоит в многократном снижении числа измерений ТЭДС между парами заготовок за счет использования измерений ТЭДС только между выборочными заготовками-представителями, что стало возможным благодаря использованию установленной авторами тесной зависимости ТЭДС между стальными заготовками от разности химических составов этих заготовок. Найдено, что наибольшее влияние на ТЭДС между стальными заготовками оказывают элементы-раскислители. Самое большое и нелинейное влияние оказывает кремний. Затем с большим отрывом следует углерод, алюминий и марганец. Найденная зависимость позволяет восстанавливать результаты пропущенных измерений ТЭДС.

Основной теоретической базой работы является найденный путь скаляризации зависимости ТЭДС от вектора: одновременного действия двух факторов – электрического потенциала одной и второй заготовок, посредством установления заменяющей скалярной количественной зависимости ТЭДС от нескольких факторов – разностей процентных содержаний химических элементов этих двух заготовок: кремния, углерода, алюминия и марганца.

Достоинство данной технологии – ТЭДС двух партий заготовок (общей массой до 700 т.) может быть определен всего лишь по четырем замерам химического состава и двум замерам ТЭДС.

Основу для реализации предложенной технологии составляет экспресс-анализ химического состава заготовок, проводимый на стадии их производства на металлургическом предприятии (при литье стали на установках непрерывной разливки стали, а также при последующем прокате непрерывно-литых заготовок на листопрокатном стане) в трех заготовках каждой партии заготовок (разлитых и прокатанных из одной плавки стали) – в первой, средней и последней. Эта информация вносится в сертификат качества партии заготовок и передается потребителю металлопродукции. При этом все прокатанные заготовки (листы) маркируются. По другому варианту технологии предлагается выполнение экспресс-анализов первой и последней заготовок каждой партии непосредственно на судостроительном или судоремонтном предприятии, что однако требует дополнительных финансовых и временных затрат со стороны этих предприятий. По третьему варианту технология расширяет возможности его использования при отсутствии на судостроительном или судоремонтном предприятии устройства по замеру ТЭДС, при ограниченном объеме сварочных работ, при утрате сертификатов на металлопродукцию, нарушении маркировки заготовок, и т.п. В этом случае все измерения ТЭДС заменяют на эквивалентное их определение по данным проводимого экспресс-анализа химических составов заготовок.

Значения термоэлектродвижущих сил каждого контакта всех допустимых в сварной металлоконструкции сочетаний заготовок определяют по химическим составам заготовок. Вместо прямых измерений эквивалентные значения ТЭДС всех

контактов заготовок определяют, например, при отсутствии на судостроительном или судоремонтном предприятии устройства по замеру ТЭДС, при ограниченном объеме сварочных работ, при утрате сертификатов на металлопродукцию, нарушении маркировки заготовок (в частности, при долгом и ненадлежащем хранении из-за осыпания на заготовках маркировочной краски). Чаще других подобная необходимость возникает при проведении ремонтно-восстановительных работ на обшивке судна. При этом число заменяемых листов ограничено и обычно не превышает нескольких десятков.

Для снижения систематической ошибки измерения описанный опыт по измерению максимальных ТЭДС термопары в контакте данных заготовок-представителей повторяется не менее трёх раз и результаты опытов усредняются.

Затем измерения повторяются во всех термопарах, образованных в контактах всех допустимых в сварной металлоконструкции сочетаний заготовок-представителей. То есть, измерения проводятся во всех оставшихся сочетаниях заготовок-представителей.

Общее число сочетаний из  $m$  заготовок-представителей по 2

$$C_m^2 = \frac{m!}{2(m-2)!} = \frac{m(m-1)}{2}, \quad (1)$$

где  $m$  – общее число анализируемых заготовок-представителей.

Например, при  $m = 10$   $C_m^2 = \frac{10 \cdot 9}{2} = 45$  измерений ТЭДС. Это количество измерений бригада из трех человек выполняет примерно в течение двух часов, что примерно в 180 раз меньше, чем затраты времени на измерения ТЭДС в работе [3].

Значения ТЭДС каждого из оставшихся контактов всех допустимых в сварной металлоконструкции сочетаний заготовок определяют по соотношению:

$$u(i, j, x, y), \text{ мВ} = u(x, y) + \Delta U(i, x, y) + \Delta U(j, x, y) \quad (\text{в мВ}), \quad (2)$$

где:

$u(i, j, x, y)$  – ТЭДС (в мВ) между  $i$ -той заготовкой  $x$ -той партии и  $j$  заготовкой  $y$ -той партии,

$u(x, y)$  – ТЭДС (в мВ), измеренная между заготовками-представителями  $x$ -той и  $y$ -той партий заготовок,

$\Delta U(i, x, y)$  – поправка приведения ТЭДС (в мВ), измеренной между заготовками-представителями  $x$ -той и  $y$ -той партий заготовок, к условиям измерения между  $i$ -той заготовкой  $x$ -той партии и заготовкой-представителем  $y$ -той партий заготовок:

$$\Delta U(i, x, y) = k_0 + k_1 \Delta Si(i, x) - k_2 \Delta C(i, x) + k_3 \Delta Al(i, x) - k_4 \Delta Mn(i, x) \quad (\text{в мВ}), \quad (3)$$

где  $\Delta Si(i, x)$ ,  $\Delta C(i, x)$ ,  $\Delta Al(i, x)$ ,  $\Delta Mn(i, x)$  – разности химсоставов, соответственно, кремния, углерода, алюминия и марганца между  $i$ -той заготовкой  $x$ -той партии и заготовкой-представителем  $x$ -той партии (в %),

$k_0, k_1, k_2, k_3, k_4$  – коэффициенты (в мВ/%),

$\Delta U(j, x, y)$  – поправка приведения ТЭДС, измеренной между заготовками-представителями  $x$ -той и  $y$ -той партий заготовок, к условиям измерения между заготовкой-представителем  $x$ -той партий заготовок и  $j$ -той заготовкой  $y$ -той партии:

$$\Delta U(j, x, y) = k_0 + k_1 \Delta Si(j, y) + k_2 \Delta C(j, y) + k_3 \Delta Al(j, y) + k_4 \Delta Mn(j, y) \quad (\text{в мВ}), \quad (4)$$

где  $\Delta Si(j, y)$ ,  $\Delta C(j, y)$ ,  $\Delta Al(j, y)$ ,  $\Delta Mn(j, y)$  – разности химсоставов, соответственно, кремния, углерода, алюминия и марганца между  $j$ -той заготовкой  $y$ -той партии и заготовкой-представителем  $y$ -той партии (в %),

$k_0 = -0,046$ ,  $k_2 = -0,064$ ,  $k_3 = 0,035$ ,  $k_4 = -0,003$  – коэффициенты (в мВ/%),

а коэффициент  $k_1$  находят по таблице:

Значение коэффициента  $k_I$  от разности химсоставов

$Si(j, y), (\%)$	$Si(y), (\%)$	$\Delta Si(j, y), (\%)$	$k_I, (мВ/\%)$
$\leq 0,30$	$\leq 0,30$	$\leq 0,30$	0,184
$\leq 0,30$	$> 0,30$	$\leq 0,30$	0,107
$\leq 0,30$	$> 0,30$	$> 0,30$	0,069
$> 0,30$	$\leq 0,30$	$\leq 0,30$	0,107
$> 0,30$	$\leq 0,30$	$> 0,30$	0,069
$> 0,30$	$> 0,30$	$\leq 0,30$	0,031
$> 0,30$	$> 0,30$	$> 0,30$	0,031

$\Delta Si(j, y), \Delta C(j, y), \Delta Al(j, y), \Delta Mn(j, y)$  находят линейной интерполяцией.

Например,  $\Delta Si(j, y)$  определяют следующим образом:

По сертификату определяют  $n$  – число заготовок в  $y$  –той партии заготовок.

1. По сертификату определяют  $Si(1, y)$  и  $Si(n, y) = Si(y)$  – соответственно, содержание кремния в 1-ой и последней  $n$ -ой (являющейся заготовкой-представителем) заготовках  $y$  –той партии заготовок.

2. Определяют число заготовок, содержащихся между  $j$  -той и последней  $n$  -ой заготовками  $y$  -той партии заготовок:

$$s = n - j.$$

3. Линейной интерполяцией находят содержание кремния в  $j$  -той заготовке  $y$  -той партии заготовок:

$$Si(j, y) = Si(n, y) - \frac{[Si(n, y) - Si(1, y)]}{n} \cdot s, \quad (5)$$

Поскольку все анализируемые заготовки относятся к одной партии, а значит их химический состав лежит в узких пределах ГОСТовской марки стали, то линейная интерполяция дает хорошее приближение к фактическому химическому составу каждой заготовки. В то же время, проведение экспресс-анализа ещё и средней заготовки партии позволяет также использовать его результаты для более точной нелинейной (параболической) аппроксимации результатов измерений химического состава заготовок по партии. Таким образом проводят ещё более точную нелинейную интерполяцию содержания кремния в  $j$  -той заготовке  $y$  -той партии заготовок.

4. Находят разности химсостава заготовок между  $j$  -той заготовкой  $y$  -той партии и заготовкой-представителем  $y$  -той партии (в %):

$$\Delta Si(j, y) = Si(j, y) - Si(y) = Si(j, y) - Si(n, y). \quad (6)$$

Остальные разности химсоставов ( $\Delta C(j, y), \Delta Al(j, y), \Delta Mn(j, y)$ ) находят аналогично.

Экспресс-анализ химических составов первой и последней заготовок каждой партии заготовок могут выполнять и на самих судостроительных или судоремонтных предприятиях. При этом маркировка заготовок, произведенная на металлургическом предприятии, позволяет расположить заготовки в соответствии с порядком проката заготовок и выделить реперные заготовки – первую, среднюю и последнюю – заготовку-представитель.

При необходимости вместо прямых измерений эквивалентные значения ТЭДС всех контактов заготовок определяют по химическим составам всех заготовок.

Например, при отсутствии на судостроительном или судоремонтном предприятии устройства по замеру ТЭДС, при ограниченном объеме сварочных работ, при утрате сертификатов на металлопродукцию, нарушении маркировки заготовок (в частности, при долгом и ненадлежащем хранении из-за осыпания на заготовках маркировочной краски). В частности, при проведении ремонтно-восстановительных работ на обшивке судна.

Далее известными регулярными или случайными процедурами находят наилучшее распределение заготовок в сварной металлоконструкции так, чтобы, во-первых, в среднем по всем фактически образованным контактам листов в металлоконструкции минимизировались максимальные по модулю значения создаваемых ТЭДС, во-вторых, не превышались предельно допустимые значения ТЭДС в размере 5-8 мВ (где нижний предел используют при повышенных сроках эксплуатации судна, верхний – для рядовых условий) в фактическом контакте хотя бы одной пары заготовок. В качестве процедур определения наилучшего распределения заготовок применяют известные методы упорядочения: линейного и динамического программирования, доминирования, ветвей и границ и др.

Если условия не выполняются, то заготовки с недопустимо большими термоэлектродвижущими силами в контакте с другими заготовками заменяются на новые и находятся максимальные термоэлектродвижущие силы заменяющих заготовок с другими заготовками, процесс повторяется вплоть до удовлетворения всех отобранных заготовок обоим условиям. После чего выполняют оставшиеся заготовительные, сборочно-сварочные и антикоррозийные операции.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев, Н.Т. Ремонт судов [Текст]: монография / Н.Т. Андреев, О.А. Борчевский, В.Г. Луговых [и др.]. - Л.: Судостроение, 1972. 568 с.
2. Способ защиты от коррозии сварной металлоконструкции [Текст]: пат. 2476621 Рос. Федерация: МПК С 23 F 13/00, С 23 С 4/08/ Веревкин В.И.; Лисевич В.И.; Астраух О.В.; Терюшева С.А.; Зеброва Е.М.; заявитель и патентообладатель Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота. - № 2011100923/02; заявл. 12.01.2011; опубл. 20.07.11, Бюл. № 6. - 7 с.: ил.
3. Способ и устройство защиты от электрохимической коррозии сварной металлоконструкций [Текст]: пат. 2571293 Рос. Федерация: МПК С23F 13/00/ Веревкин В.И.; заявитель и патентообладатель Калининградский государственный технический университет. - № 2014105150/02; заявл. 12.02.2014; опубл. 20.12.2015, Бюл. № 35. - 8 с.: ил.

#### **REDUCTION OF THE WORKING PROCESS OF WELDING PROTECTION METAL-CONSTRUCTIONS FROM ELECTROCHEMICAL CORROSION**

Verevkin Valery Ivanovich, Professor, Doctor of Technical Sciences

Igushev Valery Fedorovich, Associate Professor, Ph.D.

Teryusheva Svetlana Aleksandrovna, Associate Professor, Ph.D.

Baltic fishing fleet state academy FSBEI HE "KSTU", Kaliningrad, Russia,

e-mail: Verevkin1945@mail.ru

To reduce the tendency to electrolytic corrosion of welded metallokonstruktion in the manufacture or repair it from similar properties and thicknesses of the workpieces (primarily -

skins of marine vessels and metal conduits wide assignment) proposes to reduce the thermal electromotive force (TEDS) occurring in welded joints blanks . Due to the permutations, the reduction of the thermoelectric power in all welded joints is achieved. Multiple reduction in labor costs and time for setting up protection is provided, first of all, due to a significant reduction in the amount of experimental work required to optimize the mutual arrangement of blanks.

УДК 001.4

## **АНАЛИЗ ПРИМЕНЯЕМОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ОБЪЕКТОВ МОРСКОЙ ТЕХНИКИ К АДДИТИВНОМУ ПРОИЗВОДСТВУ И ИХ ДАЛЬНЕЙШИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ**

Десятьев Александр Владимирович, магистрант  
Морозов Владимир Николаевич, доцент, канд. техн. наук

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,  
Калининград, Россия, e-mail: nwasanches@mail.ru; mvn3613@gmail.com

*Цель работы – дать оценку аспектов внедрения аддитивных технологий в современную судостроительную промышленность на основе анализа применяемости изделий объектов морской техники и их элементов, а также сравнения физико-механических и технико-экономических параметров традиционного и инновационного видов производств. Новизна исследования заключается в сравнительных и аналитических факторах изучения объектов, изготовленных разными технологиями. Выводы – составлены концептуальные сроки по серийному производству объектов морской техники аддитивными способами*

### **Введение**

Наука не стоит на месте. В современном мире получили жизнь такие изобретения, о которых в прошлом веке можно было точно мечтать. Если технология трехмерной печати раньше считалась весьма диковинным способом производства объектов, то, на сегодняшний день, она нашла свое применение при производстве как небольших по размеру комплектующих, так и крупных конструкций в различных сферах деятельности.

С появления первого прототипа современного 3D-принтера прошло уже около 35-ти лет. С этого времени в сфере аддитивных технологий было совершено множество важных научных открытий и изысканий: от продажи первого станка (1992 г.) до активного насыщения ими рынка (2000-ые гг.); от появления самого термина «трехмерная печать» (1996 г.) до защиты диссертаций по этой тематике (2005 г.); от разработки самовоспроизводимой модели 3D-принтера (2006 г.) до печатания домов (2015 г.), гребных винтов (2017 г.) и подписания пакта документации по разработке промышленной 3D-печати для нужд населения (2016 г.).

Сама терминология – «3D-принтер» и «аддитивные технологии» - являются, на сегодняшний день, одними из главных мировых трендов, упоминаемых в контексте новой промышленной революции. Ежегодный рост этого рынка, который еще не сформирован и не имеет четких границ, варьируется в пределах 20-30%.

## **1. Применяемость объектов морской техники и их элементов к аддитивному производству**

Относительно применимости аддитивных технологий к современному судостроительному производству на базе исследований [1-3], а также по личным аналитическим теоретическим суждениям, можно утверждать, что на данный момент массово запустить в производство аддитивными методами можно лишь изделия судового машиностроения из любых материалов, элементы корпусов из полимерных композиционных материалов, судовое насыщение, корпуса деревянных судов их материалов полимерного ряда – заменителей древесины [4], а также массово производить модели судов для испытаний в опытовых бассейнах и выставочных экспозициях.

Основные направления аддитивных технологий можно поделить на две структурные составляющие: для полимерных и металлических материалов. К первому относятся и песчано-полимерные смеси, ко второму – металлопорошки и композиции, а также титановые, жаропрочные и нержавеющие сплавы.

Для полимерных материалов основными направлениями можно считать следующее:

- быстрое прототипирование и испытания;
- модели для литейных форм;
- литейные песчано-полимерные формы.

Для материалов на основе металлических порошков:

- заготовки из металла для последующей металлической обработки;
- готовые изделия из металла;
- сокращение числа сборочных единиц.

Применяемость изделий судостроения по отношению к аддитивным технологиям оценена в таблице 1 при допущении, что изготовление указанных в таблице деталей носит серийный, не единичный характер. Также, в таблице рассматривается три этапа внедрения и развития аддитивных технологий в судостроении, оцененных согласно известного закона Мура [5].

*Таблица 1*

### **Оценка параметров применимости объектов морской техники и их элементов относительно аддитивной технологии производства**

<b>№ п/п</b>	<b>Сегодня (T – Today)</b>	<b>Недалекое будущее (NF – Near Future) - &lt; 10-15 лет</b>	<b>Далекое будущее – (DF – Distant Future) – ок. 40 лет</b>
1.	изделия судового машиностроения	гребные винты крупнотоннажных судов	секции любых габаритов и сложности
2.	модели судов	небольшие секции со сложными обводами	блок-секции любой сложности
3.	элементы корпусов из композитных полимерных материалов	элементы сложного гнутого набора	судно целиком
4.	элементы деревянных судов	сложные листовые элементы корпуса	судовые двигатели целиком
5.	судовое насыщение	судовая оснастка	сложные механизмы
6.	гребные винты для маломерных и среднетоннажных судов	суда стояночного флота	самостоятельный ремонт судна путем 3D-прототипирования на борту
7.	оснастка для литейного производства	корпуса деревянных судов целиком	самостоятельное перевооружение судна на борту

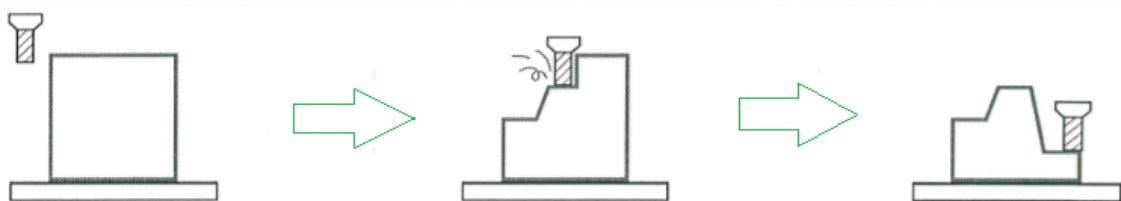
Первый этап относится к сегодняшним технологическим процессам, обеспечивающим изготовления указанных изделий. Представленная продукция, на данный момент, уже массово изготавливается на мировых судостроительных предприятиях аддитивными методами, либо же, их серийное производство наступит в течении двух-трех лет. Для них уже получены опытные образцы, которые прошли необходимые испытания и процедуры по сертификации.

Второй этап – ближайшее будущее. Обозначает изделия, для которых на данный момент формируется теоретическая база технологических процессов изготовления, а некоторые, как например, гребной винт [6] уже изготовлены в единичном экземпляре для отработки технологической схемы. В общем случае, для продукции подобного ряда серийное производство начнется в ближайшее десятилетие.

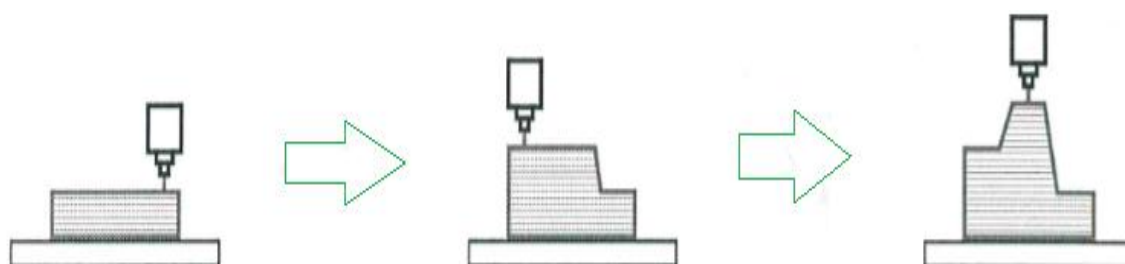
Третий этап – далекое будущее. Обозначает перечень объектов, которые можно будет изготавливать аддитивными технологиями только в перспективе и для которых требуется полный переход на новое производство и полное освоение первых двух этапов.

## ***2. Параметры снижения трудоемкости и временных затрат***

Сравним две технологии изготовления объектов тяжелой промышленности. Традиционная технология, в современном понимании, представляет собой некий технологический процесс, направленный на вынимание изготавливаемого объекта из заготовки или формы (рис. 1). Аддитивные технологии основываются на добавлении материала к детали (рис. 2).



*Рис. 1. Принципиальная технологическая схема изготовления объекта традиционными методами*



*Рис. 2. Принципиальная технологическая схема изготовления объекта аддитивными методами*

Упрощенная последовательность процесса изготовления детали литьем выглядит следующим образом:

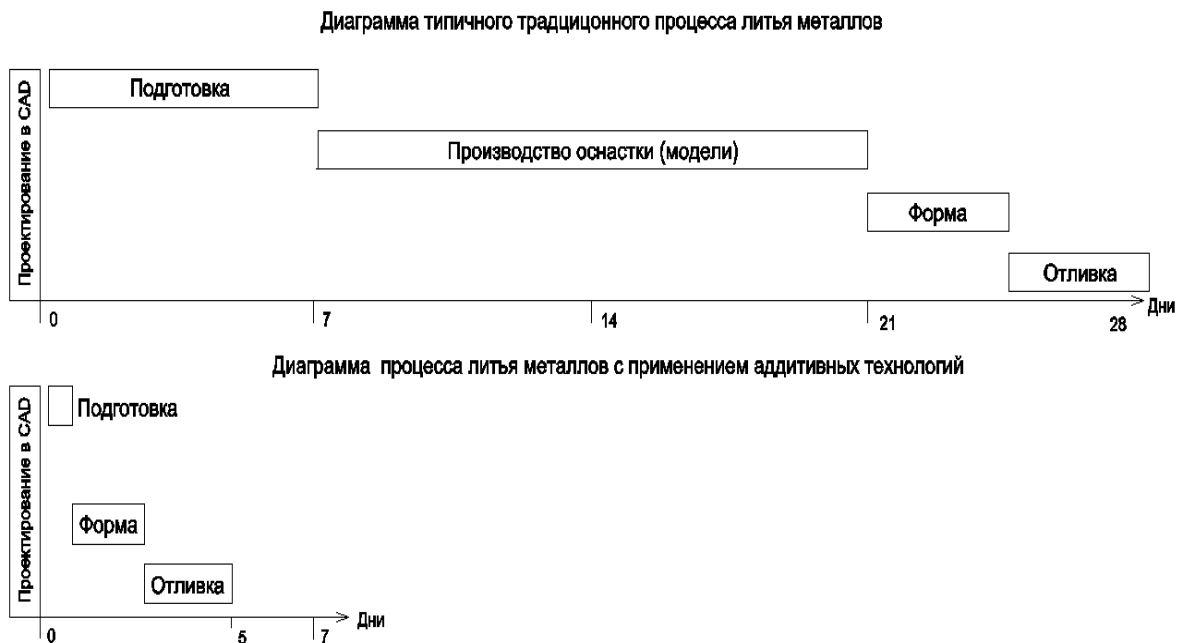
1. Проектирование 2D- или 3D-оснастки;
2. Разработка рабочей конструкторской документации (РКД);
3. Проверка на технологичность;
4. Разработка технологии производства;

5. Выпуск конструкторской документации (КД);
6. Изготовление оснастки;
7. Литье;
8. Термическая обработка;
9. Механическая обработка;
10. Получение готового изделия.

Упрощенная последовательность процесса изготовления детали аддитивными технологиями основывается на следующем:

1. Проектирование 3D-модели;
2. Определение технологии печати;
3. Создание управляющей программы для печати;
4. Печать;
5. Механическая обработка (при возникновении потребности);
6. Получение готового изделия.

Сравнение временных затрат на две технологические схемы согласно данным [7-10] представлено на рис. 3.



*Рис. 3. Сравнение временных затрат при традиционном процессе литья и литья с применением аддитивных технологий*

В результате можно сделать следующие выводы:

- экономия времени достигается свыше 50%;
- появляется возможность гибкого изменения изделия в режиме реального времени;
- происходит сокращение времени на производство более чем в 5 раз, с 4-ех недель до 5-ти дней.

В подтверждении этого, проведем сравнение трудоемкости и временных затрат по двум технологическим схемам на модель корпуса.

Модель корпуса представлена на рис. 4. Диаграмма затрат по видам технологического производства представлена на рис. 5. Данные сведены в табл. 2



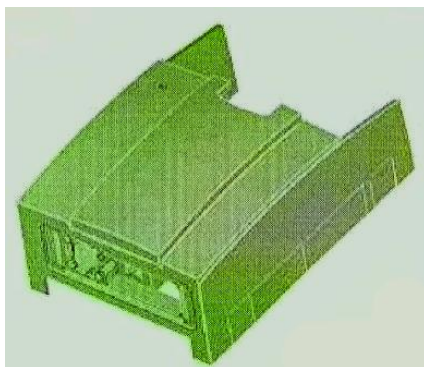


Рис. 4. Модель корпуса

Таблица 2

Сравнение затрат в производстве

№ п/п.	Время исполнения	Аддитивная технология				Традиционная технология		
		5 рабочих дней		15 рабочих дней		Разовые затраты	Цена за ед., €	Итого, €
1.	Количество, ед., €	Цена за ед., €	Итого, €	Цена за ед., €	Итого, €			
2.	5	364	1820	246	1233	Разработка оснастки - 7500	5012	25060
3.	10	332	3315	227	2270	Изготовление оснастки - 16500	2512	25120
4.	50	256	12800	182	9075	Расходы на подготовку - 1000	512	25600
5.	100	224	22350	162	16200	Цена за стержень - 12	262	26200
6.	500	148	74000	117	58250		62	31000

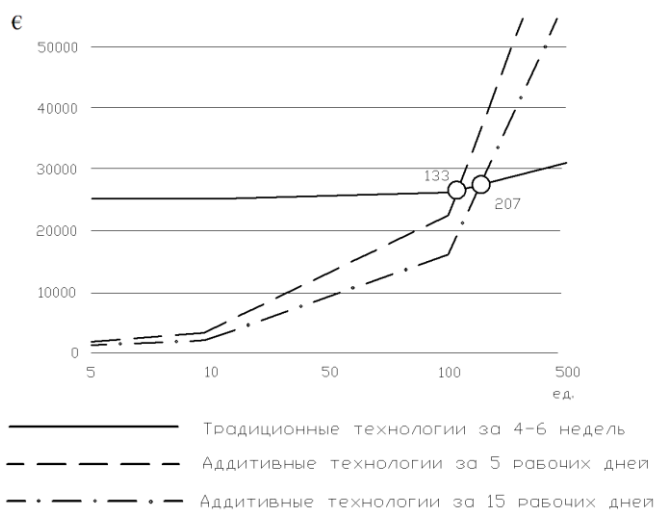


Рис. 5. Диаграмма по традиционному и аддитивному производству

### 3. Сравнение физико-механических характеристик

До сих пор в мировых исследованиях остро стоит вопрос в различиях в конечных физико-механических характеристиках изделий объектов морской техники по сравнению с традиционными методами. Рассмотрим физико-механические характеристики пресс формы для деталей из листового проката.

Параметры технологии изготовления представлены в таблице 3, физико-механические характеристики – в таблице 4, экономические составляющие между двумя технологическими схемами – в таблице 5. Пример пресс-формы для деталей из листового металла продемонстрирован на рис. 6.

Таблица 3

#### Параметры технологии аддитивного изготовления

№ п/п	Наименование характеристик технологической схемы	Характеристики технологической схемы
1.	метод изготовления	постоянное наплавление
2.	материал пресс-формы	полиэфиримид (Ultem 9085)
3.	назначение материала	печать функционирующих деталей
4.	максимальная рабочая температура материала	150° С
5.	максимальное давление	900 Бар (13000 PSI)



Рис. 6. Пресс-формы для деталей из листового проката

Таблица 4

#### Физико-механические характеристики конечного изделия

№ п/п	Параметр	Предел прочности на разрыв, МПа	Прочность при изгибе, МПа	Коэффициент теплового расширения, КТР, $10^{-6}$ м/(м*°С)	Удельный вес, г/см <sup>3</sup>
1.	Ultem 9085	42-69	68-112	65	1,34
2.	Ultem 1010	37-81	77-144	47	1,27
3.	Чистый алюминий	60 – в отожженном состоянии; 100 – в деформированном состоянии	200	22	2,70

Таблица 5

### Экономические составляющие

№ п/п	Метод	Стоимость, \$	Время, дн.
1.	Фрезеровка	1500	5
2.	FDM-печать	450	1
3.	Эффект / экономия	1050 / 70%	4 / 80%

Из приведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- при использовании аддитивных технологий была получена деталь, которая прошла весь цикл испытаний без замечаний;
- физико-механические характеристики конечного изделия сравнимы с изделиям традиционного производства или превышают их;
- экономия производства на одной детали составляет порядка 75%.

#### 4. Основные проблемы внедрения аддитивных технологий на производстве

На сегодняшний день существуют стандарты и сертификация новой технологии в разных отраслях мировой промышленности. В основном это авиакосмическая промышленность и автомобилестроение. В РФ в настоящий момент технология и материалы не сертифицированы.

Вместе с тем, в отечественной инновационной промышленности начинаются первые шаги, связанные с промышленной организацией работ на 3D-технологиях. Однако, в большинстве своем, на сегодняшний день, пока все ограничилось сводом документации. Приказом Росстандарта №1013 от 1 сентября 2015 г. был создан технический комитет по стандартизации №182 «Аддитивные технологии». На данный момент, в его состав входят 56 организаций. Секретариат ТК сформирован на базе ФГУП «ВИАМ».

Ниже представлены основные ГОСТы и даты их внедрения, которым необходимо руководствоваться при работе с аддитивными технологиями (табл. 6).

Таблица 6

### Экономические составляющие

№ п/п	№ ГОСТа	Название ГОСТа	Дата введения
1.	ГОСТ Р 57910-2017	Материалы для аддитивных технологических процессов. Методы контроля и испытаний металлических материалов сырья и продукции	1.06.2018
2.	ГОСТ Р 57911-2017	Изделия, полученные методом аддитивных технологических процессов. Термины и определения	1.06.2018
3.	ГОСТ Р 57558-2017	Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения	1.12.2017
4.	ГОСТ Р 57586-2017	Изделия, полученные методом аддитивных технологических процессов. Общие требования	1.12.2017
5.	ГОСТ Р 57587-2017	Изделия, полученные методом аддитивных технологических процессов. Методы контроля и испытаний	1.12.2017

6.	ГОСТ Р 57588-2017	Оборудование для аддитивных технологических процессов. Общие требования	1.12.2017
7.	ГОСТ Р 57589-2017	Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 2. Материалы для аддитивных технологических процессов. Общие требования	1.12.2017
8.	ГОСТ Р 57590-2017	Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 3. Общие требования	1.12.2017
9.	ГОСТ Р 57591-2017	Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 4. Обработка данных	1.12.2017

Для дальнейшего внедрения аддитивных технологий в судостроение, в первую очередь, требуется полностью пересмотреть вопросы конструкции корпуса судна и рассматривать его как модель изделия не сварочного производства, а как объекта, выполненного при помощи методов, доступных в современной 3D-печати. В истории имелся такой прецедент – когда в 30-ых годах прошлого столетия сварка заменила клепку, что сказалось на конструкции корпуса судна. Концептуальный план внедрения аддитивных технологий на предприятия судостроительной промышленности может выглядеть следующим образом (табл. 7).

Таблица 7

**Основные этапы внедрения аддитивных технологий на предприятия судостроительной промышленности**

№ п/п	№ этапа и сроки	Основные работы	Подразделы основных работ
1.	I этап (ок. 6 месяцев)	Анализ номенклатуры изделий судового машиностроения	1. Определение критериев отнесения к аддитивной технологии и методу выращивания; 2. Определение потенциального объема изделий; 3. Определение вектора направления развития аддитивных технологий.
2.	II этап (ок. 6 месяцев)	Пилотный проект по аддитивным технологиям	1. Изготовление опытных изделий на пилотных участках; 2. Проведение испытаний опытных изделий; 3. Техничко-экономические показатели и расчет.
3.	III этап (ок. 12 месяцев)	Финальная фаза пилотного проекта и переход к следующему этапу	1. Окончание пилотного проекта; 2. Разработка и производство опытно-промышленных образцов оборудования аддитивных технологий; 3. Начало стандартизации новой технологии.
4.	IV этап (ок. 12 месяцев)	Сертификация технологии и материалов, опытно-промышленные образцы установок аддитивных технологий	1. Отработка технологии; 2. Методические материалы; 3. Разрешение в РМРС; 4. Аттестация МВК; 5. Промышленные образцы установок с размещением на судостроительных и судоремонтных предприятиях

Также, для 1-ого этапа можно сформулировать следующие задачи:

1. Определить детали-представители изделий МСЧ, потенциально подходящие для нового технологического процесса, в соответствии со следующими критериями:

- основной критерий: испытывают незначительные нагрузки в работе ( $\sigma_b \leq 200-250$  МПа), свариваемость материала изделия, несекретность (в том числе химического состава сплава);

- сложная геометрическая форма и/или длительный цикл изготовления в части механической обработки;

- высокий процент производственного брака (к примеру, сварные детали из титановых сплавов, литые детали и т.д.);

- низкий коэффициент использования материала (изделия из титановых сплавов в приоритете) – менее 15-20 %;

- габариты не более 2000x2000x800 мм;

- масса готового изделия не более 400 кг.

2. Определить потребность в металлических порошках для перевода номенклатуры изделий МСЧ на новый технологический процесс.

3. Определить специализацию судостроительных предприятий в номенклатуре изделий МСЧ в рамках пилотного проекта.

### *Заключение*

В результате от внедрения аддитивных технологий судостроительная промышленность получит следующие преимущества:

- произойдет упрощение и уменьшение логистики и складских запасов, сокращение времени поставок;

- сокращение сроков и стоимости запуска новых изделий в производство;

- появится возможность и экономическая целесообразность мелкосерийного и единичного производства;

- произойдет локализация производства отдельных элементов на площадках одного предприятия;

- появится возможность оперативных изменений в проекте на этапе производства;

- за счет оптимизации технологического цикла произойдет снижение стоимости деталей в 1,5-2 раза;

- в результате оптимизации внутренней структуры изделий будет наблюдаться снижение веса конструкций;

- произойдет функциональная оптимизация продукции;

- повысится коэффициент использования материала и приблизится к максимальной отметки в единицу;

- из-за внедрения принципиально новых подходов к проектированию изделий произойдет снятие технологических ограничений, позволяющих создать сложные пространственные неразборные детали, решетчатые облегченные конструкции, производство которых с использованием традиционных технологических методов невозможно;

- появится новый подход к разработке и дизайну изделий, исходя из их функционального назначения.

Факторы успеха внедрения и замедления этого процесса уже ранее неоднократно высказывались в таких работах как [11-13].

Аддитивные технологии являются одним из элементов концепции «Индустрия 4.0» - четвертая промышленная революция. И не смотря на то, что судостроительная

отрасль является одной из самых консервативных направлений в мире, аддитивные технологии являются составляющим по части ее будущего развития и «производство 2-ого тысячелетия» не может обойтись без них, за такими системами – будущее не только судостроения, но и всего производства.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ardeshir Raihanian Mashhadi, Behzad Esmaeilian, Sara Behdad. Impact of additive manufacturing adoption on future of supply chains // International Manufacturing Science and Engineering Conference (ASME 2015). – 2015.
2. Yunus Govdeli, Zhuo Wei Wong, Erdal Kayacan. Additive manufacturing of unmanned aerial vehicles: current status, recent advances, and future perspectives // Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Progress in Additive Manufacturing (Pro-AM 2016). – 2016, pp. 38-48.
3. Parisa Sepahvani. Influences of additive manufacturing (3D printers) on the production cost and future of jewelry industry // Politecnico Di Milano. – 2016, pp. 1-83.
4. A. Le Duigou, M. Castro, R. Bevan, N. Martin. 3D printing of wood fibre biocomposites: from mechanical to actuation functionality // Materials & Design. – 2016. № 96, pp, 106-114.
5. Juan Luis Chulilla. The Cambrian explosion of popular 3D printing // International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence. – 2011, № 1 (4), pp. 30-32.
6. Damen Shipyards Group to develop WAAMPeller, world's first class approved 3D printed ship's propeller // 3ders [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www/3ders.org/articles/20170517-damen-shipyards-group-waampeller-worlds-first-class-approved-3d-printed-ships-propeller.html> (дата обращения: 5.06.17 г.).
7. Митранов Г.Н., Сазонов В.С., Полякова А.В., Аникин И.С. Повышение эффективности литья по выплавляемым моделям при использовании аддитивных технологий // Омский Научный вестник. – 2015. № 2 (140). с.85-87.
8. Котов Е.В., Ляшенко В.И. 3D-печать как революционная технология неоиндустриальной модернизации экономики // Вестник экономической науки Украины. – 2014. № 1. с.59-69.
9. Стрижанов И.А. Особенности организации производства деталей на основе технологий пространственной печати // Экономинфо. – 2009. № 12. с.17-18.
10. Степанова Е.Ю., Барсуков Г.В., Степанов Ю.С. Прорывные технологии нового поколения формообразования пространственно-сложных поверхностей наукоемких изделий // Известия Тульского государственного университета. – 2016. Вып. 8, Ч.2. с.243-249.
11. Дектярев А.В. Возможности применения 3D-принтеров в судостроительной промышленности // Материалы 67-ой Международной студенческой научно-технической конференции. – Астрахань, 2017.
12. Дектярев А.В. Аддитивные технологии в судостроительной промышленности // Материалы III Всероссийского конкурса «Молодой аналитик». – Москва, 2017.
13. Дектярев А.В., Морозов В.Н. Аддитивные технологии в судостроительной промышленности и перспективы их развития // Морские интеллектуальные технологии. – 2017. №4 (38). с.76-82.

## **ANALYSIS OF APPLICABILITY OF ELEMENTS OF OBJECTS OF MARINE EQUIPMENT TO ADDITIVE PRODUCTION AND THEIR FURTHER DEVELOPMENT PROSPECTS**

Dektyarev Alexander Vladimirovich, Master of Shipbuilding,  
Morozov Vladimir Nikolaevich, associate professor of, candidate of technical sciences

Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,  
e-mail: nwasanches@mail.ru; mvn3613@gmail.com

*The aim of the work is to assess the implementation aspects of additive technologies in the modern shipbuilding industry on the basis of the analysis of the applicability of items of marine equipment and their elements, as well as the comparison of physical, mechanical and technical and economic parameters of traditional and innovative types of industries. The novelty of the study lies in the comparative and analytical factors of studying objects made by different technologies. Conclusions – conceptual terms for the serial production of marine equipment by additive methods have been compiled.*

УДК 629.5.01

### **ОБОСНОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО СУДНА С ЦЕЛЮ ЕГО ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В УЧЕБНЫХ ЦЕЛЯХ**

Дятченко Сергей Васильевич, д-р техн. наук, доцент  
Гойшинец Игорь Владимирович, магистрант,  
Ковбаска Борис Валерьевич, магистрант

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,  
Калининград, Россия, e-mail: muha.annaor@yandex.ru

*Проведены исследования и предложены инженерные решения, позволяющие расширить функциональные возможности научно-исследовательского судна пр. «Атлантик 833» с целью приобретения курсантами знаний, умений и навыков судовождения, промышленного рыболовства, эксплуатации судовых энергетических установок, ихтиологии и технологии обработки продуктов*

#### **Введение**

Создание современного конкурентоспособного рыболовного флота России предусматривает постройку новых проектов рыболовных судов и подготовку высококвалифицированных кадров. Для обеспечения флота рыбной промышленности квалифицированными кадрами и изучения состояния рыбных ресурсов в морях и океанах необходимы суда специального назначения: учебно-производственные и научно-исследовательские. В отличие от тренажерных центров подготовки, учебно-производственные суда позволят получить необходимую профессиональную плавательную практику многим категориям обучающихся студентов и курсантов: судоводителям, судомеханикам, промысловакам, технологам и ихтиологам. Следует отметить, что особенность работы научно-исследовательского судна обеспечивает

широкие возможности их использования для приобретения умения и навыков работы обучающихся по этим направлениям подготовки. В связи с этим, объектом исследования возможностей прохождения плавательной практики для студентов ФГБОУ «ВО КГТУ» принято научно-исследовательское судно пр. «Атлантик 833». Назначение судна: проведение комплексных рыбохозяйственных исследований в области поиска рыбы, гидроакустики, океанологии, гидрологии, гидробиологии, ихтиологии, технологии обработки. Задачами выполненных исследований являлись: изучение возможных вариантов модернизации судна для прохождения плавательной практики курсантов на действующем судне и разработка нового модернизированного проекта судна с целью повышения его функциональных возможностей для прохождения плавательной практики курсантов. При модернизации или создании нового проекта такого типа судна необходим системный анализ его основных элементов и характеристик.

### 1. Анализ основных элементов научно-исследовательского судна

На рис. 1. представлена структурная схема исследований научно-исследовательского судна. В табл. 1- 4 представлены основные элементы судна.

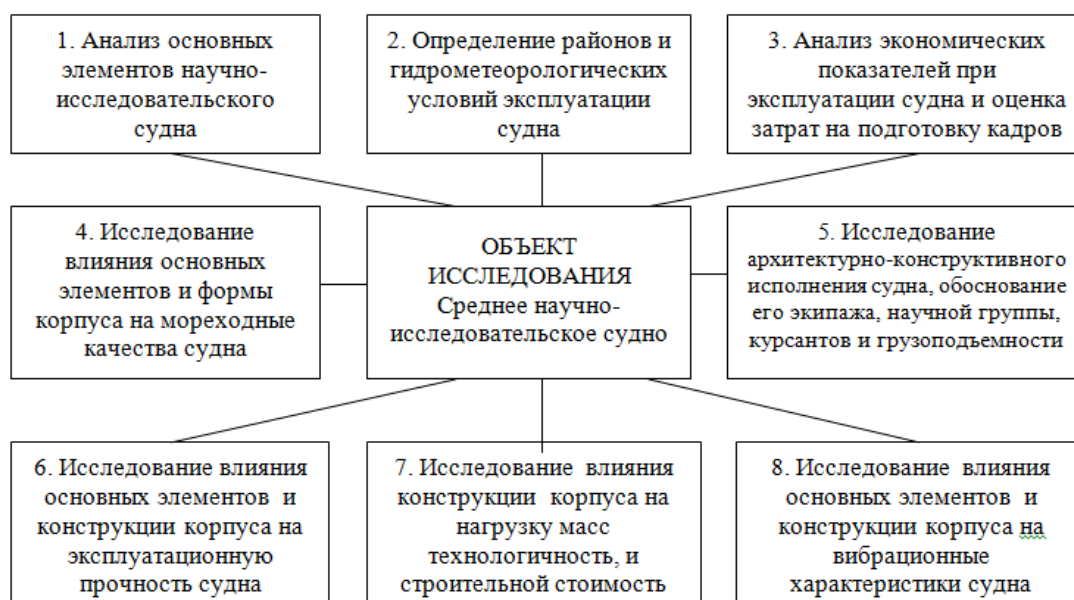


Рис. 1. Структурная схема исследований научно-исследовательских судов.

Таблица 1

#### Главные размерения судна

Наименование величины	Обозначение и размерность	Значение
Длина габаритная	$L_{max}$ , м	ок. 62,20
Длина между перпендикулярами	$L_{pp}$ , м	55,00
Ширина расчетная	$B$ , м	13,80
Высота борта до верхней палубы	$H_{ВП}$ , м	9,20
Высота борта до главной палубы	$H_{ГП}$ , м	6,62
Осадка расчетная	$T$ , м	4,8
Водоизмещение расчетное	$D$ , м <sup>3</sup>	2110
Автономность плавания, по запасам топлива	$A$ , сут.	45



Таблица 2

## Перечень лабораторий для проведения научно-исследовательских работ

Название лаборатории	Площадь, S, м <sup>2</sup>
Гидроакустическая лаборатория	14,8
Помещение для космической океанографии	12,5
Конференцзал	22,5
Гидрологическая лаборатория	9,2
Гидрохимическая лаборатория	11,0
Соленомерная	8,9
Кладовая для хранения гидрозонда	3,8
Кладовая для хранения гидрологической аппаратуры	3,4
Геологическая и бентосная лаборатория	8,1
Ихтиологическая лаборатория	26,1
Фотолаборатория	6,3
Технологическая лаборатория	9,5
Гидробиологическая лаборатория	10,4
Помещение для озоления	4,5
Кладовая для хранения научно - исследовательской аппаратуры	5,5
Лаборатория для проведения подводных исследований и исследований орудия лова	9,6

Таблица 3

## Водоизмещение, дедвейт и запасы

Наименование величины	Обозначение и размерность	Значение
Судно порожнем	$P$ , т	1891
Водоизмещение максимальное (вариант нагрузки 100% запасов, 100% груза)	$D_{max}$ , т	2508
Дедвейт максимальный	$DW_{max}$ , т	617

Таблица 4

## Технические характеристики главных двигателей

Количество двигателей, шт.	2
Компания – поставщик, тип двигателя	Caterpillar, mak 6m 20
Тип исполнения	I дв. левого исполнения
	I дв. правого исполнения
Способ работы	четырёхтактный
Количество цилиндров, шт.	6
Инвентарные номера	№30881
	№30882
Направление вращения	Левое, нереверсивное
Номинальная мощность, кВт	1020
Номинальная скорость вращения, об/мин	1000
Расход смазочного масла, кг/ч	1,8 ±5%
Масса в сухом состоянии, т	10,5
Ледовый класс	2
Эффективное среднее давление, МПа	1,62
Удельный расход топлива при номинальной мощности, г/кВт·ч	233

**Осадка судна**

<b>Осадка, м</b>	
Порожном носом	3,46
Порожном кормой	5,25
В грузу носом	3,49
В грузу кормой	6,48

На рис. 2. Представлено общее расположение научно-исследовательского судна. Анализ технических документов и литературных источников показал, что методология проектирования водоизмещающих судов изложена в работах [1,2], а методика проектирования рыболовных судов в работах [3,6,11]. Методические положения для определения формы корпуса и обеспечения мореходных качеств судов, в том числе остойчивости, представлены в работах [4,7,9,10], а методика определения нагрузки масс для водоизмещения порожнем судов различного назначения в работе [11]. Теоретические положения проектного обеспечения норм вибрации на судах промыслового флота представлены в работе [5], а методика определения экономической эффективности и результаты оценки эффективности рыболовного флота в работах [12,13]. Анализ технической литературы показал, что имеются необходимые теоретические и методические основы, позволяющие перейти к системным исследованиям элементов и характеристик научно-исследовательского судна, с целью улучшения его технико-экономических характеристик. Результатом системных исследований стали: разработка вариантов технических решений по размещению курсантов на судне и оценка мореходных, прочностных, вибрационных, технологических и экономических качеств судна по результатам выбранных технических решений. В целом проведение модернизации должно привести к созданию нового объект морской техники

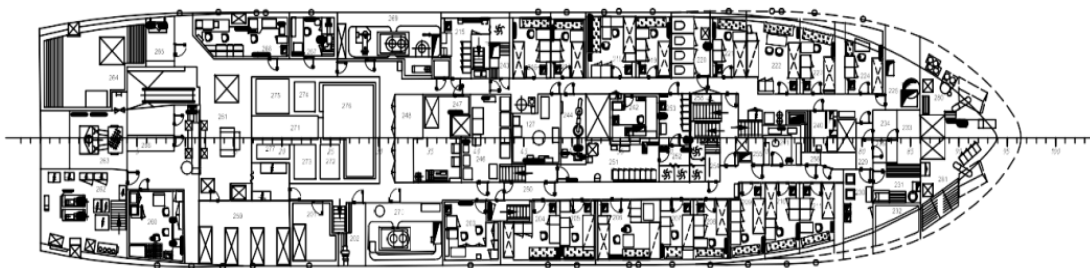
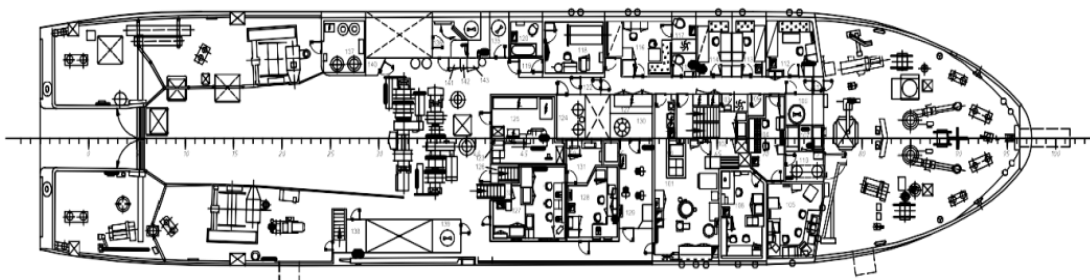
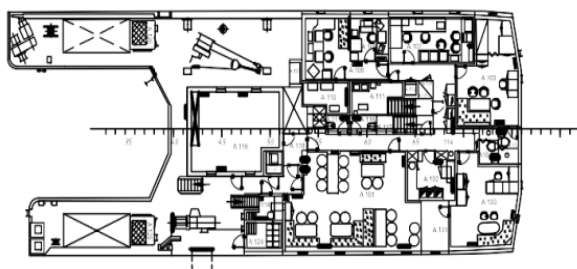
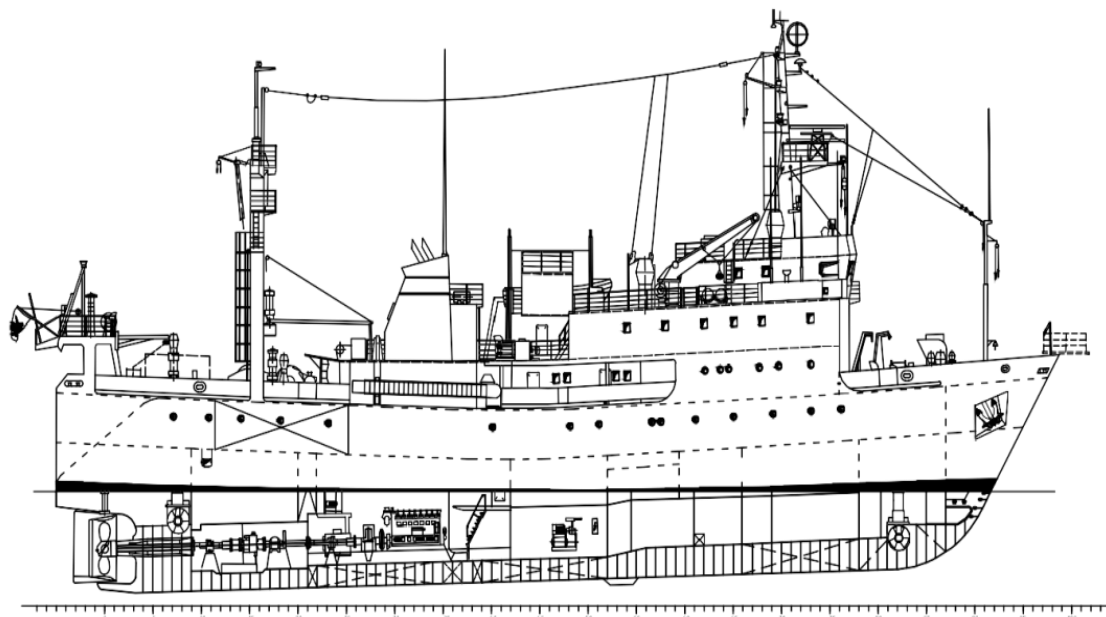


Рис. 2. Общее расположение судна

## 2. Разработка вариантов размещения курсантов на судне

Существует два основных направления модернизации проекта судна с целью расширения его функциональных возможностей: размещения курсантов без изменения главных размерений судна и с изменением его главных размерений. По первому направлению рассмотрены следующие варианты размещения курсантов на судне:

- путем уменьшения численности экипажа или научной группы;
- путем выделения помещений, которые мало используются научной группой;
- размещения курсантов при эксплуатации судна без научной группы;

Анализ численности экипажа показал, что экипаж судна составляет 39 человек. Уменьшение численности экипажа, путем замены некоторых из членов экипажа курсантами проходящими практику, но данный вариант в дальнейшем в рассмотрение не берется, т.к. курсанты не обладают необходимыми навыками и умениями, чтобы равнозначно заменить кого-либо из членов экипажа или научной группы. Вторым рассмотренным вариантом был вариант размещения курсантов путем выделения помещений, которые мало используются, либо не используются вовсе научной группой. Были определены помещения, которые могут быть использованы под размещение курсантов на нижней палубе (цветом выделены помещения), смотри рис. 3:

- 266 Гидрологическая лаборатория
- 267 Помещение для озоления
- 261 Помещение для отбора рыбных образцов
- 259 Помещение для консервных образцов
- 201 Библиотека
- 202 Кладовая для кислот и щелочей

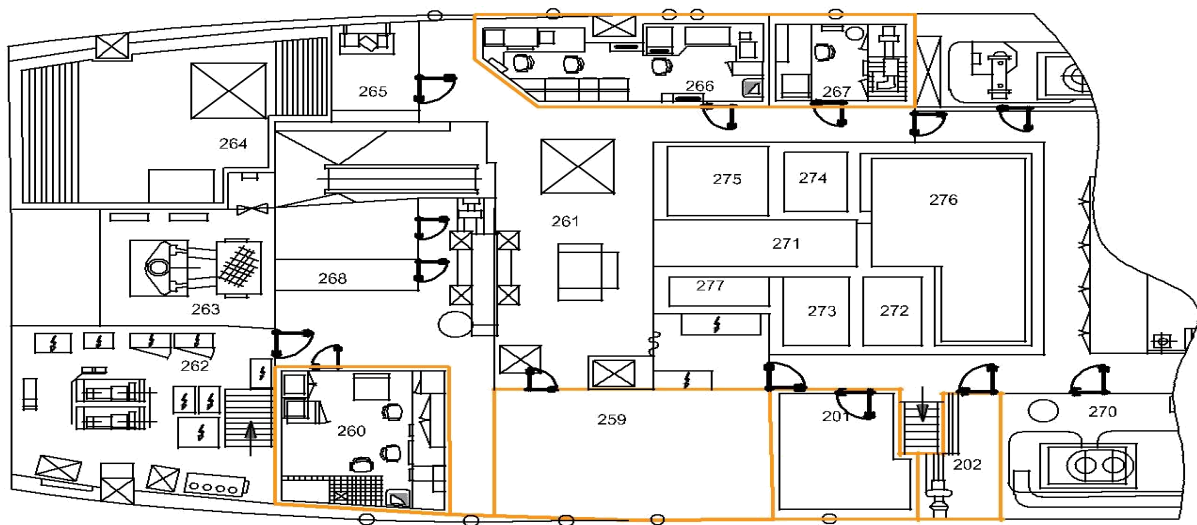
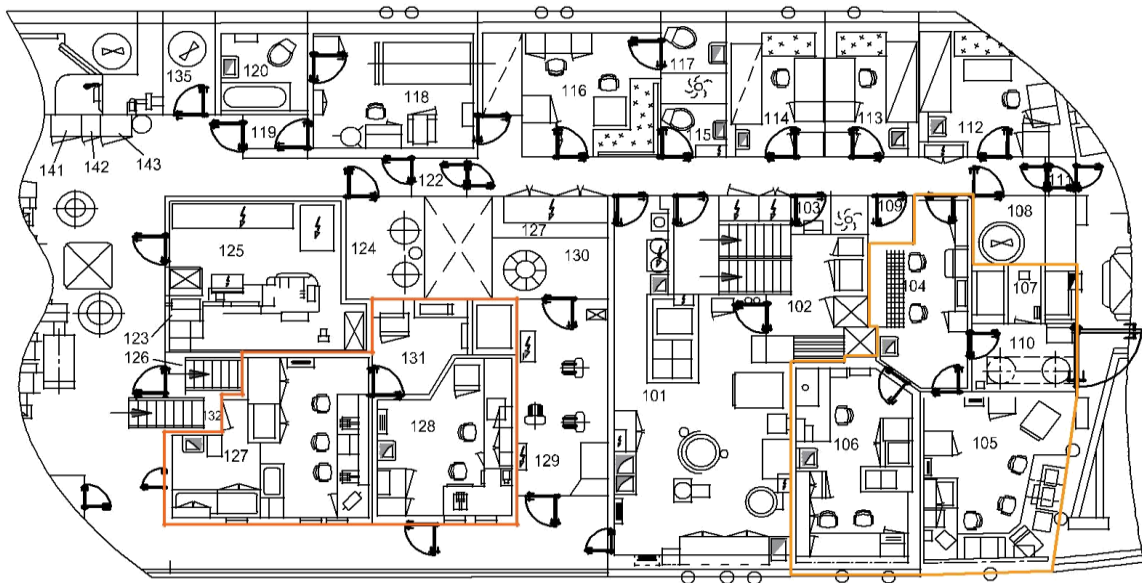


Рис. 3. Эскиз нижней палубы с выделенными помещениями

Также были определены помещения, которые могут быть использованы под размещение курсантов на верхней палубе (цветом выделены помещения), смотри рис.4:

- 104 Соленомерная
- 105 Гидрологическая лаборатория
- 106 Гидрохимическая лаборатория
- 107 Склад для гидрологических приборов
- 110 Склад для гидрозонда

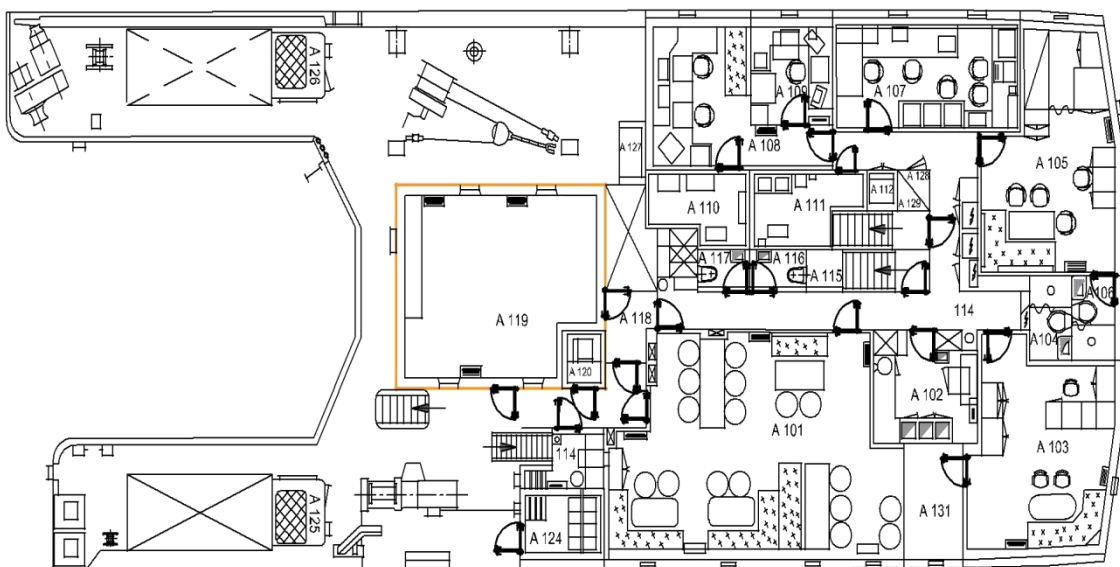
- 127 Ихтиологическая лаборатория
- 128 Геологическая и бентосная лаборатория
- 131 Аквариум



*Рис. 4. Эскиз верхней палубы с выделенными помещениями*

Помещение, которое использует научная группа, расположенное на первом ярусе надстройки:

- А 119 Конференц-зал



*Рис. 5. Эскиз первого яруса надстройки с выделенным помещением*

Третьим рассмотренным вариантом был вариант размещения курсантов при эксплуатации судна без научной группы. НИС «АТЛАНТИДА» совершает два рейса в год, длительностью около 3-х месяцев каждый. Оставшиеся шесть месяцев судно простаивает в порту. Рассматриваемое судно является судном с неограниченным районом плавания, это означает, что в период простоя судно можно использовать для

обучения курсантов путем заселения их в помещения, в которых до этого была заселена научная группа.

После выявления помещений, возможных для размещения курсантов, было проведено совместное совещание, на котором присутствовали с одной стороны лица представлявшие «КГТУ», с другой помощник капитана по научно – исследовательским вопросам и старший помощник капитана. По результатам совещания судовладельцем было принято решение о возможности размещения курсантов в помещение 259, расположенное на нижней палубе для консервных образцов, которое не используется на судне, а также смежном помещении 201, в котором размещена библиотека.

При рассмотрении всех возможных вариантов, выбран второй вариант модернизации судна. По этому варианту, под жилые помещения предусмотрено переоборудование 2 помещений, расположенных по правому борту в корму от миделя. Переоборудование этих помещений позволяет разместить восемь курсантов. Исходя из санитарных правил для морских судов, площадь двухместной каюты команды должна составлять не менее  $6,5 \text{ м}^2$ , площадь четырехместной каюты команды должна составлять не менее  $13,5 \text{ м}^2$ . Следуя сказанному выше помещение №259 необходимо разделить на 2 каюты, соответствующей площади, чтобы заселить в одну из получившихся кают 2 человека, в другую 4 человека, в помещение №201 заселить 2 человека. Также по согласованию с руководством «АтлантНИРО» было принято решение подселить в 3-х местную каюту №222 и № 203 по одному курсанту. Отсюда следует, что общая численность курсантов составит 10 человек.

При проектировании общего расположения были учтены следующие требования и приняты решения:

- предусмотреть в качестве одной из эффективных мер защиты экипажа и пассажиров от воздействия вредных факторов судовой среды, максимально возможное удаление жилых помещений от источников шума и вибрации, источников выделения избыточной теплоты, вредных излучений и вредных веществ.
- три каюты, где постоянно или временно находятся люди, оборудованы системами отопления, вентиляции, освещения.
- средняя высота кают 2500 мм.
- минимальная площадь двухместной каюты команды  $6,5 \text{ м}^2$
- минимальная площадь четырехместной каюты команды  $13,5 \text{ м}^2$
- каюты оборудованы шкафом для одежды, столом, стульями, вешалкой, полочками и т.п. Размеры судовой мебели соответствуют требованиям действующих стандартов.
- в каютах предусматриваются умывальники
- для улучшения обитаемости на судне, в корме разместим дополнительный изолированный санитарный блок.

С целью увеличения количества курсантов на борту судна проработаны варианты его размерной модернизации путем увеличения длины судна. Выбран вариант увеличения расчетной длины судна на 5 м. Выполнены проектные работы, связанные с разработкой общего расположения, расчетом нагрузки масс, проверкой посадки судна, величины надводного борта, определением координат центра тяжести и проведением оценки остойчивости для судна Атлантика 833 после его модернизации.

Используя координаты центра тяжести, выполнены расчеты посадки и начальной остойчивости для трех вариантов нагрузки масс. В таблице 5. Представлены

некоторые характеристики судна после его модернизации. Также выполнены проверочные расчеты прочности и вибрации судна при его размерной модернизации.

Таблица 6

### Характеристики судна после модернизации

Наименование элементов	Случай нагрузки №1 100% запасов, 0% груза
Тип судна	рыболовное
Район плавания	неограниченный
Водоизмещение весовое, D, т	2824,5
Абсцисса Ц.Т., $x_g, м$	-3,21
Апplikата Ц.Т., $z_g, м$	6,23
Длина между перпендикулярами, L <sub>pp</sub> , м	60
Ширина по КВЛ, B, м	13,8
Высота борта, H, м	9,2

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гайкович, А.И. Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов / А.И. Гайкович: в 2 т. – Санкт-Петербург: Изд-во НИЦ МОРИНТЕХ, 2014. – Т.1. Описание системы «Корабль». - 819 с.
2. Гайкович, А.И. Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов / А.И. Гайкович: в 2 т. – Санкт-Петербург: Изд-во НИЦ МОРИНТЕХ, 2014. – Т.2. Анализ и синтез системы «Корабль». - 812 с.
3. Дятченко, С.В. Определение основных элементов и характеристик средних рыболовных траулеров на начальных этапах проектирования / С.В. Дятченко, Н.Х. Лыонг // Вестник АГТУ. Морская техника и технология. 2009. - №2. – С. 19-25.
4. Дятченко, С.В. Математическая модель для оценки остойчивости средних траулеров на ранних стадиях их проектирования / С.В. Дятченко, В.А. Коробчинский, А.А. Лисицын // Морские интеллектуальные технологии. – Санкт-Петербург, 2017. – С. 49-54
5. Дятченко С.В. Теоретические положения проектного обеспечения норм вибрации на судах промыслового флота / С.В. Дятченко. - Известия КГТУ, Калининград, 2012. - № 25. - С.119-126.
6. Иванов В.П. Техничко-экономические основы создания рыболовных судов: учебник /А.П. Иванов – Калининград: Изд-во БГАРФ, 210.- 275 с.
7. Малышев А.Н. Плавучесть и остойчивость промысловых судов /А.Н. Малышев. - М.: Мир, 2003. – 272 с.
8. Маслюк Е.В. Проектирование морских судов. Расчеты нагрузки масс водоизмещения порожнем судов различного назначения / Е.В. Маслюк, А.Ф. Иконников – Калининград, Изд. ФГБОУ ВПО «КГТУ», 2008. - 47 с.
9. Мореходность судов и средств океанотехники. Методы оценки: Монография / научный редактор И.К. Бородай / ФГУП «Крыловский государственный научный центр». – СПб., 2003. – 256 с.

10. Ногид Л.М. Проектирование формы судна и построение теоретического чертежа / Л.М. Ногид. – Л.: Судпромгиз, 1962. – 243 с.

11. Раков А.И. Проектирование промысловых судов / А.И. Раков, Н.Б. Севастьянов. – Л.: Судостроение, 1981. – 376 с.

12. Степанова Л.А. Конкурентоспособность организаций и продукции судостроительной промышленности: Учебное пособие / Л.А. Степанова, Е.В. Маслюк. – Калининград: Изд-во ФГБОУ ВПО «КГТУ», 2011. – 263 с.

13. Экономическая эффективность использования российского рыбопромыслового флота в Баренцевом море /отчет/ WWF России. – М., 2007. – 53 с.

## **THE SUBSTANTIATION OF THE MAIN ELEMENTS OF THE SCIENTIFIC RESEARCH VESSEL FOR THE PURPOSE OF ITS ADDITIONAL USE IN EDUCATIONAL OBJECTIVES**

Dyatchenko Sergey Vasilyevich, Dr. techn. Sciences, Associate Professor  
Gojshinec Igor Vladimirovich, master  
Kovbaska Boris Valeryevich, student

Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,  
e-mail: muha.annaor@yandex.ru

Engineering studies have been carried out and engineering solutions have been proposed to expand the functionality of the research vessel "Atlantic 833", with the aim of acquiring knowledge, skills and skills of navigation, industrial fishing, operation of ship power plants, ichthyology and processing technology.

УДК 629.12.001.57

## **ВОПРОСЫ МЕТОДОЛОГИИ ОПТИМИЗАЦИОННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ НАЛИВНЫХ РЫБОЛОВНЫХ СУДОВ ДЛЯ МОРСКОГО РЫБОЛОВСТВА СРВ**

Зыонг Ван Тхань, аспирант  
Иванов Владимир Павлович, д-р техн. наук, профессор

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,  
Калининград, Россия, e-mail: dtn.ivanov@yandex.ru; duongvthan@gmail.com

*Рассмотрены вопросы методологии развития морского рыболовства и пополнения флота СРВ современными рыболовными судами наливного типа для морского рыболовства (НРС). Приведены основные положения по методологии обеспечения эффективности и конкурентоспособности этих судов для технико-экономических условий Вьетнама. Выделен круг задач, связанных с обеспечением технико-экономического анализа (ТЭА) среднетоннажных НРС, который включает в себя отбор судов-претендентов, поиск технических решений повышения их эффективности методами модернизации, обеспечение оптимизационного проектирования*



## ***Введение***

В текущем веке рыбохозяйственная отрасль Вьетнама стала одной из ведущих отраслей его народного хозяйства, нацеленной как на обеспечение внутреннего потребления, так и на экспорт рыбной продукции, где страна устойчиво занимает передовые позиции в мире. Благоприятные условия прибрежного рыболовства обусловили его бурное развитие с использованием маломерных судов ремесленного производства (МмРС), доставляющих улов на берег в охлажденном виде в битом льду. Значительный рост количества МмРС и опыт их эксплуатации в открытых акваториях привел к необходимости ввода ряда ограничений в освоении этими судами отдаленных районов прибрежного рыболовства и к использованию малотоннажных судов (МРС) с соответствующим обеспечением их мореходных качеств и безопасности мореплавания (см. [1]). Накопленный в СРВ опыт проектирования, постройки и эксплуатации рыболовных судов определяет возможность и целесообразность последующего развития его рыбохозяйственной отрасли, направленного на эффективное освоение не только удаленных районов прибрежного рыболовства (см. [2]), но и открытых морских акваторий с обеспечением отечественного среднетоннажного промыслового судостроения.

При решении этой проблемы необходимо учитывать научно-технические достижения в области создания современных рыболовных судов (РС), их комплектующего оборудования, снабжения и эксплуатации в целом, что отражается в проектах судов нового поколения. Из таких судов сосредоточим внимание на среднетоннажных РС наливного типа (НРС) для морского рыболовства, получивших за последние два десятилетия в ряде стран значительное развитие. Рассмотрим вопросы технико-экономического анализа (ТЭА) и обоснования проектных характеристик этих судов применительно к технико-экономическим условиям (ТЭУ) СРВ.

### ***1. Основные положения методологии обеспечения эффективности и конкурентоспособности НРС для ТЭУ СРВ***

При формировании данной методологии (как совокупности концепций, методов и алгоритмических схем, используемых при принятии проектных и других инвестиционных решений) в качестве основы примем апробированную методологию оптимизационного проектирования и эксплуатации, ориентированную на РС и обобщенную в [3] (см. гл. 1). Концепция методологии заключается в необходимости непрерывного ТЭА РС и их эффективности методами рационального использования их действующего производственного потенциала, эффективной модернизации и оптимизационного проектирования. В соответствии с ней в качестве обследуемых принимаются современные действующие суда или их проекты, которые наиболее полно отвечают замыслам проектанта и в которых уже аккумулирован комплекс научно-технических достижений, оправданных практикой эксплуатации. Кроме того концепция определяет тесную взаимосвязь эффективности РС с ТЭУ их эксплуатации, и для задач последующего ТЭА предусматривает отбор судов-претендентов по показателю эффективности их эксплуатации в заданных ТЭУ.

Рабочим инструментом для реализации концепции являются соответствующие математические модели судов (ММС): их эксплуатации (МЭРС), модернизации (ММРС) и проектирования (МПРС), совокупность которых формирует методологическую базу обеспечения эффективности и конкурентоспособности РС. В качестве основного критерия в ММС принимается эффективность капиталовложений

$Fkap=(Qg-Cs)/Sk$ , %, где  $Qg$  и  $Cs$  – значения годовой производительности и годовых эксплуатационных затрат судна в денежном исчислении, а  $Sk$  – его стоимость. Поиск оптимальных инвестиционных решений, осуществляемых с использованием ММС соответствующего назначения, связан не только с тривиальными требованиями роста  $Qg$  и снижения  $Sk$  и  $Cs$ . Пожалуй, лидирующая роль здесь отводится поиску таких решений, которые обеспечат положительный экономический эффект за счет такого роста значений относительной производительности судна  $q_k=Qg/Sk$ , который превышает значения относительных эксплуатационных затрат  $c_k=Cs/Sk$  (т.е. при  $q_k-c_k>0$ ).

В широком плане ТЭА, оптимизационные исследования осуществляются при вариациях как характеристик судна (его грузоподъемности  $Pgr$ , т, мощности главных двигателей  $Ngd$ , кВт, производительности технологического оборудования  $Qi$ , т/сут, и пр.), так и ТЭУ его эксплуатации (состояния сырьевой базы района промысла, его удаленности и пр.). Это определяет многофакторность ТЭА и невозможность получить практически значимые его результаты экспертным путем («на коленке»). При этом очевидными требованиями к ММС является обеспечение их адекватности, которая проверяется сопоставлением расчетных данных, полученных с использованием моделей, с фактическими данными по конкретным судам.

По результатам изложенного выделим круг задач, связанных с обеспечением ТЭА среднетоннажных НРС применительно к ТЭУ морского рыболовства СРВ. Он включает в себя:

1. отбор судов-претендентов для последующего их детализированного ТЭА,
2. поиск технических решений повышения эффективности отобранных НРС и/или их проектов методами модернизации,
3. обеспечение оптимизационного проектирования НРС.

Рассмотрим эти вопросы в плане их практической реализации или особенностей разработки соответствующих ММС.

## **2. Отбор судов-претендентов**

Необходимость отбора судов-претендентов обусловлена тем, что каждое РС создается для конкретных (правда, не во всем очевидно – каких) ТЭУ эксплуатации и, по возможности, оптимальным по эффективности. При этом очевидно, что изменение ТЭУ повлечет за собой соответствующее изменение (как правило - снижение) этих показателей. Обеспечение ТЭА предопределяет отбор из числа действующих судов (или их проектов) таких (одного-двух) РС, которые обеспечат наиболее высокие показатели их эффективности в заданных ТЭУ. По достижении приемлемого уровня эффективности, эти суда могут рассматриваться в качестве претендентов для пополнения и развития флота.

Дополнительны комментарии, которые необходимо учесть при решении этой задачи, сводятся к следующему.

1. Оценки эффективности РС в заданных условиях промысла могут быть получены и по результатам практической эксплуатации судов-претендентов. Однако такое направление в принятии инвестиционных решений по развитию флота представляется неоправданно рискованным и затратным, поскольку предполагает закупку или аренду зарубежных судов. Известная практика волевого приобретения судовладельцами судов «по случаю» (например, по их привлекательно низкой рыночной стоимости) уже неоднократно показывала свою экономическую несостоятельность.

2. Определение характеристик ТЭУ эксплуатации РС (удаленности района

промысла  $Rpr$ , миль, состояния его сырьевой базы, отражаемого ее коэффициентом  $Ksb$ , параметров ценообразования и пр.) является прерогативой заказчика (в лице судовладельца, проектно-конструкторского бюро или государственных структур). Возможная неопределенность отдельных характеристик ТЭУ не изменяет методологию ТЭА, но для принятия последующих инвестиционных решений требует выполнения дополнительных вариационных расчетов.

3. При планировании эксплуатации РС с сезонным чередованием районов промысла, его экономическая эффективность складывается по результатам расчетов, выполненных посезонно.

4. Стоимость судна  $Sk$ , используемая в расчетах критерия его эффективности, может быть как фиксированной (при приобретении по тарифу, действующему на рынке судов), так и обобщенной эмпирической формулой (например, при постройке судна на отечественной верфи), полученной для конкретной верфи с учетом ее опыта и условий постройки.

Экономическая экспертиза РС судов-претендентов (в целом и для условий СРВ в частности) может быть осуществлена с использованием универсальной модели эксплуатации РС (МЭРС), освещенной в [4]. Она разработана в редакторе *MathCad* применительно к современным РС с фиксированными значениями их грузоподъемности (по мороженой и/или охлажденной продукции в сухих трюмах и/или охлажденной рыбы в наливных танках). Перечень исходных данных модели относительно невелик и включает в себя основные технические и эксплуатационные характеристики РС: его полное водоизмещение  $D$ , т, мощность главных двигателей  $Ngd$ , кВт, скорость свободного хода  $vs$ , уз, автономность по запасам топлива  $A$ , сут, производительность технологических линий по обработке улова  $Qi$ , т/сут, грузоподъемность судна по видам доставляемой в порт продукции  $Pgri$ , т. Отметим доступность получения этих характеристик, которые приводятся в рекламных материалах по РС или их проектам. Другие характеристики РС (в частности, мощность дизель-генераторов  $Ndg$ , валогенераторов  $Nwg$ , рефрижераторной установки  $Nref$ ) в данной модели имеют более низкую значимость и могут быть определены из условия ресурсной самодостаточности рассматриваемого судна или его проекта с использованием эмпирических формул.

### **3. О повышении эффективности НРС посредством его модернизации**

Эффективность эксплуатации НРС, отобранных по результатам их экономической экспертизы, может быть повышена посредством их модернизации, которая рассматривается в качестве возможной альтернативы проектированию нового судна. В сравнении с разработкой нового проекта и при условии технической и экономической состоятельности намечаемой модернизации, заказчик по существу снижает свои инвестиционные затраты на стоимость проектных работ, уже учтенных в стоимости РС. Кроме того, постройка модернизированного судна на той же верфи предполагает использование прежней технологической оснастки, что существенно облегчает переход на постройку новых судов и снижает их стоимость.

В методическом плане вопросы модернизации РС рассмотрены в [3], где для действующих судов и их проектов приводятся факторы модернизации, рекомендации по разработке ее концепции и расчетные процедуры. Комплексная модернизация предусматривает возможность совмещенного выполнения расчетов при модернизации трех типов:

1. С заменой комплектующего оборудования судна без изменений в его

компоновке;

2. С перераспределением основных помещений судна;
3. С размерной модернизацией судна удлинением.

Программное обеспечение модернизации РС, выполненное в редакторе *MathCad* с участием Дудина С.Д., Зыонга В.Т. и Курдюкова С.Г., представлено в методической разработке [5]. Основные задачи, которые решаются в ходе модернизации, сводятся к следующему:

1. Изучение исходного судна (или его проекта) как объекта модернизации для заданных ТЭУ его эксплуатации;
2. Выбор факторов, определяющих его экономическую эффективность, и разработка концепции модернизации;
3. Графическая проработка варианта модернизированного судна, с выделением проектных изменений в соответствии с принимаемым вариантом модернизации;
4. Выполнение соответствующих проектных и экономических расчетов с использованием моделей МЭРС и ММРС и анализ полученных результатов;

В результате выполненной работы определяется вариант комплексной модернизации РС с оценкой ее технической и экономической состоятельности. Намечаемая модернизация определяется как технически состоятельная при условиях:

1. Отсутствие перегруза судна, т.е. сохранение его надводного борта. Заметим, что выполнение этого условия облегчается при размерной модернизации удлинением, когда РС увеличивает объемы своих помещений и запас плавучести;
2. Достаточное ресурсное обеспечение модернизации в части холода, пара, электроэнергии;
3. Достаточный запас остойчивости, для оценки которой используется величина начальной метацентрической высоты и ее изменение вследствие модернизации.

Экономическая состоятельность модернизации определяется сопоставлением расчетных показателей экономической эффективности судна до и после модернизации.

В заключение данного раздела отметим следующее. Решение задач модернизации НРС и, тем более – их оптимизационного проектирования предполагает наличие соответствующей информационной базы исследования, включающей в себя не только полновесное техническое описание судов, но и проектные обобщения, используемые при их разработке. Такая информация в открытой печати представляется скупо и зачастую определяется как коммерческая тайна. В таких условиях, т.е. при недостаточной полноте доступной технической информации в части проектных параметров и других характеристик НРС, перед проектантами ставится дополнительная задача, которая заключается в обеспечения практически значимой оценки необходимых характеристик. В методическом плане эта задача практически решена методами реконструирования и соответствующего статистического анализа характеристик НРС, полученных из открытой печати и результатов реконструирования.

#### **4. О реконструировании проектных параметров и характерных особенностях НРС**

Основные положения методики реконструирования, ориентированной на НРС, представлены в статье [6] и в учебно-методической разработке [7]. Методика апробирована в КГТУ в рамках учебного процесса по специальности «Кораблестроение» и в ходе выполнения выпускных квалификационных работ.

Исходным материалом реконструирования является рекламный проспект НРС, представляемый со схемой его общего расположения (ОР) и с ограниченным составом

его технических и эксплуатационных характеристик. В процессе реконструирования:

- с использованием общекорабельных компьютерных программ (*FreeShip*, *AutoCad*) в размерениях НРС и с учетом его судовых обводов, отражаемых на чертежах или схемах ОР, воссоздается его теоретический чертеж (ТЧ);

- с использованием программы *Dialog-Static* выполняются расчеты гидростатических кривых ТЧ (КЭТЧ) с представлением их значений до верхней палубы;

- с использованием КЭТЧ и ОР представляется эпюра емкости с детализированной разбивкой на помещения основного корпуса, где сосредоточены основные помещения НМС;

Далее, с использованием разработанной рабочей модели реконструирования МРРС, обеспечивается возможность виртуального функционирования НРС в соответствующих условиях его эксплуатации и при проектном случае нагрузки (снятие судна с промысла с полным уловом и судовыми запасами, необходимыми для возвращения в порт). По результатам этих итерационных расчетов формируются уравнения вместимости и нагрузки избранного НРС. Расчеты завершаются оценкой координат центра тяжести (ЦТ) для водоизмещения порожнем  $D_p$ , которые необходимы для составления уравнения остойчивости и решения вопросов удифферентовки судна.

Развитие современных информационных технологий позволяет развивать и совершенствовать методику реконструирования с сокращением его трудоемкости и обеспечением возможности в разработке проектных обобщений. Как отмечено ранее, важная роль при реконструировании характеристик НРС отводится воссозданию его ТЧ и расчетам вместимости. Для выполнения этой работы из сети интернета и периодической печати отобрано 10 среднетоннажных НРС, представляющих интерес для задач ТЭА. Диапазон характеристик судов составил: по их длине  $L_p=23.6...60$  м, по водоизмещению  $D=600...3600$  т, по мощности главных двигателей  $N_{gd}=1000...4000$  кВт, по грузоместимости  $W_{gr}=200...1700$  м<sup>3</sup>, по численности экипажа  $N_{ek}=8...14$  чел. Пример ОР одного из этих судов представлен на рис.1, а общая схема реконструирования - на рис. 2. При воссоздании формы обводов корпуса и при его детализированной разбивке на отсеки и помещения (рис. 3) использована 3D - программа «*Maxsurf*», а в расчетах геометрических характеристик судов и их отсеков – ее модуль «*Hydromax*». В качестве одного из результатов анализа, выполненного по итогам реконструирования, на рис. 4 приведены осредненные значения относительных объемов помещений НРС.

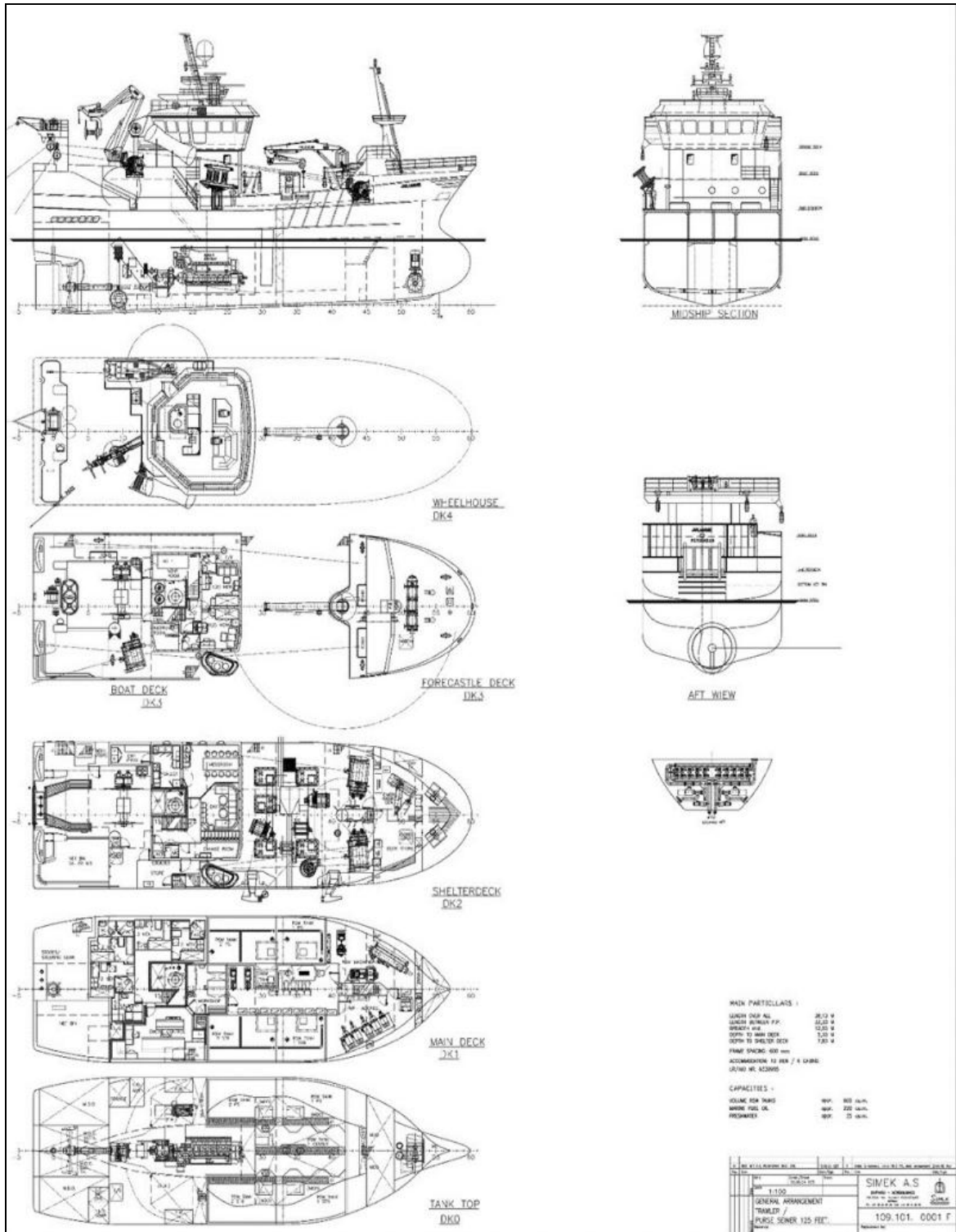


Рис. 1. Схема общего расположения 33-метрового НРС Jullian III

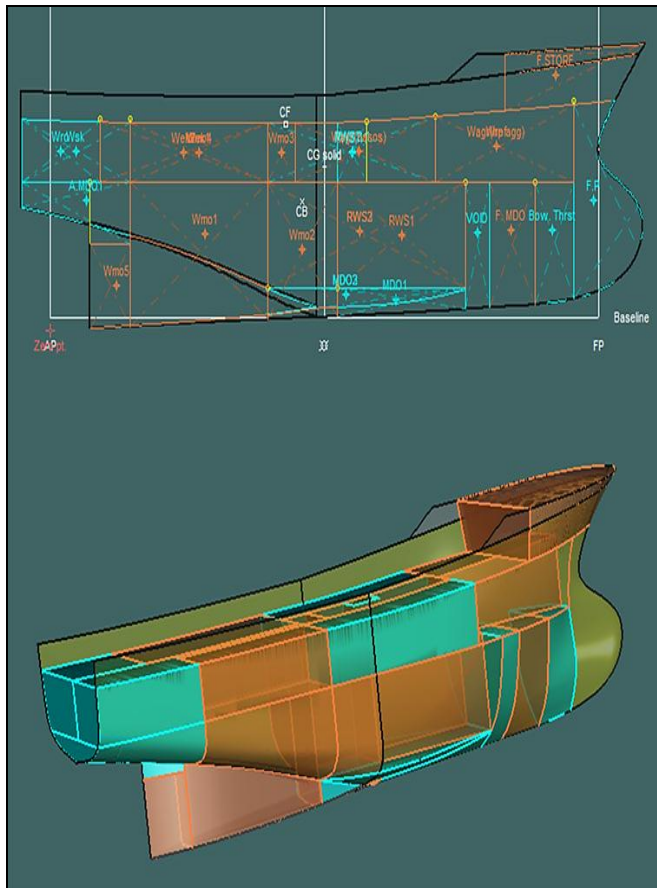
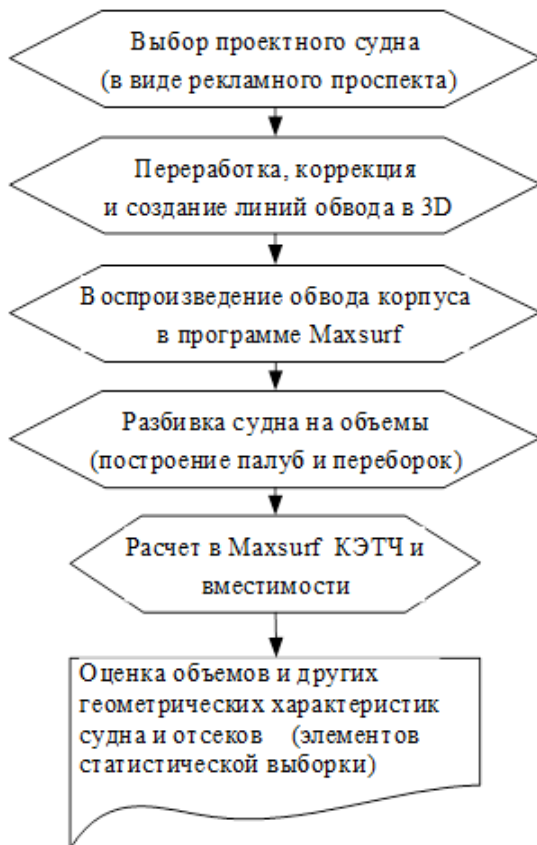


Рис. 2. Общая схема реконструкции

Рис. 3. Схема разбивки на отсеки НРС Jullian III

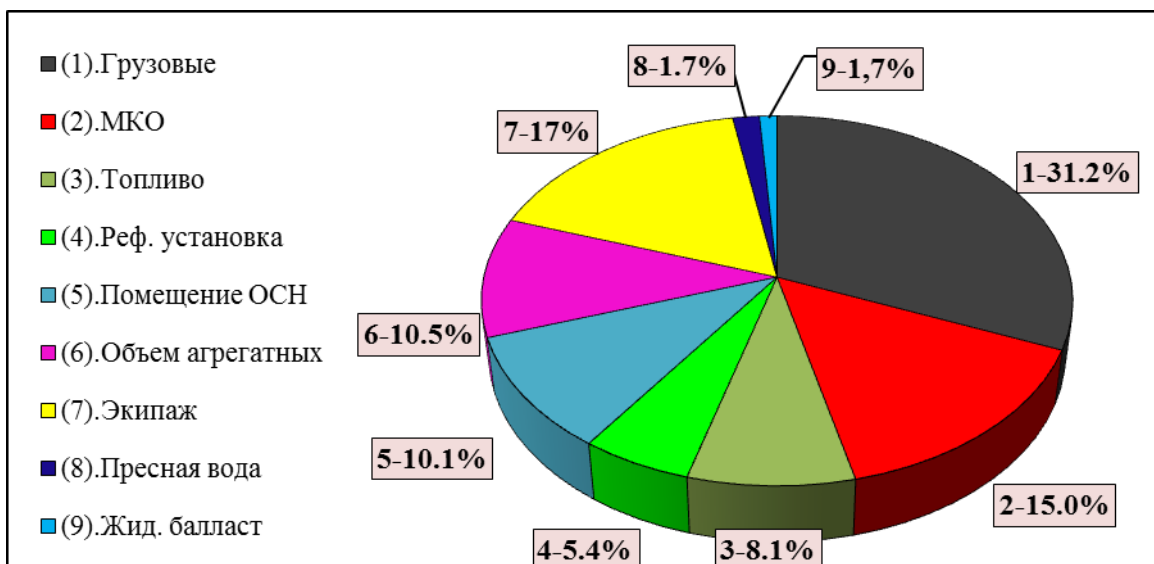


Рис. 4. Осредненные относительные объемы помещений НРС

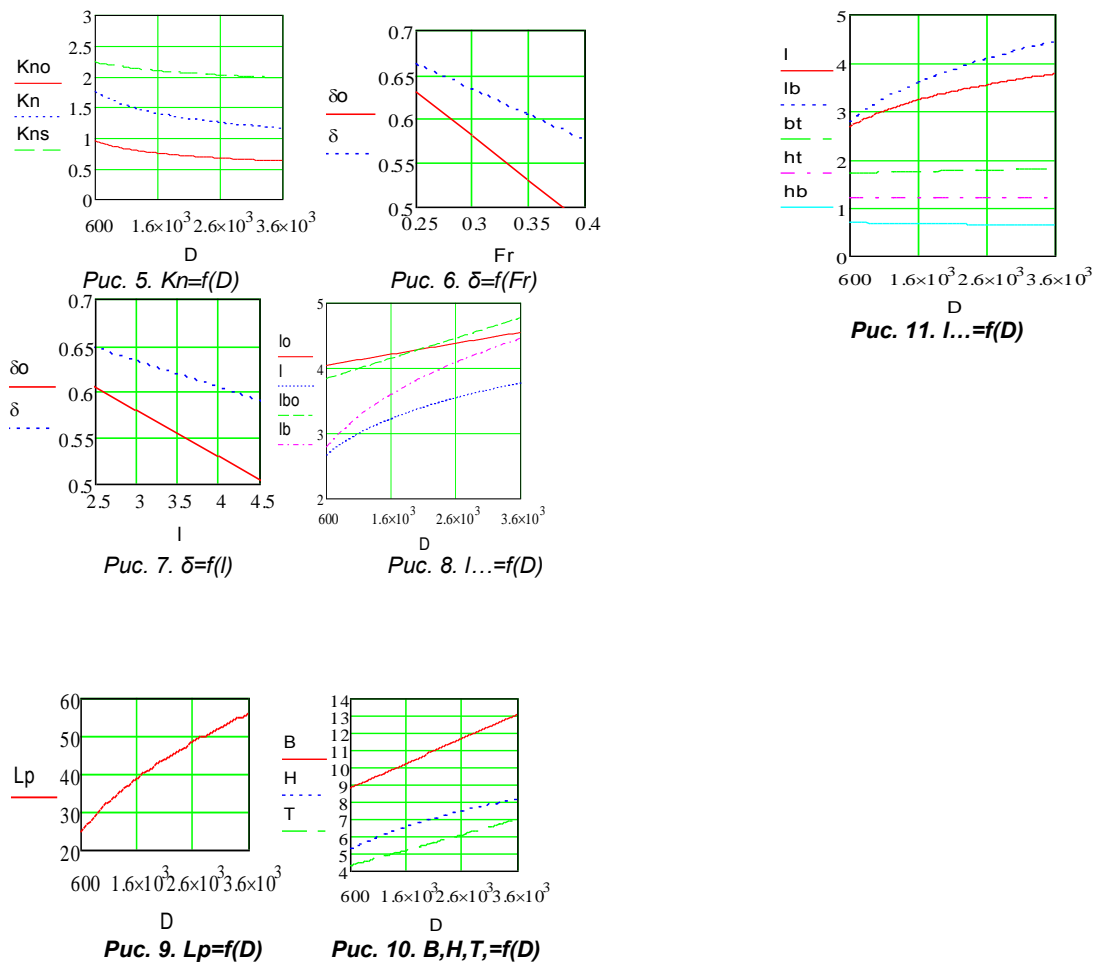
Обширный статистический анализ характеристик НРС, полученных из открытой печати и по результатам их реконструирования, представлен в [8]. Здесь же приведем лишь некоторые данные по энерговооруженности этих судов и форме и обводам. В сравнении с традиционными РС конца минувшего века, которые являются судами

сухогрузного типа (СРС), эти данные определяет НРС как отдельную характерную категорию РС. Это иллюстрируется графиками представленной распечатки, выполненной в редакторе *MathCad*. Это иллюстрируется графиками на рис. 5-11.

На рис. 5 видно, что у НРС средние значения энерговооруженности ( $K_n = N_{gd}/D$ ) значительно (примерно в два раза) превышают аналогичные значения  $K_{no}$  для СРС. Представляет интерес и суммарная ( $K_{ns} = (N_{gd} + N_{dg} + N_{wg})/D$ ) энерговооруженность НРС, которая также приведена на графике.

На рис. 6 отражается значительная разница регрессий по коэффициентам общей полноты  $\delta$  и  $\delta_o$ . При этом для НРС отметим слабую корреляционную связь  $\delta = f(Fr)$  при значениях среднеквадратического отклонения  $\sigma\delta = 0,18$  (т.е. в 30%). Значимой для НРС является связь  $\delta = f(l)$ , где  $l$  - относительная длина судна ( $l = L_p/V^{1/3}$ ) и  $\sigma\delta = 0,01$  (см. рис. 7). Значимой оказывается и связь  $l = f(D)$ , и разница в значениях  $l$  и  $l_o$ , и  $l_b$  и  $l_{bo}$ , где  $l_b = L_p/B$  (см. рис. 8).

Представление о размерениях НРС (его длины  $L_p$ , ширины  $B$ , высоты борта  $H$  и осадки  $T$ , м) и их зависимости от полного водоизмещения  $D$ , т, дают графики на рис. 9 и 10. Отметим, что эти статистические зависимости (равно как и  $\delta = f(Fr)$ ) являются лишь трендами, отражающими тенденции их изменения, и не имеют практическую значимость в рамках упрощенного статистического проектирования. С этих позиций **большой** интерес представляют соотношения размерений: уже рассмотренные  $l$  и  $l_b$ , а также  $bt = B/T$ ,  $ht = H/T$ ,  $hb = H/B$  с их значениями  $\sigma_i$  (см. рис. 11).





## 5. Обеспечение оптимизационного проектирования НРС

Оно предусматривает разработку и использование математической модели их проектирования (МПРС). Модель должна соответствовать рассматриваемому классу судов, учитывать обозримые тенденции их развития и отражать накопленный объем проектных обобщений.

В структуре МПРС условно выделяют блоки технический, эксплуатационный и экономический. При разработке МПРС для среднетоннажных НРС для технического и экономического блоков модели в качестве базовых могут быть приняты аналогичные блоки, разработанные применительно к малотоннажным судам для удаленных районов прибрежного рыболовства СРВ [9].

Для эксплуатационного блока в качестве базовой может быть принята модель МЭРС, основные положения которой изложены в [4]. В качестве объекта моделирования в ней принято универсальное РС, на котором в общем случае предусматриваются

рыбообрабатывающие линии производительностью  $Q_{obr}$ , т/сут, морозильная ( $Q_{mor}$ ) и рыбомучная ( $Q_{rmi}$ ) установки. Грузоподъемность судна складывается из ее значений по трюмам мороженой продукции и рыбной муки, наливным танкам и свежевому рефрижераторному трюму. Принятая схема технологического процесса освоения улова предусматривает приоритет заполнения морозильного трюма с последующим заполнением свежевого трюма и наливных танков. Соответственно факторами оптимизации являются производительность технологических линий судна и его грузоподъемность по видам вырабатываемой продукции.

Несмотря на определенную универсальность рассмотренной схемы освоения улова, для НРС в целом и для ТЭУ рыболовства СРВ в частности, более приемлемой представляется несколько иная схема, приведенная на рис. 12. Она учитывает известную значимую неопределенность в ведении промысла (сезонность по его районам, разнообразие видов добываемого сырья, нестабильность сырьевой базы и пр.) и предполагает задание единой грузоместимости судна. При этом обеспечивается обустройство рыбных танков, способных принимать не только рыбу наливом, но и (при осушении танков) мороженую продукцию, свежью и консервы вспомогательного консервного производства (ВКП). Рыбомучное производство в данной схеме не предусматривается, что характерно для современных НРС.

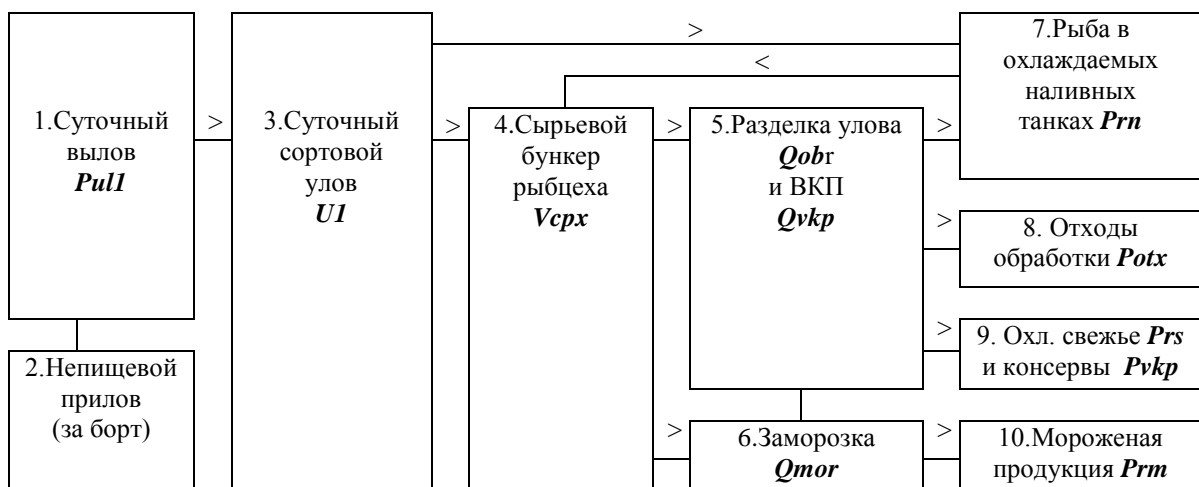


Рис. 12. Схема технологического процесса освоения улова НРС

В соответствии с данной схемой, как и в [4], при улове *Pull* (п.1) непищевой прилов (п.2) сразу отбрасывается за борт. Сортной улов (п.3) частично направляется в сырьевой бункер рыбцеха (п.4), а остальная часть – в охлаждаемые наливные танки (п.7). Отметим, что последующее пополнение сырьевого бункера может осуществляться как за счет очередного промыслового цикла (п.3), так и (при неудачном лове или прекращении промысла при возвращении судна в порт) из наливных танков (п.7).

В рыбцехе (п.5) осуществляется ВКП и разделка улова. Разделанная рыба направляется либо на заморозку (п.6) и в осушенные танки для мороженой продукции (п.10), либо в аналогичные танки для свежью (п.9), где хранится вместе с консервами ВКП. Отходы обработки направляются в танк отходов (п.8). При наличии резерва в производительности морозильной установки заморозке подвергается и неразделанная рыба сырьевого бункера (п.4).

Принятая универсальность в схеме освоения улова позволит рассматривать проектные и эксплуатационные задачи *НРС* с разными особенностями их назначения, в частности:

1. Чисто наливные суда. В данном случае в исходных данных модели обнуляются значения характеристик их технологического оборудования.

2. Свежьевые рыбообрабатывающие суда, предусматривающие свежевой трюм и наливные танки, в части из которых отходы обработки улова транспортируются в порт базирования.

3. Морозильно-свежьевые суда с обработкой улова, предусматривающие морозильный и свежевой трюмы и наливные танки.

Последующие оптимизационные исследования выполняются с использованием разработанной МПРС, а также методов оптимизации и методических положений и рекомендаций, которые приведены в [3] (глава 6).

### *Заключение*

В кратком изложении рассмотренные вопросы ТЭА укладываются в схему, представленную на рис. 13 и не требующую дополнительных комментариев.

<i>Инвестиционные решения в задаче развития и пополнения флота НРС</i>	<i>Аппарат принятия решений</i>	<i>Ожидаемые результаты принимаемых решений</i>	
		<i>для судовладельца</i>	<i>для отрасли в целом</i>
<i>1. Волевое приобретение или аренда действующих НРС</i>	<i>Рекламные материалы поставщика</i>	<i>Большие затраты на приобретение НРС, низкие показатели их эффективности и конкурентоспособности</i>	<i>Практическое исключение отечественных структур развития флота и современного промыслового судостроения</i>
<i>2. Приобретение судов по результатам выполненной экономической экспертизы</i>	<i>МЭРС [4]</i>	<i>Большие затраты на приобретение НРС, рост показателей их эффективности и конкурентоспособности</i>	<i>То же</i>

<i>3. Приобретение НМС по результатам модернизационного исследования</i>	<i>ММРС [3,5]</i>	<i>Большие затраты на приобретение НРС, рост показателей их эффективности и конкурентоспособности</i>	<i>Практическое исключение отечественных структур современного промышленного судостроения</i>
<i>4. Приобретение проекта и лицензии на постройку судов с модернизацией проекта или судна</i>	<i>МЭРС [4], ММРС [3,5]</i>	<i>Становление и развитие отечественной базы проектирования и постройки НМС и других типов судов, рост показателей их эффективности</i>	<i>Повышение роли структур развития флота и современного промышленного судостроения</i>
<i>5. Оптимизационное проектирование и постройка отечественных НМС</i>	<i>МПРС</i>	<i>Развитие отечественной базы проектирования и постройки РС, достижение оптимальных показателей их эффективности и обеспечение их конкурентоспособности</i>	<i>Способность самостоятельно и оперативно отслеживать и решать проблемы отрасли</i>

*Рис. 13. Инвестиционные решения и ожидаемые результаты*

В заключение отметим, что тот или иной объем ТЭА определяет его трудоемкость, стоимость и время выполнения. Одновременно растет роль фактора времени, зачастую определяемая по принципу «или своевременно, или нецелесообразно». Вместе с тем, использование современных информационных технологий резко снижает указанные негативные моменты ТЭА. При этом остается неизменно актуальным то, что отмечал советский авиаконструктор О.К. Антонов: «Экономить на расчетах, оценивающих громадные экономические мероприятия, все равно, что экономить на прицеливании при выстреле в цель».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Май Куок Чьонг. Проектное обоснование характеристик и элементов маломерных рыболовных судов Вьетнама с позиций обеспечения мореходных качеств: автореф. дис. ... канд. техн. наук / К.Ч. Май. – СПбГМТУ, СПб, 2010. – 24с.
2. Нго Дык Тханг. Методика проектирования и технико-экономическое обоснование характеристик наливных рыболовных судов для удаленных районов прибрежного рыболовства СРВ: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Д.Т. Нго. – СПбГМТУ, СПб, 2013. – 24 с.
3. Иванов В.П. Техничко-экономические основы создания рыболовных судов: учебник /В.П. Иванов. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2010. – 275 с.
4. Иванов В.П., Дудин С.Д., Курдюков С.Г. Математическое моделирование эксплуатации современного рыболовного судна при освоении его улова. / В.П. Иванов и др. – СПб: Морские интеллектуальные технологии, 2016, №3(33), т. 2, с. 62-66.
5. Иванов В.П. Проектирование судов рыбопромыслового флота: уч.-метод. пособие... по тематике «Модернизация рыболовного судна и оценка ее состоятельности». / В.П. Иванов. – Калининград: Изд-во ФГБОУ ВО «КГТУ», 2017. – 37 с.
6. Иванов В.П., Дудин С.Д., Курдюков С.Г. О реконструировании параметров проектирования современных рыболовных судов наливного типа. / В.П. Иванов и др. – СПб: Морские интеллектуальные технологии, 2016, № 3(33), т.2, с. 18-25.

7. Иванов В.П. Проектирование судов рыбопромыслового флота: уч.-метод. пособие по тематике «Реконструкция параметров проектирования рыболовных судов наливного типа» / В.П. Иванов. – Калининград: Изд-во ФГБОУ ВО «КГТУ», 2016. – 51 с.
8. Иванов В.П., Дудин С.Д., Зыонг В.Т. Анализ характеристик современных малотоннажных и наливных рыболовных судов для задач их проектирования / В.П. Иванов и др. – СПб: Морские интеллектуальные технологии, 2017, № 3(37), т.1, с. 48-56.
9. Иванов В.П., Нго Д.Т. Математическая модель наливного рыболовного судна для задач технико-экономического анализа его характеристик. / В.П. Иванов, Д.Т. Нго; Материалы X междунар. конф.... – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2012. – С.131-137.

### **THE METHODOLOGICAL QUESTIONS IN OPTIMIZATION DESIGN FISHING VESSEL WITH REFRIGERATED SEA WATER (RSW) TANKS FOR VIETNAMESE MARINE FISHERY**

Duong Van Thanh, PhD student  
Ivanov Vladimir Pavlovich Dr. Sci. Tech., the professor

Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,  
e-mail: dtn.ivanov@yandex.ru

Discussed the methodology of development of marine fisheries and replenish the fleet of modern fishing vessels the EOT filling type for marine fisheries (LDCs). Describes the basic provisions on the methodology for the efficiency and competitiveness of these courts for the techno-economic conditions of Vietnam. Selected range of tasks related to techno-economic analysis (TEA) medium-tonnage LDCS which includes selection of vessels-applicants, finding technical solutions to improve their effectiveness, the provision modernisation methods optimization of design.

УДК 629.12.001.57

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВМЕСТИМОСТИ СОВРЕМЕННЫХ СРЕДНЕТОННАЖНЫХ РЫБОЛОВНЫХ СУДОВ НАЛИВНОГО ТИПА**

Зыонг Ван Тхань, аспирант

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,  
Калининград, Россия, e-mail: duongvthan@gmail.com

*Рассмотрена задача определения вместимости и ее составляющих применительно к современным среднетоннажным рыболовным судам наливного типа (НРС). В качестве исходных данных использованы материалы из периодической печати, аналитических обзоров и сайтов проектно-конструкторских организаций в виде рекламных проспектов. В ходе исследования с использованием программного продукта Maxsurf реконструированы теоретические чертежи ряда современных судов с последующей разбивкой их корпусов на функциональные отсеки*

## Введение

В процессе проектирования новых рыболовных судов требуются изучение, анализ и использование проектных и других технических характеристик современных зарубежных судов, отражающих достижения в промышленном рыболовстве и промысловом судостроении в целом, а также опыт их проектирования и эксплуатации. Неопределенность в значениях современных проектных параметров, характерная для условий неполной технической информации по судам, значимо сокращается в результате реконструирования их характеристик (см. [1]).

Одной из важных задач, стоящих перед проектировщиками рыболовного судна, является обеспечение объемов, необходимых для размещения груза, механизмов, жилых и служебных помещений, помещений производственно-технологического оборудования, судовых запасов топлива, воды, балласта и пр. (см. [2], [3]). С целью обобщения характеристик НРС и получения проектных параметров их вместимости в данной работе из сети интернета и периодической печати отобрано 25 современных среднетоннажных судов наливного типа. Диапазон их характеристик составил по длине 23...60м, по водоизмещению 600...3600т, по мощности главных двигателей 1000...4000 кВт, по грузоместимости 200...1700 м<sup>3</sup> и по численности экипажа 8...14 чел. Полученная информация носила рекламный характер, с представлением лишь основных эксплуатационных характеристик судов и схем их общего расположения (ОР). Пример схемы ОР одного из таких судов представлен на рис. 1.

Из числа этих судов 10 (см. табл. 1) были реконструированы. При этом использован современный корабельный программный продукт Maxsurf, который обеспечивает удобную возможность воссоздания теоретических чертежей судов и, по схемам их общего расположения, разбивки их корпусов на функциональные отсеки с представлением комплекса их геометрических характеристик.

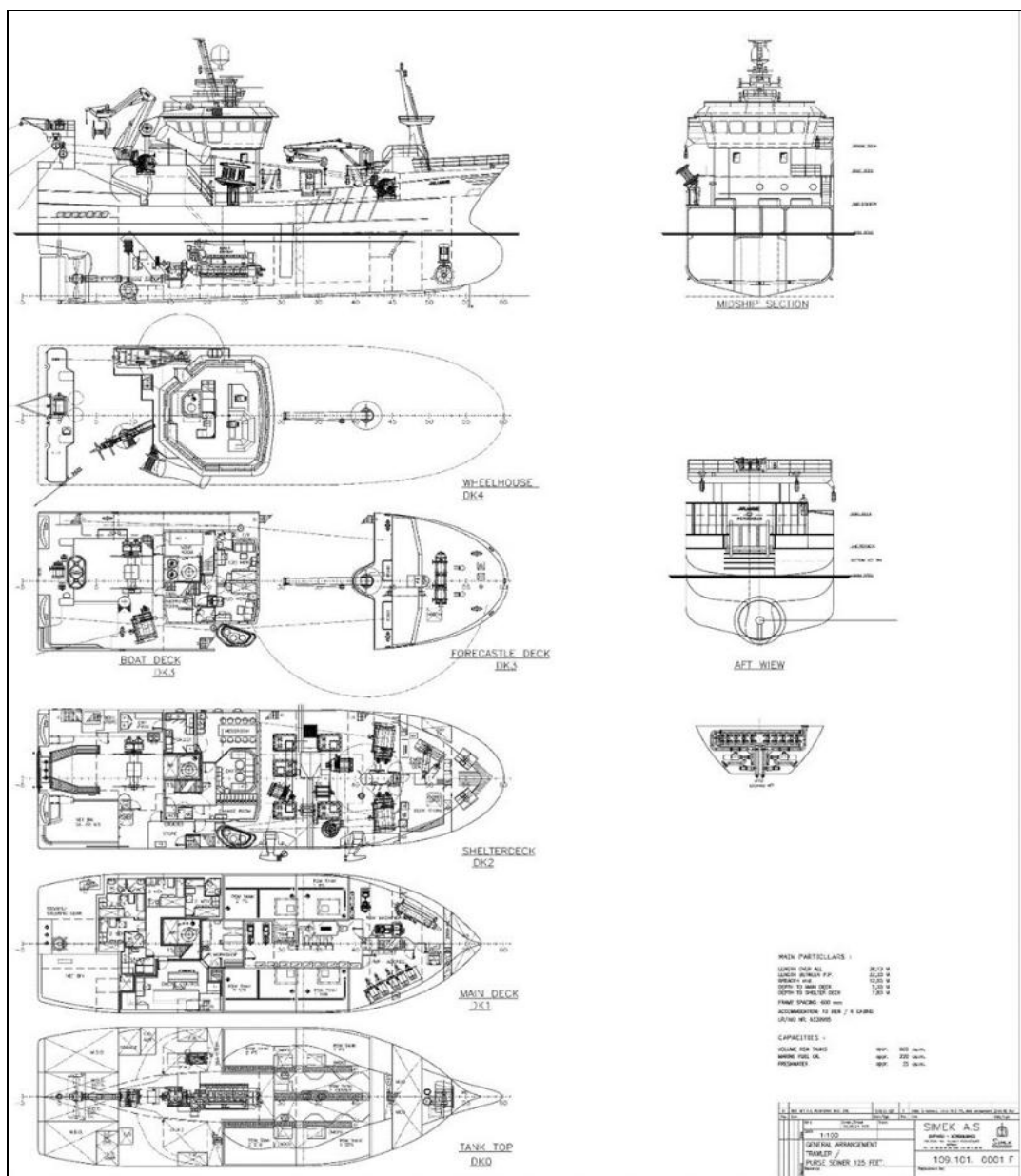


Рис. 1. Схема общего расположения 33-метрового НРС Jullian III

Таблица 1

Характеристики мало и среднетоннажных рыболовных судов наливного типа

№	Суда	Lp, м	B, м	H, м	T, м	v <sub>ср</sub> , уз.	Nek, чел.	Ngd, кВт	Ndg, кВт	Nref, кВт	Wgrz., м <sup>3</sup>
1	Sildaskjaer	23,60	8,50	5,98	4,70	11,50	9	1050	332	223	195
2	Solvaerskajer	28,70	9,30	6,20	4,90	12,00	9	1319	428	465	368
3	JulianneIII	33,30	12,00	7,80	6,63	13,90	12	3000	910	600	584
4	Silva Nova	36,00	10,00	7,30	6,15	13,00	9	2460	630	528	535
5	Norafjell	38,40	10,00	7,00	6,00	15,00	14	2400	1162	744	570
6	Clipperton	46,30	10,00	7,15	6,50	15,00	8	2031	690	756	1023
7	Veronica	49,80	12,00	7,60	6,80	14,60	11	3975	1040	1512	1580
8	Paula	51,60	12,00	8,00	7,00	16,00	-	3460	1411	2558	1430
9	Svanaug Elise	56,40	13,00	8,60	6,46	17,50	-	3460	1240	1506	1550
10	Qavak	60,00	12,60	8,40	7,15	16,00	14	3840	2313	1884	1700

$L_p$  – длина между перпендикулярами,  $B$  – ширина,  $H$  – высота борта,  $T$  – осадка,  $v_s$  – скорость,  $N_{ek}$  – численность экипажа,  $N_{gd}$  – мощность главного двигателя,  $N_{dg}$  – мощность дизель-генератора,  $N_{wg}$  – мощность валогенератора,  $N_{ref}$  – мощность рефрижераторной установки,  $W_{trз}$  – фактический объем грузового трюма.

Общая схема реконструирования, принятая в данной работе, представлена на рис. 2, а пример детализированной разбивки корпуса судна на отсеки (с построением линий палуб и переборок) - на рис. 3. При выполнении расчетов геометрических характеристик судна и его отсеков использован программный модуль Hydromax (в составе пакета Maxsurf).

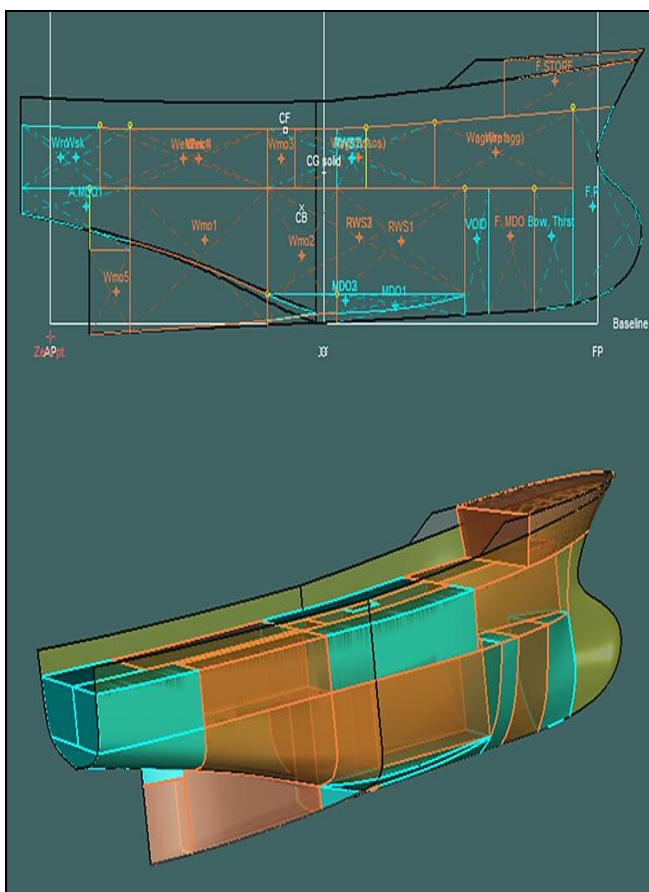
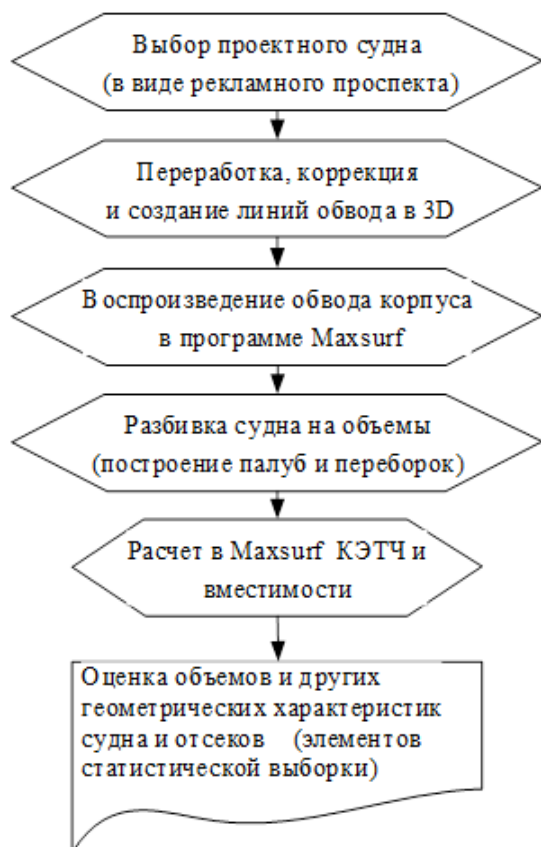


Рис.2. Общая схема реконструкции Рис. 3. Схема разбивки на отсеки НРС Jullian III

Далее результаты реконструкционных расчетов вместимости, выполненных для группы судов, были статистически обработаны с выявлением взаимосвязи ее характеристик с элементами и другими характеристиками НРС. Для оценки степени надежности регрессии статистических данных использован коэффициент детерминации  $R$ - квадрат, а для оценки степени рассеивания коэффициента вариации  $\delta v = \sigma / \bar{y}$  (где  $\sigma$  - среднеквадратичное отклонение и  $\bar{y}$  - математическое ожидание).

## Основные результаты исследования

### 1. Классификация помещений НРС

Анализ архитектурно-конструктивного типа НРС показывает, что их компоновка характерна наличием двух палуб, бака и юта или двухъярусной надстройки

с рубкой, смещенной в корму от миделя. Среднюю часть судна занимают грузовые помещения в виде наливных рефрижераторных танков. С целью повышения эффективности эксплуатации на отдельных судах предусматриваются рыбообрабатывающие линии.

Полная вместимость НРС  $W_c$ , м<sup>3</sup>, может быть разделена на следующие составляющие:

- помещения общесудового назначения ( $W_{osn}$ ), конструктивно выделенные в оконечностях судна.  $W_{osn}$  включает в себя объемы форпика (боцманские кладовые и носовой бульб), помещения рыбопоискового комплекса и носового подруливающего устройства, румпельного отделения и сетевых кладовых  $W_{sn}$ ,
- грузовые помещения для хранения рыбной продукции  $W_{gr}$ ,
- цистерны топливные  $W_{tp}$  и для пресной воды  $W_{pv}$ ,
- жилые и бытовые помещения для экипажа  $W_{ek}$ ,
- агрегатные помещения судна  $W_{agr}$  (рыбообрабатывающий цех и вспомогательные помещения технологического назначения),
- помещение рефрижераторной установки  $W_{ref}$ ,
- машинно-котельное отделение (МКО)  $W_{mo}$  (за вычетом объемов для запасов топлива и пресной воды, расположенных в МКО).

Полная вместимость рыболовного судна  $W_c$  измеряется суммарным объемом основного корпуса  $V_k$ , надстроек и рубок  $V_s$ :

$$W_c = V_k + V_s = V_k(1 + S_n), \quad (1)$$

где  $S_n$  – коэффициент развития надстроек (отношение объемов надстроек и рубок к объему основного корпуса). Для НРС данного класса коэффициент  $S_n$  колеблется в диапазоне от 0,12 до 0,17.

Для определения вместимости основного корпуса НРС может быть использована формула:

$$V_k = K_{sdl} \cdot C_v \cdot D \cdot (H/T)^{\alpha/\delta}, \quad (2)$$

где  $K_{sdl} = 1,015 \pm 0,01$  – коэффициент, учитывающий седловатость судна и погибь бимсов,  $C_v$  – эмпирический коэффициент, значение которого  $C_v = 0,986 \pm 0,01$  при  $\delta v = 3\%$ ,  $\alpha$  и  $\delta$  – коэффициенты полноты судна.

Таким образом, выражение для полной вместимости НРС может быть представлено в виде:

$$W_c = (1 + S_n) \cdot K_{sdl} \cdot C_v \cdot D \cdot (H/T)^{\alpha/\delta}. \quad (3)$$

По результатам расчетов вместимости НРС осредненное распределение объема его основного корпуса между составляющими отражено на рис 4.



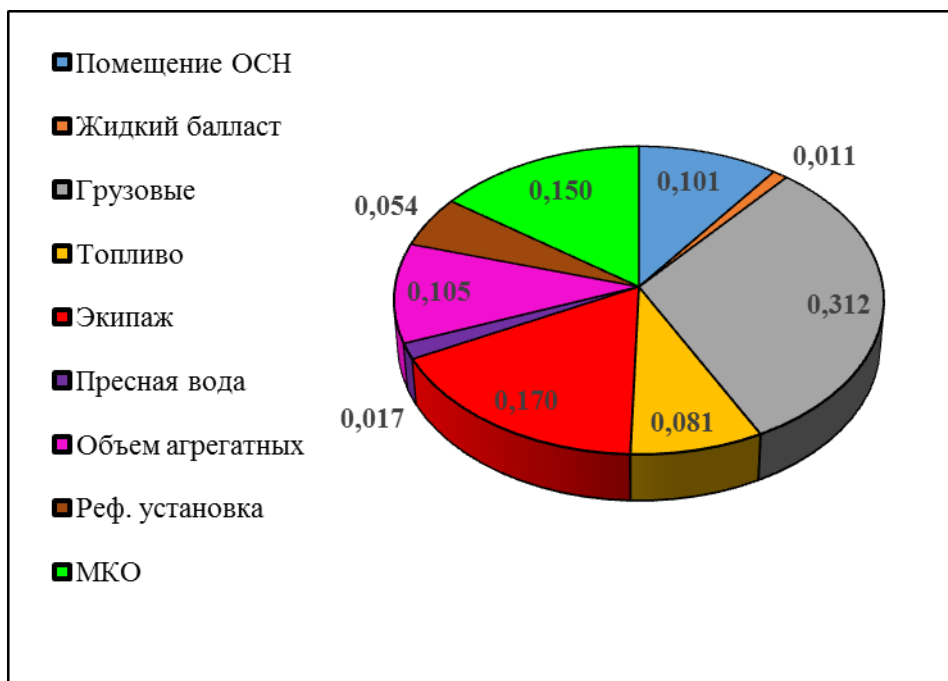


Рис. 4. Осредненные относительные объемы составляющих помещений судна

## 2. Объем грузовых помещений НРС

Из рис. 4 видно, что главной долей вместимости НРС являются наливные танки с грузом рыбной продукции  $W_{grz}$ . Их объем определяется регрессиями в зависимости от водоизмещения (см. рис. 5):

$$W_{grz} = 0,49D - 98,02 \pm 53 \quad (4)$$

или от длины судна:

$$W_{grz} = 44,7Lp - 952. \quad (5)$$

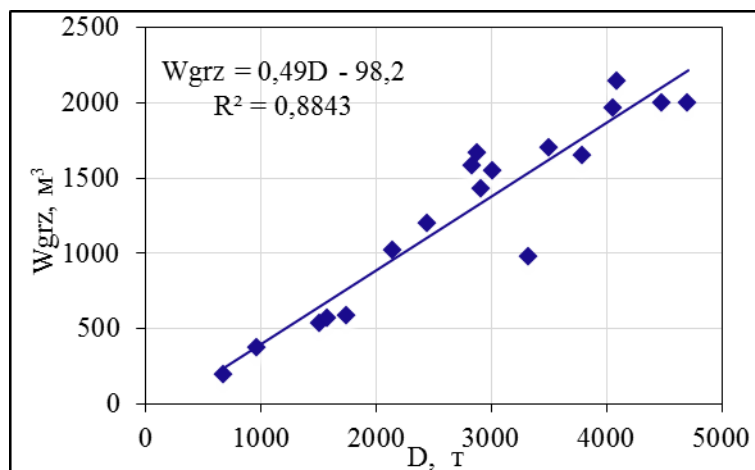


Рис. 5. Зависимость объема трюма от водоизмещения судна

Фактический объем  $W_{grz}$  обычно приводится в составе характеристик заданного судна и соответствует массе рыбной продукции в таре  $P_{grz} = W_{grz} / w_{pgr}$ , т. Здесь  $w_{pgr}$  – удельный погрузочный объем данной рыбной продукции, м³/т. Для наливного судна

( $w_{pgrn}=1$ ) он значительно (в 2-3 раза) меньше чем, у судов сухогрузного типа. Наливной рыбный танк заполняется не только рыбой, но и водой, которая как бы исполняет функции тары, определяемой коэффициентом  $Ktar$ . В приводимых расчетах принято  $Ktar = 1,2$ . Это означает, что в рыбном танке 20% воды, а масса собственной рыбы составляет  $Pgr = Pgrz/Ktar$ . Теоретический объем всех грузовых помещений судна  $Wgr$  включает в себя потери фактического объема на судовой набор и изоляцию рыбных трюмов или танков. Значение этого коэффициента потерь определяется соотношением  $Kniz = Wgrz/Wgr$ .

### 3. Объем машинно-котельного отделения

МКО на современных НРС размещается в корме и характеризуется мощностями (кВт) главного двигателя  $Ngd$ , вспомогательных дизель-генераторов  $Ndg$  и валогенераторов  $Nwg$ , а также значениями  $Ngdd = Ngd + Ndg$  и  $Ns = Ngdd + Nwg$ .

Для оценки объема  $Wmo$ , занимаемого МКО, получена формула (см. рис. 6)

$$Wmo = 0,1233Ngdd, \quad (6)$$

Относительный объем МКО в среднем составляет  $Wmo/Ngdd = 0,122 \pm 0,026$  и определяется регрессией

$$Wmo/Ngdd = 0,115 + 2Ngdd/106. \quad (7)$$

Рефрижераторная установка НРС производительностью  $Qref$ , кВт, не всегда размещается в МКО. Для оценки занимаемой ею объема можно воспользоваться регрессией:

$$Wref = 0,178 \cdot Nref. \quad (8)$$

При компоновке МКО важной характеристикой является также его длина  $Lmo$ , определяемая в значительной мере длиной главного двигателя. По результатам обработки соответствующих данных получены тесные связи между значениями  $Lmo$  и мощностью судна. Для оценки  $Lmo$  могут быть использованы регрессии (см. рис.7):

$$Lmo = 0,128Ngdd^{0,5579} \quad (9)$$

и

$$Lmo = 0,1674Ns^{0,5115} \quad (10)$$

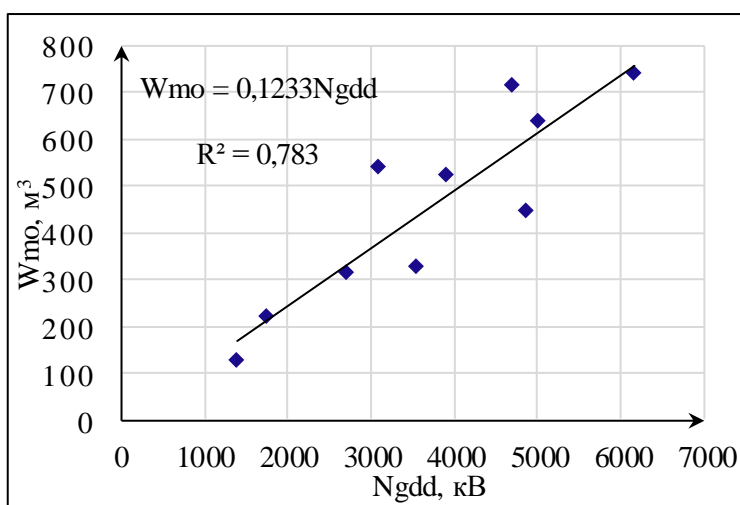


Рис. 6. Зависимость объема  $Wmo$  от значений  $Ngdd$

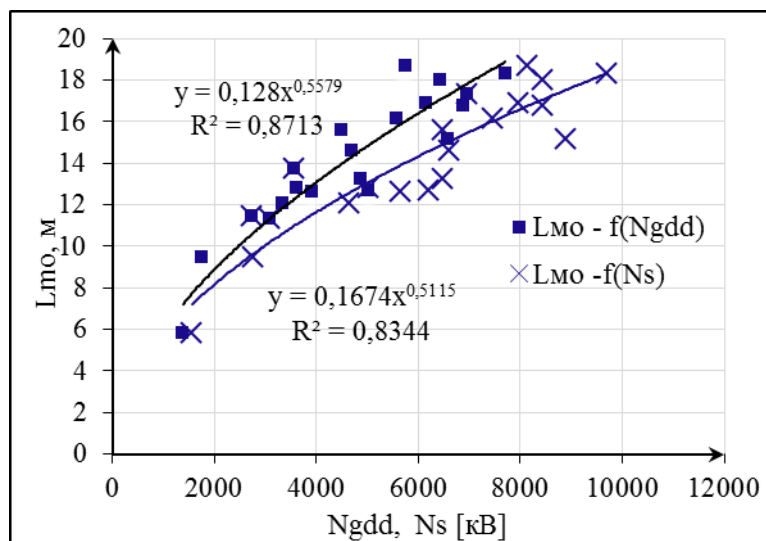


Рис.7. Зависимости длины МО от мощности судна

#### 4. Объемы других помещений судна

Объемы помещения общесудового назначения  $W_{osn}$  и агрегатных  $W_{agr}$  могут рассматриваться как доли объема корпуса (см. рис.8) в соответствии с регрессиями:

$$W_{osn} = 0,11V_k \quad (11)$$

$$W_{agr} = 0,0877 \cdot V_k + 61,4 \quad (12)$$

Объем помещений для размещения экипажа зависит не только от его численности, но и от водоизмещения судна и может быть определен (при  $R^2 = 0,886$ ) по формуле

$$W_{ek} = 4,122N_{ek}^{0,737} D^{0,393} \quad (13)$$

Информация по судовым запасам дизельного топлива и пресной воды, как правило, известная, поскольку приводится в рекламных проспектах современных НРС.

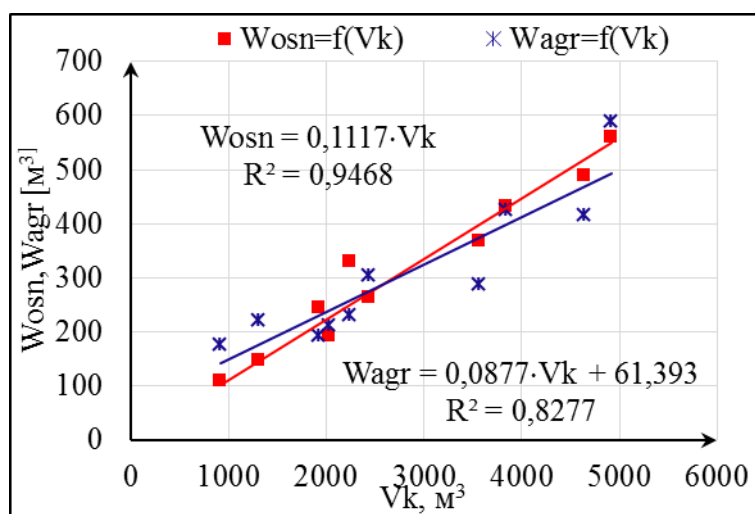


Рис. 8 Зависимость объемов  $W_{osn}$ ,  $W_{agr}$  от объема основного корпуса  $V_k$  судна

В заключение отметим, что для оценки практической значимости полученных регрессий выполнены сопоставительные расчеты вместимости фактической (по формуле (3)) и потребной, определяемой по полученным эмпирическим зависимостям:

$$W_{sp} = \sum W_i = W_{osn} + W_{bl} + W_{gr} + W_{tp} + W_{pv} + W_{ref} + W_{agr} + W_{mo} \quad (14)$$

Средняя разница между значениями этих объемов составила менее 5%. Это свидетельствует о том, что полученные регрессии имеют приемлемую точность и могут быть использованы при составлении уравнения вместимости в математической модели НРС. Вместе с тем необходимо также отметить, что отмеченная погрешность в расчетах в первую очередь определяется разбросом статистических данных по объемам МКО, характерных разнообразием по схеме их компоновки. Поэтому при расчетном определении объемов МКО необходимо учитывать индивидуальные особенности энергетической установки конкретных НРС, принимаемых в процессе проектирования в качестве судов-прототипов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов В.П., Дудин С.Д., Курдюков С.Г. О реконструировании параметров проектирования современных рыболовных судов наливного типа / В.П. Иванов и др. – СПб.: Морские интеллектуальные технологии, 2016, № 3(33), т.2, с. 18-25.
2. Иванов В.П. Техничко-экономические основы создания рыболовных судов. – Калининград: БГАРФ, 2010. – 275 с.
3. Раков А.И., Севастьянов Н.Б. Проектирование промысловых судов. – Л.: Судостроение, 1981. – 376 с.

#### **INVESTIGATION OF CAPACITY CHARACTERISTICS OF MODERN MEDIUM-TONNAGE FISHING VESSELS WITH REFRIGERATED SEA-WATER (RSW) TANKS**

Duong Van Thanh, PhD student

Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,  
e-mail: duongvthanh@gmail.com

*The problem of determining the hull capacity and its components of modern medium tonnage fishing vessels with RSW tanks was mentioned. The material from periodicals, analytical reviews and sites of design organizations in the form of a brochure was used as the initial data for the study. In the course of the research with using Maxsurf software, theoretical drawings of a number of modern vessels were reconstructed and followed division the their hull into compartments were carried out From the result of calculations of their capacities, regression dependences of the volume of individual compartments of the vessel on its main elements and characteristics were generated.*

## ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ФЛЮСА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СОДЕРЖАНИЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В СВАРНЫХ ШВАХ ПРИ СВАРКЕ СУДОСТРОИТЕЛЬНЫХ СТАЛЕЙ

Игушев Валерий Федорович, доцент, канд. техн. наук  
Веревкин Валерий Иванович, профессор, д-р техн. наук  
Безсмолова Ирина Васильевна, доцент, канд. техн. наук  
Зеброва Елена Михайловна, доцент, канд. техн. наук

Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО  
«КГТУ», Калининград, Россия, e-mail: igushev\_tmm@bga.gazinter.net

*На основании экспериментальных данных показано, что при дуговой сварке под флюсом судостроительных сталей применение смеси плавящихся флюсов окислительного стекловидного АН-348А и слабоокислительного неметаллического АН-67Б в соотношении 50 % : 50 % приводит к получению сварных швов с пониженным содержанием неметаллических включений, повышенными механическими свойствами и особенно ударной вязкости и небольшому повышению коррозионной стойкости*

К сварным соединениям судов предъявляются высокие требования по коррозионной стойкости и механическим свойствам: а именно по пределу текучести, пределу прочности на разрыв и ударной вязкости для судов, работающих в условиях севера. При изготовлении судов применяются в основном низколегированные стали, составы которых были взяты из сертификатов качества судостроительного завода «Янтарь» и приведены в таблице 1.

Таблица 1

### Химический состав судостроительных сталей

№ п/п	Марка стали	Химический состав стали, %									
		Si	Cr	Ni	Cu	Mn	C	Mo	Ti	Al	V
1	D40S	0,95	0,89	0,52	0,43	0,79	0,14	-	0,07	0,03	0,04
3	E36	0,21	0,04	0,03	0,06	0,98	0,09	0,02	0,03	0,34	0,22
4	E32	0,20	0,03	0,03	0,02	1,21	0,15	<0,01	<0,05	0,33	<0,05
5	A36	0,24	0,04	0,02	0,04	0,91	0,09	0,02	0,03	0,29	0,26

Анализ составов судостроительных сталей показывает, что в судостроении применяются в основном кремнемарганцовистые низколегированные стали. Эти стали обладают удовлетворительной свариваемостью, достаточно большим пределом текучести, малой склонностью к хрупкому разрушению, что обеспечивает надежную работу сварных конструкций в течение длительного времени. Указанные преимущества, а также высокая стойкость к переменным циклическим нагрузкам способствует тому, что стали этого класса, находят все большее применение для изготовления сварных конструкций. Однако в ряде случаев их использование связано с преодолением ряда трудностей, возникающих при сварке. Прежде всего, необходимо

сформировать такую структуру, которая обеспечивала бы равнопрочность сварного соединения и основного металла и высокий предел текучести. Последнее подбирается путем выбора соответствующих сварочных материалов и разработки технологии сварки. Следует обратить внимание, что в судостроении стали выбираются по пределу текучести в отличие от машиностроения, где основной характеристикой является предел прочности металла на разрыв.

Остановимся более подробно на стали D40S, которая имеет наиболее высокие механические свойства, в частности предел текучести  $\sigma_T \geq 390$  МПа и применяется для изготовления борта судна.

Сталь D40S в условиях поставки имеет ферритно-перлитную структуру, хорошо сваривается и в процессе автоматической дуговой сварки под флюсом, как правило, не закаливается и имеет ферритно-перлитную структуру в зоне термического влияния [1].

При автоматической дуговой сварке под флюсом низколегированных кремнемарганцовистых сталей часто используется низколегированная проволока Св-08ГА.

Механические свойства и коррозионная стойкость металла шва зависят не только от состава металла, но и от содержания газов и неметаллических включений в шве. При автоматической дуговой сварке под флюсом основным поставщиком кислорода и неметаллических включений в сварной шов является флюс [2,3].

Рассмотрим более подробно выбор флюса и влияние его на свойства металла. При существующей широкой номенклатуре сталей и флюсов выбор флюса для сварки конкретного изделия представляет собой непростую задачу, которая усложняется тем, что наряду с правильным выбором сварочно-технологических свойств флюса необходимо определить оптимальный металлургический вариант сварки, включающий сочетание проволоки и флюса.

Флюсы, предназначенные для сварки низколегированных сталей, должны обеспечивать легкую отделимость шлаковой корки, высокое качество формирования шва и высокие механические свойства. Для выполнения этих требований во флюсе обычно снижают содержание окислов кремния. Поэтому при сварке низколегированных сталей желательно применять низкокремнистые флюсы.

Существуют принципиально различные подходы к вопросам металлургии сварки легированных сталей [2,3]. Первый из них заключается в том, что низколегированные стали являются металлургически законченными, хорошо раскисленными продуктами, и поэтому основная задача флюсов при сварке этих сталей должна сводиться к защите зоны расплавления от атмосферного влияния. Необходимая степень легирования шва может быть достигнута путем использования сварочной проволоки соответствующего состава. Это возможно при сварке под химически инертными флюсами, не содержащими в своем составе такие непрочные окислы, как FeO, MnO, SiO<sub>2</sub>. Эти флюсы применяются в основном для сварки средне- и высоколегированных сталей, содержат, как правило, фтористый кальций для удаления водорода и образуют шлаковую корку, плохо удаляемую с поверхности шва.

Если в зоне сварки созданы окислительные условия, в ней происходят другие процессы, а именно: снижаются концентрации растворенных в жидком металле водорода и углерода, что повышает стойкость швов против образования пор и трещин, обеспечивается более благоприятное распределение серы и фосфора между металлом и сварочным шлаком.

Эти преимущества обуславливают другой принципиальный подход к металлургии сварки низколегированных сталей. В соответствии с ним большинство сварочных флюсов, предназначенных для сварки низколегированных сталей должны иметь окислительный характер. Но иногда для сварки низколегированных сталей

применяют низкокремнистые слабоокислительные флюсы, к которым относятся такие как АН-47 и АН-65, АН-67Б [3]. В этих флюсах  $\text{SiO}_2$  заменен на  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Однако в отношении качества формирования швов, их стойкости против образования пор и некоторых других характеристик низкокремнистые слабоокислительные флюсы уступают высококремнистым. В связи с этим в последнее время получили существенное развитие исследования, направленные на снижение вредного влияния большого содержания  $\text{SiO}_2$  во флюсе на свойства металла шва.

Для решения задачи сочетания хороших сварочных свойств флюса с высокой коррозионной стойкостью и повышенными механическими свойствами сварного соединения в работе была предпринята попытка уменьшить содержание неметаллических включений в сварных швах.

Установлено, что повышение кислорода в металле шва при сварке под флюсом пропорционально интенсивности кремнийвосстановительного процесса. Снизить интенсивность протекания кремнийвосстановительного процесса при сварке стали под флюсом с достаточно высоким содержанием  $\text{SiO}_2$  можно несколькими путями [3]: снижением термодинамической активности  $\text{SiO}_2$  путем введение в состав флюса большого количества  $\text{CaO}$ , введением во флюс окислов железа, тормозящих протекание кремнийвосстановительного процесса, применением сварочной проволоки с большим содержанием кремния. Было установлено, что сварочные свойства флюса и механические свойства металла шва улучшаются при дополнительном введении во флюс некоторого количества окислов титана и циркония. При этом снижается содержание неметаллических включений в швах. Анализ полученных данных говорит о возможном создании плавящихся флюсов с относительно высоким содержанием кремнезема, обладающих высокими сварочными свойствами и дающие возможность получить сварные швы с низким содержанием неметаллических включений.

Исследования показывают, что оптимальное содержание кислорода в металле шва составляет 0,02 – 0,035%, что в переводе на неметаллические включения будет составлять примерно 0,045 – 0,065%. Учитывая вышеизложенное, в работе были проведены исследования и оценена возможность использования известных флюсов и их смесей со сварочной проволокой Св-08ГА, которая широко используется для сварки судостроительных сталей. Сварочная проволока содержит:  $\text{C} \leq 0,1\%$ ,  $\text{Si} \leq 0,06\%$ ,  $\text{Mn} - 0,8 - 1,1\%$ ,  $\text{Ni} \leq 0,25\%$ ,  $\text{Cr} \leq 0,1\%$ .

На коррозионную стойкость и механические свойства, особенно на ударную вязкость металла шва оказывает большое влияние также состав флюса и режим сварки. Для сварки низколегированных сталей широко применяются окислительные флюсы марок АН-348А, АН-67Б, АН-60 и АН-47 (ГОСТ-9087-81, ГОСТ Р 52222-2004) [2-4]. Химический состав флюсов приведен в таблице 2.

Таблица 2

### Химический состав флюсов

Марка флюса	Содержание основных компонентов, %									
	$\text{SiO}_2$	$\text{MnO}$	$\text{MgO}$	$\text{CaO}$	$\text{CaF}_2$	$\text{TiO}_2 + \text{ZrO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	S	P
АН-348А	41-44	34-38	5-7,5	$\leq 6,5$	4-5,5	-	$\leq 4,5$	$\leq 2$	$\leq 0,15$	$\leq 0,12$
АН-67Б	15,5	15,7	-	7,0	14,0	5,5	38,5	0,5	$\leq 0,09$	$\leq 0,1$
АН-60	42,5-46,5	37-41	0,5-3	3-11	5-8	-	$\leq 5$	$\leq 0,9$	$\leq 0,09$	$\leq 0,1$
АН-47	28-32	14-18	6,5-10,5	13-17	9-13	6-8	9-13	$\leq 2$	$\leq 0,05$	$\leq 0,05$

При разработке технологии сварки была изучена возможность использования вышеперечисленных флюсов для сварки образцов судостроительной стали D40S их влияние на свойства металла шва и содержание неметаллических включений.

В первой серии опытов определяли влияние флюса на формирование шва, форму шва.

Образцы из стали D40S собирали без зазора и без разделки кромок, сваривали автоматическим способом проволокой Св-08ГА под флюсами АН-348А, АН-67Б, АН-60, АН-47. Исследование данных образцов показало, формирование швов при сварке под флюсами АН-348А, АН-60 хорошее с плавным переходом к основному металлу. Образец, сваренный под флюсами АН-67Б и АН-47, имел неудовлетворительное формирование, что связано с пониженным содержанием окислов кремния во флюсе. Швы, полученные при сварке под пемзовидным флюсом АН-67Б, имели несколько меньшее проплавление по сравнению со швом, полученным при сварке под стекловидным флюсом АН-348А.

Для дальнейших исследований были выбраны флюсы марок АН-348А и АН-67Б. В качестве основного был выбран стекловидный флюс АН-348А. Он широко применяется для сварки низкоуглеродистых и низколегированных сталей. При сварке под этим флюсом устойчивость дуги хорошая до 13 мм, формирование шва хорошее, склонность металла шва к образованию пор и трещин низкая [3]. Данный флюс имеет следующие недостатки: в связи с повышенным содержанием окислов кремния и марганца при сварке под этим флюсом интенсивно протекают кремне- и марганцевосстановительные процессы, что приводит к повышенному содержанию кислорода в швах до 0,06% (для однопроходных). Наличие в металле шва повышенного количества кислорода, может привести к образованию неметаллических включений и снижению коррозионной стойкости, механических свойств и ударной вязкости, особенно при отрицательной температуре.

Для снижения кремне- и марганцевосстановительных процессов при сварке под флюсом в настоящей работе сварка образцов из низколегированной стали D40S проводилась проволокой Св-08ГА под смесью флюсов. В качестве второго компонента для флюса АН-348А использовался флюс АН-67Б.

Флюс АН-67Б пемзовидный имеет пониженное содержание окислов кремния и марганца. При сварке под этим флюсом шов получается широким с небольшим проплавлением. Кремне- и марганцевосстановительные процессы протекают слабо, в шве малое содержание кислорода и неметаллических включений. Этот флюс рекомендуется применять в тех случаях, когда требуется высокая ударная вязкость металла шва при низких температурах (ниже  $-35^{\circ}\text{C}$ ). Применение его ограничено из-за неудовлетворительного формирования шва. Кроме этого при сварке под этим флюсом создаются неблагоприятные санитарно-гигиенические условия, из-за повышенного содержания фтористого кальция во флюсе.

Образцы из стали D40S, толщиной 16 мм собирали без зазора и без разделки кромок, сваривали автоматическим способом проволокой Св-08ГА под флюсами АН-348А и АН-67Б.

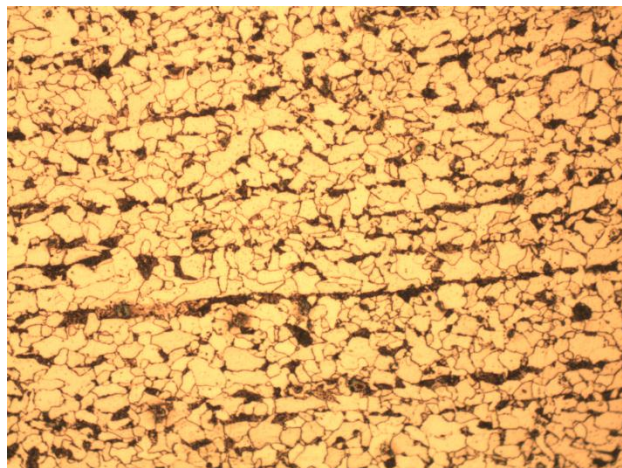
Микроструктуру изучали на поперечном шлифе, после травления металла в 4% спиртовом растворе азотной кислоты. Исследование проводилось с помощью металлографического микроскопа при различных увеличениях.

Структура основного металла состоит из мелких зерен феррита и пластинчатого перлита (балл зерна по ГОСТ 5639-82 не менее 10) (рис. 1). Загрязненность неметаллическими включениями не более 1 балла по шкале (ГОСТ 1778-70).

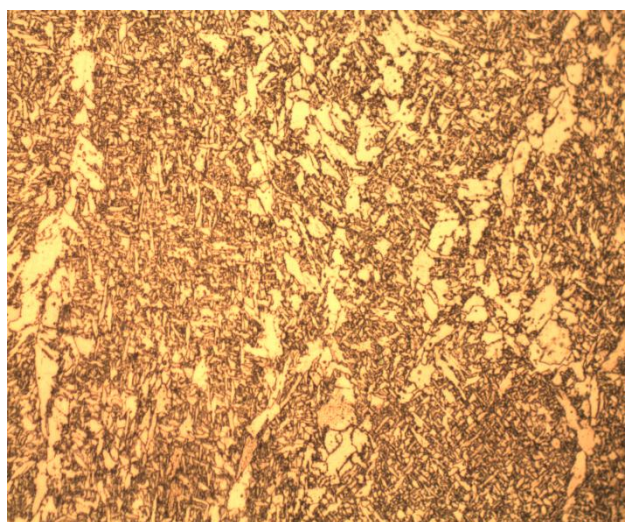


Эксперименты показали, что оптимальной композицией сварочных материалов при сварке стыковых швов является проволока Св-08ГА под смесь флюсов АН-348А и АН-67Б при соотношении 50%:50%. При сварке данной проволокой металл шва имеет высокие механические свойства без структур закалки. Добавка флюса АН-67Б снижает скорость протекания окислительно-восстановительных процессов, способствует уменьшению кислорода в шве и позволяет повысить ударную вязкость металла шва. Структура металла шва ферритно-перлитная (рис. 2).

Концентрация общего кислорода в металле шва составила 0,053 % в образцах, полученных при сварке под флюсом АН-348А, при этом 0,043 % кислорода было связано в силикатах и 0,010 % кислорода в алюминатах.



*Рис. 1. Структура основного металла (D40S), ×500*



*Рис. 2. Микроструктура сварного шва, выполненного проволокой Св-08ГА, ×500*

Для сравнения были взяты образцы металла шва, полученного при сварке под смесь флюсов АН-348А + АН-67Б в соотношении 50%:50%. При таком соотношении флюсов в смеси получалось лучшее формирование сварных швов. Содержание общего кислорода составило 0,035 %, из которого 0,021 % связано в силикатах, и 0,014 % связано в алюминаты. Наряду с уменьшением общего содержания кислорода в металле произошло его перераспределение. Количество кислорода в силикатных включениях

уменьшилось при одновременном небольшом увеличении кислорода в алюминатах. Оксиды алюминия, по-видимому, перешли из флюса АН-67Б в металл, они имеют меньший размер по сравнению с силикатами, равномерно распределены по металлу и оказывают меньшее влияние на механические свойства металла шва.

При рассмотренной схеме сварки стыковых швов образцов, получаемый шов состоит в основном из металла, полученного переплавлением основного металла D40S и электродного металла Св-08ГА. Механические свойства сварных соединений и швов определяли при температуре 20<sup>0</sup>С, ударную вязкость металла шва КСУ определяли при температуре -40<sup>0</sup>С. Для проведения механических испытаний и определения ударной вязкости изготавливали стандартные образцы (ГОСТ 6996-66). Образцы для определения ударной вязкости вырезали поперек направления шва. Ударную вязкость определяли по результатам испытаний металла шва (ось надреза совпадала с осью шва). Механические свойства и ударная вязкость шва превышали требуемые (таблица 1).

Таблица 1

**Механические свойства и ударная вязкость металла шва, выполненного под разными флюсами**

Объект	Механические свойства			Ударная вязкость, Дж/см <sup>2</sup> при T= -40 <sup>0</sup> С
	Временное сопротивление, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Св.шов, КСУ
АН-348А	<u>535</u> 530-543	<u>396</u> 390-410	<u>25</u> 24-26	<u>60</u> 57-63
АН-348А+АН-67Б в соотношении 1:1	<u>545</u> 536-552	<u>413</u> 405-420	<u>27</u> 26-28	<u>70</u> 67-74

*Примечание.* В числителе приведены средние значения механических свойств и ударной вязкости, полученные по результатам шести испытаний, в знаменателе минимальные и максимальные.

В работе определили склонность металла шва к коррозии косвенным методом, предложенным в работе [5]. Как показали более ранние исследования, электрический потенциал стали в большей степени зависит от состава металла. Содержание кремния в сталях оказывает наибольшее влияние на электрический потенциал стали [5]. В данной работе сварные швы, полученные при сварке под флюсом разного состава, имели примерно одинаковый химический состав, имелась разница только по содержанию неметаллических включений. Основной металл D40S с содержанием кремния 0,90-0,95% при разности температур  $\Delta t=20^0\text{C}$  между внутренней и внешней обшивкой судна имел разность потенциалов 20 мкВ. Сварные швы, сваренные проволокой Св-08ГА под флюсами АН-348А и смесью флюсов АН-348А+АН-67Б, при содержании кремния 0,70-0,75% имели соответственно разность потенциалов 34 мкВ и 32 мкВ. Разница электрических потенциалов основного металла и сварного шва меньшая в случае шва с меньшим содержанием неметаллических включений, что должно способствовать повышению коррозионной стойкости.

**Вывод.** Установлено, что использование смеси окислительного и слабоокислительного флюсов АН-348А+АН-67Б в соотношении 50%:50% способствовало уменьшению содержания неметаллических включений в шве. При сварке под смесью флюсов можно получать сварные швы с повышенными значениями механических свойств, и особенно ударной вязкости и повышенной коррозионной стойкости.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грабин В.Ф. Металловедение сварки плавлением. – Киев: Наукова думка, 1983. – 416 с.
2. Подгаецкий В.В., Люборец И.И. Сварочные флюсы. – Киев: Техника, 1984. – 167 с.
3. Потапов Н.Н. Основы выбора сварочных флюсов при сварке сталей. – М.: Машиностроение, 1989. – 168 с.
4. Потапов Н.Н. Влияние галоидных солей на металлургические свойства плавящихся флюсов при многослойной сварке //Автоматическая сварка. 1981. № 6. – С. 53 – 56.
5. Веревкин В.И., Игушев В.Ф., Терюшева С.А. //Морские интеллектуальные технологии. Повышение стойкости к коррозии судовых металлоконструкций. 2017. Т.38. № 4. – С.69-75.

### **INFLUENCE OF FLUX COMPOSITION ON MECHANICAL PROPERTIES AND THE CONTENT OF NON-METALLIC INCLUSIONS IN WELDED SHVAH AT WELDING OF SHIPBUILDING STEEL**

Igushev Valery Fedorovich, Associate Professor, Ph.D.  
Verevkin Valery Ivanovich, Professor, Doctor of Technical Sciences  
Bezsmolova Irina Vasilievna, Associate Professor, Ph.D.  
Zebrova Elena Mikhailovna, Associate Professor, Ph.D.

Baltic fishing fleet state academy FSBEI HE "KSTU", Kaliningrad, Russia,  
e-mail: igushev\_tmm@bga.gazinter.net

On the basis of experimental data, it is shown that, when arc welding under the fl uids of shipbuilding steels, the use of a mixture of fused fluxes of the oxidizing glassy AN-348A and a weakly oxidizing pumice-shaped AN-67B in a 50 % ratio: 50 % leads to the production of welds with a reduced content of nonmetallic inclusions , increased mechanical properties and especially impact strength and a slight increase in corrosion resistance.

## РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ МОСТА КАТАМАРАНА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Кирсанов Павел Игоревич, магистр

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: pakirs@mail.ru

*В данной статье рассматривается расчет прочности соединительного моста судна катамаранного типа Пионер-М. Разработана методика расчета прочности моста катамарана методом конечных элементов в соответствии с требованиями Российского Речного Регистра. Данная методика включает в себя набор конечно-элементных постановок задач и может быть использована для проведения прочностных расчетов других судов катамаранного типа. Задачи, описанные в работе, решены в программном комплексе ANSYS Mechanical*

В данной работе описан расчет прочности соединительного моста научно-исследовательского судна катамаранного типа Пионер-М, спроектированного для Севастопольского государственного университета. Длина судна составляет 22 метра, водоизмещение 153 тонны. Проект Пионер-М курировался Объединенной судостроительной корпорацией, Агентством стратегических инициатив и министерством образования.

Расчет прочности моста выполнялся в соответствии с требованиями Российского Речного Регистра (далее РРР) [1]. Согласно этим требованиям при расчете прочности моста необходимо рассмотреть 4 случая:

- Расчет прочности на тихой воде
- Расчет прочности при движении лагом к волне (когда направление распространения волн перпендикулярно курсу движения судна)
- Расчет прочности при движении косым курсом к волне, при котором корпуса изгибаются в противоположных направлениях
- Расчет прочности при движении косым курсом к волне, при котором одновременно с поперечным изгибом наблюдается поперечное скручивание

### 1. Расчет прочности на тихой воде

#### *Постановка задачи по регистру*

Согласно п. 4 приложения 2 ч. 1 [1], поперечные изгибающие моменты, действующие на мост, на тихой воде вычисляются по формулам (1) и (2):

$$M_1 = -0.5P_m B_k - P_k y_k \quad (1)$$

$$M_2 = -P_m(0.5(B_k + c) - y_m) - P_k y_k \quad (2)$$

где  $M_1$  – момент в сечении плоскости, проходящей через внутренний борт на мидель-шпангоуте параллельно ДП,  $M_2$  – момент в сечении по ДП,  $P_m$  – вес половины

моста с грузом,  $B_k$  – ширина одного корпуса по КВЛ,  $P_k$  – вес одного корпуса,  $y_k$  – отстояние центра тяжести веса  $P_k$  от ДП корпуса (оно положительно, когда центр тяжести ближе к внутреннему борту),  $c$  – расстояние между корпусами,  $y_m$  – отстояние центра тяжести веса  $P_m$  от ДП всего судна.

Для определения весов корпусов и моста, а также расстояния  $y_k$  использовалась конечно-элементная (далее КЭ) модель катамарана. Распределение массы катамарана приведено на рисунке 1.

Левый корпус  $m = 55,58$  т  
 Мост  $m = 41,85$  т  
 Правый корпус  $m = 55,58$  т  
 Масса катамарана  
 составляет **153 т**  
 Число конечных элементов:  
**NE=833021**

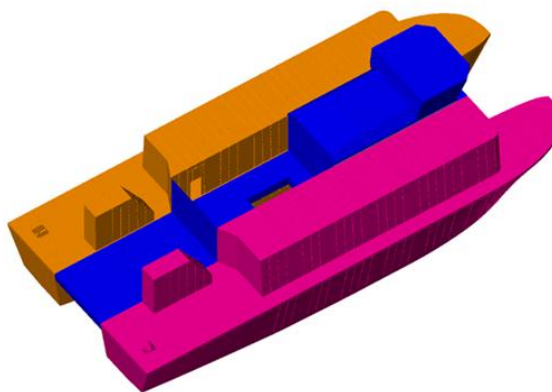


Рис. 1. Распределение массы катамарана

Приняты следующие значения перечисленных величин:

$$P_m = 41.85/2 * 9.81 \text{ кН} = 205.27 \text{ кН}, P_k = 55.58 * 9.81 \text{ кН} = 545.24 \text{ кН},$$

$$y_k = 0.154 \text{ м}, y_m = 0.9 \text{ м}, c = 3.6 \text{ м}, B_k = 3.19 \text{ м (при осадке } T=1.55\text{ м)}.$$

Получаем следующие значения по модулю изгибающих моментов на тихой воде:  $M_1 = 411.38 \text{ кН*м}$ ,  $M_2 = 596.13 \text{ кН*м}$ .

Важно заметить, что эти же значения моментов  $M_1$  и  $M_2$  можно получить, рассмотрев катамаран в виде шарнирно-закрепленной балки. Длина между опорами балки составляет  $(B_k/2 + c + B_k/2) = 6.8$  м, длина консольных частей  $(B_k/2) = 1.6$  м. На балку действуют 2 сосредоточенных силы  $P_m$ , приложенные на расстоянии  $\pm y_m$  от центра балки и силы  $P_k$ , действующие на расстоянии  $y_k$  от каждой опоры. Постановка задачи и получающаяся эпюра изгибающих моментов приведены на рисунке 2.

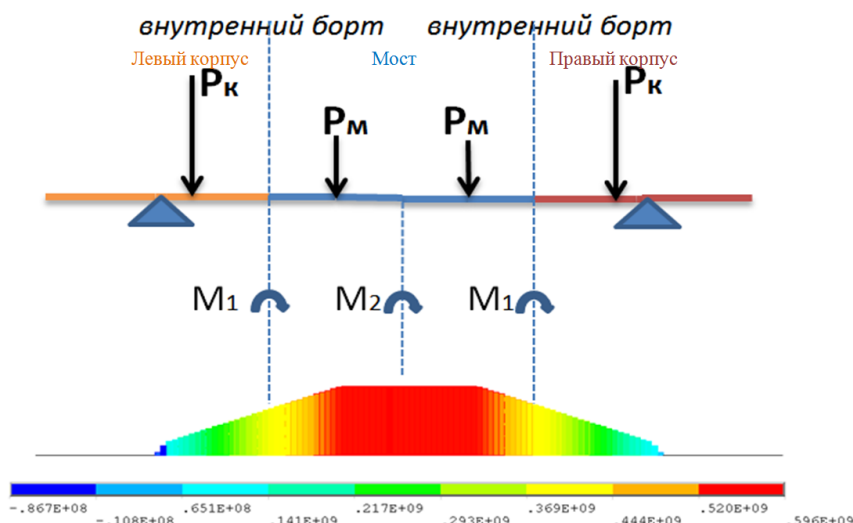


Рис. 2. Эпюра изгибающего момента, Н\*мм

Построив эпюру, убеждаемся, что на внутренних бортах изгибающий момент совпадает с моментом  $M_1$ , в центре моста изгибающий момент совпадает с моментом  $M_2$ .

Таким образом, при вычислении изгибающих моментов  $M_1$  и  $M_2$ , действующих на мост на тихой воде, можно рассмотреть решение задачи о прогибе шарнирно-закрепленной балки под действием сосредоточенных сил.

Согласно п. 13 приложения 2 ч.1 РРР [1] для анализа возникающих напряжений в балках моста при трех положениях судна относительно волны необходимо найти моменты  $M_{1i}$  и  $M_{2i}$  - изгибающие моменты, действующие на  $i$ -ю связь моста на тихой воде. Для этого полученные моменты  $M_1$  и  $M_2$  необходимо распределить на все поперечные балки моста с соответствующими коэффициентами. Мост рассматриваемого катамарана имеет 21 поперечную балку, на которые и необходимо распределить моменты  $M_1$  и  $M_2$ .

Но в такой постановке есть ряд допущений, снижающих точность расчетов: катамаран рассматривается как шарнирно-закрепленная балка, вес моста приложен ровно по центру, нагрузку несут только поперечные балки моста. В действительности, рассматриваемый мост представляет из себя сложную структуру с поперечными и продольными связями, также мост укреплен поперечными стенками надстройки, оказывающими положительное влияние на напряженное состояние балок моста.

В этой связи целесообразнее рассмотреть катамаран не как шарнирно-закрепленную балку, а создать его полноценную конечно-элементную модель.

*Преимущества КЭ модели:*

- 1) в ней учтены все связи моста
- 2) нет необходимости прикладывать точечно силы  $P_m$  и  $P_k$ , так как в модели полностью учтено распределение масс по мосту, исходя из конструктивных особенностей.
- 3) нет необходимости вычислять  $M_{1i}$  и  $M_{2i}$  - изгибающие моменты, действующие на  $i$ -ю связь моста. Они определяются в результате расчета исходя из конструктивных особенностей.

Далее решим задачу прогиба моста катамарана на тихой воде методом конечных элементов в программе ANSYS.

### ***КЭ постановка задачи***

*Граничные условия:*

Переборки каждого из корпусов приняты абсолютно жесткими, поворот каждой из них разрешен относительно точки А (рис. 3). Эта точка является пересечением линии, проведенной через метacentр соответствующего корпуса катамарана вдоль оси корпуса, и рассматриваемой переборки. Перемещения перечисленных точек ограничены по всем осям, что соответствует шарнирному закреплению. Конструкция нагружается под действием силы тяжести.

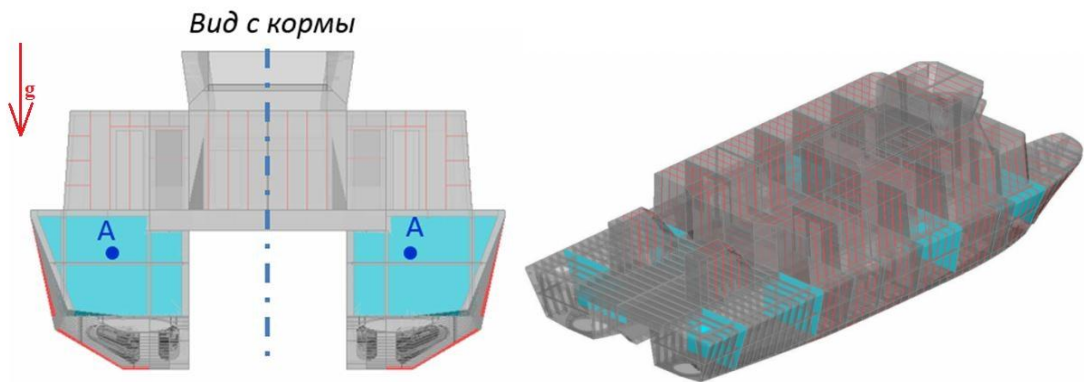


Рис. 3. КЭ постановка задачи. Голубым цветом обозначены жесткие переборки, А – метacentры корпусов

### Решение задачи

На рисунке 4 приведены перемещения, возникающие в балках моста на тихой воде. Максимальное перемещение составляет 0.67 мм. Масштаб отрисовки деформаций 1:200 (контурными линиями отмечено недеформированное положение).

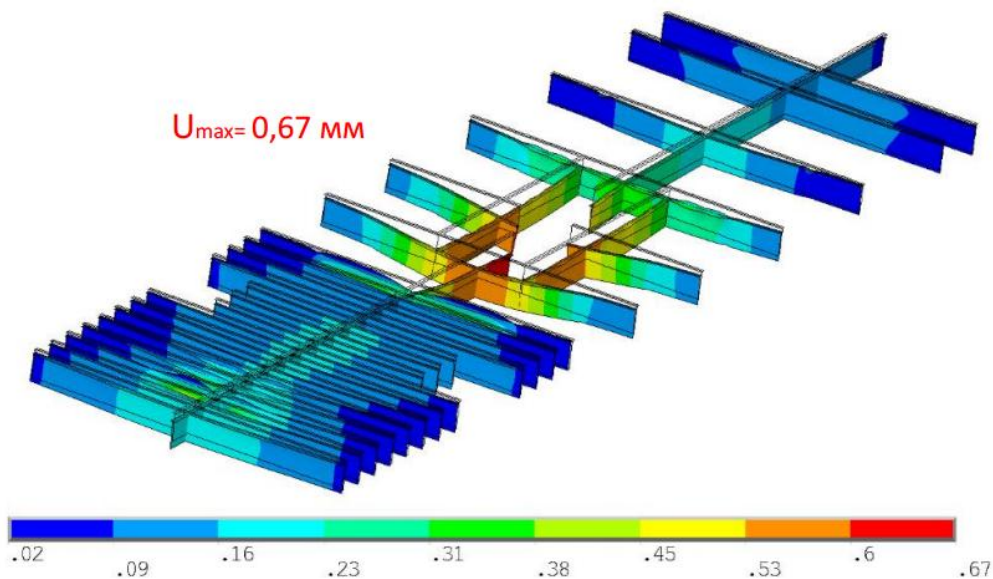


Рис. 4. Модуль вектора перемещений, мм

Максимальные напряжения в балках моста возникают на 19 шпангоуте (рис. 5) и составляют 42.87 МПа (что не превышает допустимого напряжения  $\sigma_d = 180.5$  МПа, вычисленного по РРР). Мост выдерживает приложенную нагрузку.

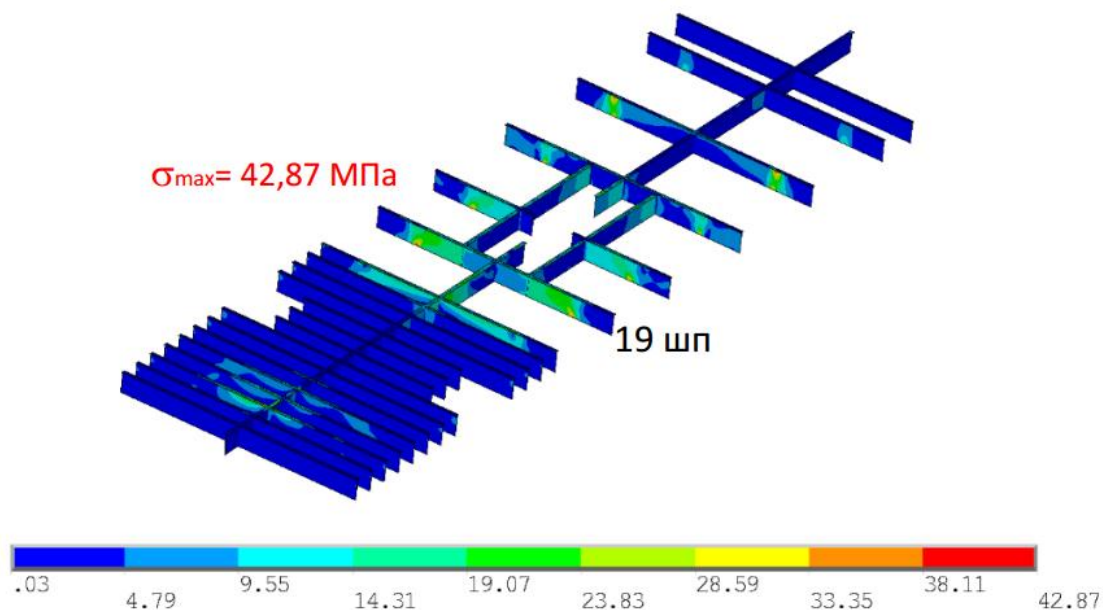


Рис. 5. Интенсивность напряжений по Треска в балках моста, МПа

Несмотря на то, что целью решения данной задачи являлось исследование напряжений, возникающих в балках моста на тихой воде, можно сказать о том, что данная задача корректно описывает все напряжения внутри катамарана на тихой воде. Это связано с тем, что повороты корпусов катамарана на тихой воде будут происходить именно вокруг метацентров, а все дополнительные граничные условия, которые прикладываются с целью дополнительно нагрузить мост, присутствуют только в следующих расчетных случаях.

## 2. Расчет прочности при движении лагом к волне

Согласно п.6 и п.7 приложения 2 ч. 1 [1] при движении судна лагом к волне возникает поперечный изгибающий момент  $M_3$  и растягивающая сила  $T_{с.к}$ . Для рассматриваемого судна они составляют  $M_3 = 545.46$  кН\*м и  $T_{с.к} = 242.48$  кН. Их вычисление приведено в работе [2].

### *КЭ постановка задачи*

Добавив момент  $M_3$  и силу  $T_{с.к}$  в постановку задачи об изгибе на тихой воде получим новую постановку для задачи, при движении судна лагом к волне.

Граничные условия: Поперечные переборки катамарана по-прежнему являются абсолютно жесткими, так как они не сопротивляются поперечному изгибу. Поворот каждого из корпусов осуществляется вокруг линии проходящей через метацентр соответствующего корпуса (точка А).

Для описания поворота правого корпуса ограничиваем перемещение точек, лежащих на линии, проходящей через метацентр соответствующего корпуса (всего их 4 штуки, на рисунке 6 показана одна из них). Закрепляемые точки являются проекцией точки А на соответствующую поперечную плоскость, в которой располагается переборка. Перемещение ограничиваем по всем осям. Перемещение точек, принадлежащих левому корпусу, ограничиваем по всем осям, кроме  $y$ . Расположение осей соответствует общепринятому:  $x$  – вдоль корпуса судна в нос,  $z$  - по вертикали вверх.



Приложение нагружающих моментов и сил изображено на рисунке 6. Данная постановка статически эквивалентна усилиям действующим на конструкцию моста согласно требованиям РРР (в точке В, лежащей на внутреннем борту, действует растягивающая сила  $T_{ck}$  и поперечный изгибающий момент  $M_3$ , как и требуется по РРР).

Как и в постановке на тихой воде, данная сила и момент распределятся по поперечным балкам моста с учетом конструктивных особенностей катамарана.

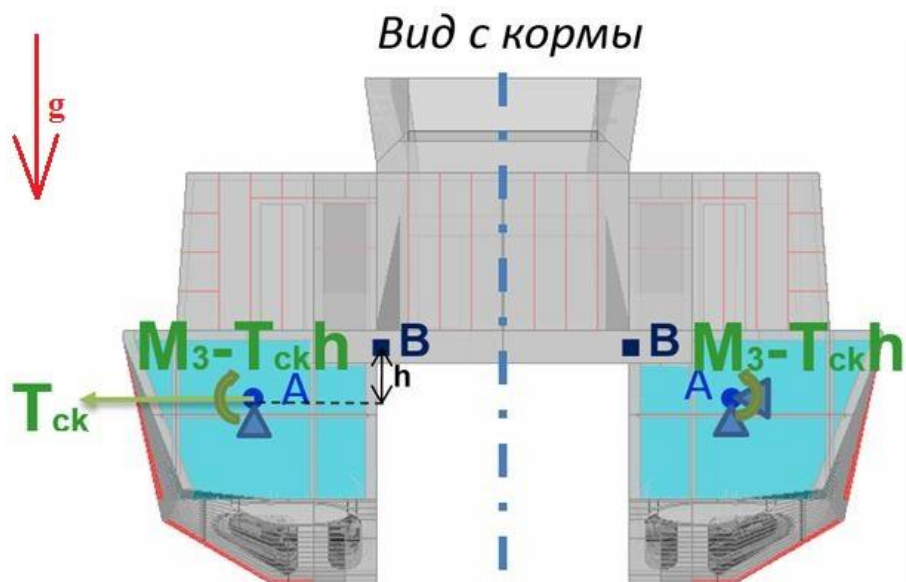


Рис. 6. Постановка задачи при движении лагом к волне

### Решение задачи

Оценим напряжения, возникающие в балках моста. Видим, что своего максимума 110 МПа они достигают на 5 шпангоуте (рис. 7), что, однако, не превышает допустимого значения, мост выдерживает приложенную нагрузку.

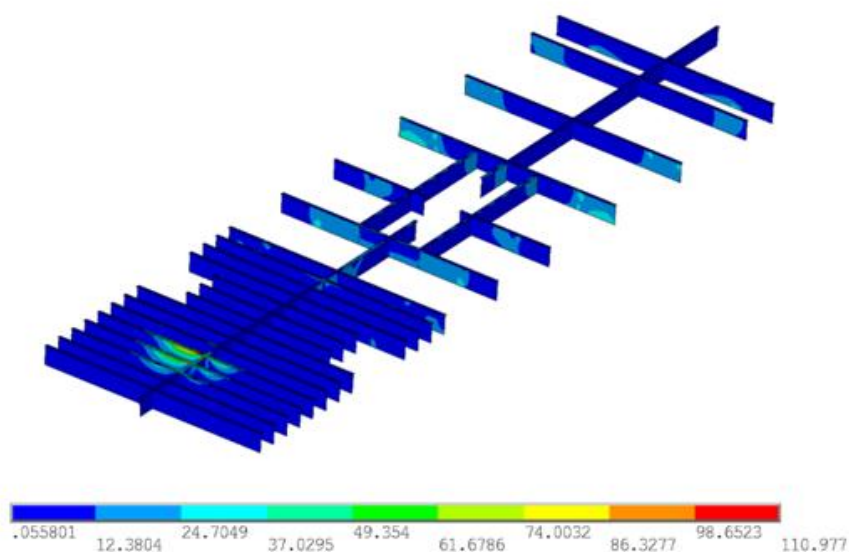


Рис. 7. Интенсивность напряжений по Треска в балках моста, МПа

Проанализируем причину концентрации напряжений в отмеченных балках.

В данной зоне находится грузоподъемное устройство. И если на тихой воде его влияние было несущественным, то при движении лагом к волне, вес грузового устройства оказывает большее влияние на несущие балки моста (рис. 17).

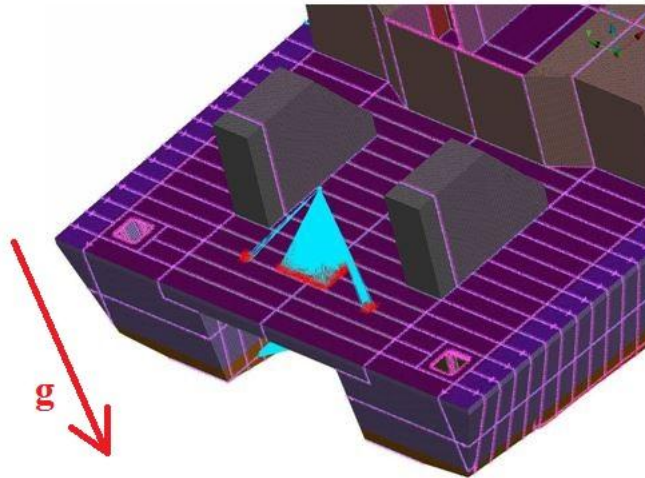


Рис. 8. Приложение нагрузки от грузоподъемного устройства

### 3. Расчет прочности при движении косым курсом к волне, при котором корпуса изгибаются в противоположных направлениях

Согласно п. 8 приложения 2 ч. 1 [1] в положении, при котором ДП судна составляет угол  $\varphi$  с направлением распространения волн, на соединительную конструкцию действуют: дополнительный поперечный изгибающий момент  $M_4$ , скручивающий момент  $M_5$ , растягивающая сила  $T_{с.к.}$ . Для рассматриваемого судна наиболее опасным является угол  $\varphi = 51.11^\circ$ . В этом случае  $M_4 = 141.23$  кН\*м,  $M_5 = 1486.19$  кН\*м,  $T_{с.к.} = 66.53$  кН. Вычисление данных величин приведено в работе [2].

#### *КЭ постановка задачи*

*Граничные условия:* При решении задачи в данной постановке необходимо приложить и моменты, изгибающие балки моста, и моменты, изгибающие корпуса судна.

Моменты, изгибающие балки моста прикладываются аналогично предыдущему случаю. Момент  $M_3$  заменяется моментом  $M_4$ . Сила  $T_{с.к.}$  изменяет свое значение.

Помимо этого, необходимо приложить моменты  $M_5$ , изгибающие корпуса.

Для того, чтобы катамаран не вращался как твердое тело вокруг оси  $y$ , закрепляются по 2 сечения в каждом корпусе (точнее ограничиваются перемещения их центров по осям  $x$  и  $z$ ). Эти сечения находятся рядом с центрами тяжести корпусов ( $\pm 100$  мм по оси  $x$ ). Закрепление под центрами тяжести делается для того, чтобы избежать больших реакций в шарнирных опорах, так как в этом случае моменты, создаваемые силами тяжести, действующими на носовую и кормовую части катамарана, уравновешиваются.

Моменты  $M_5$  заменяются силами, приложенными в носу и корме, так, чтобы при произведении на плечо давать момент  $M_5$ . Сила, приложенная к носу судна, составляет  $F_n = 133.3$  кН, в корме  $F_k = 131.0$  кН. Прикладываются они к сечениям, узлы которых

жестко соединены друг с другом. На рисунке 9 это сечения первые с носа и кормы, отмеченные голубым (находятся на 1 и 44 шпангоутах).

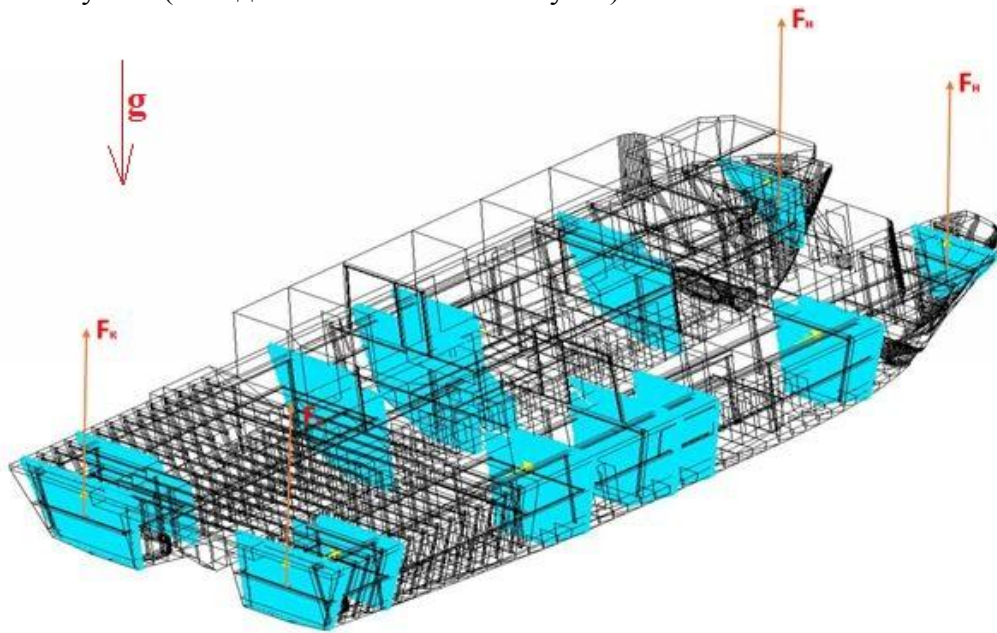


Рис. 9. Приложение сил  $F_n$ ,  $F_n$  и ускорения свободного падения  $g$

Моменты  $M_4$  и силы  $T_{ck}$  равномерно распределены между жесткими переборками (по аналогии с предыдущим пунктом).

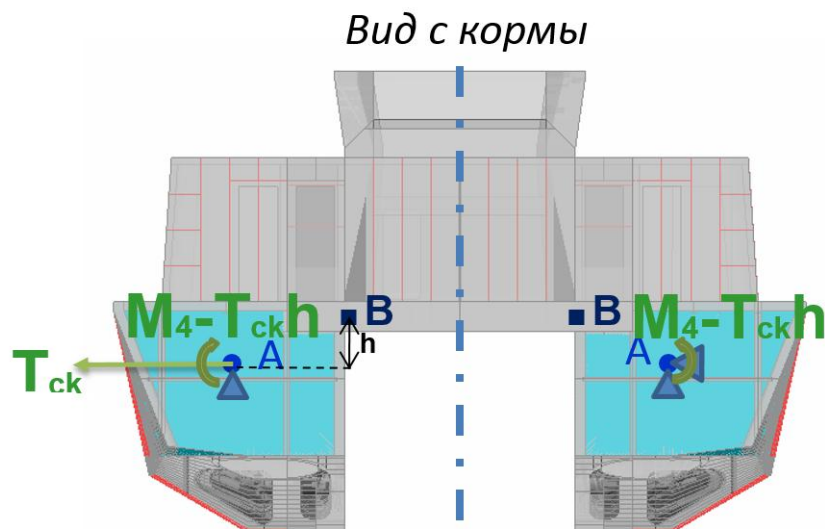


Рис. 10. Приложение моментов  $M_4$  и сил  $T_{ck}$

### Решение задачи

Максимальные напряжения составляют 111 МПа, наблюдаются в балке на 5 шпангоуте (рис. 11) и не превышают допустимых, мост выдерживает приложенную нагрузку.

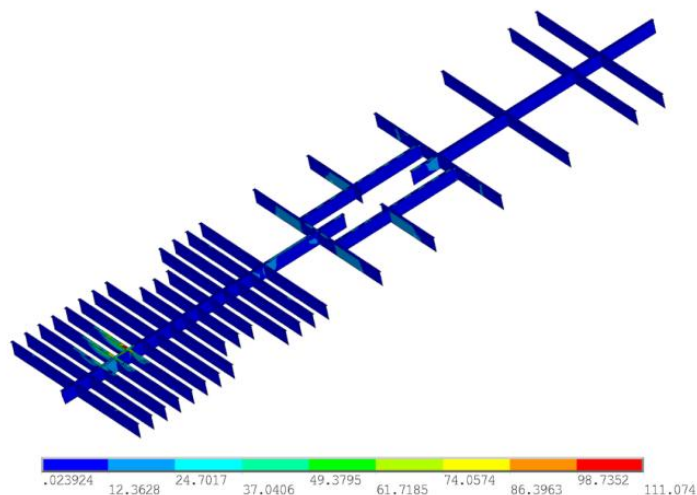


Рис. 11. Интенсивность напряжений по Треска в балках моста, МПа

#### 4. Вычисление напряжений при движении косым курсом к волне, при котором корпуса изгибаются в противоположных направлениях

Согласно п. 9 приложения 2 ч. 1 [1] вертикальные силы, действующие на каждый из корпусов в положении, при котором ДП судна составляет с направлением распространения волн угол  $\varphi$ , принимают распределенными по длине корпуса, как функцию  $q(x)$ . Нагрузки на корпуса берутся разных знаков.

Нагрузка  $q$  достигает своего максимального значения при том же значении угла  $\varphi$ , что и момент  $M_5$ , то есть при  $\varphi = 51.11^\circ$ .

Для рассматриваемого катамарана нагрузка  $q$  составляет  $q = 698.56 \cos(0.14009x) + 2001.72 \cos(0.4226x)$  Н/мм

Начало оси  $x$  расположено на мидель-шпангоуте, сама ось направлена в нос. Расчет нагрузки приведен в работе [2].

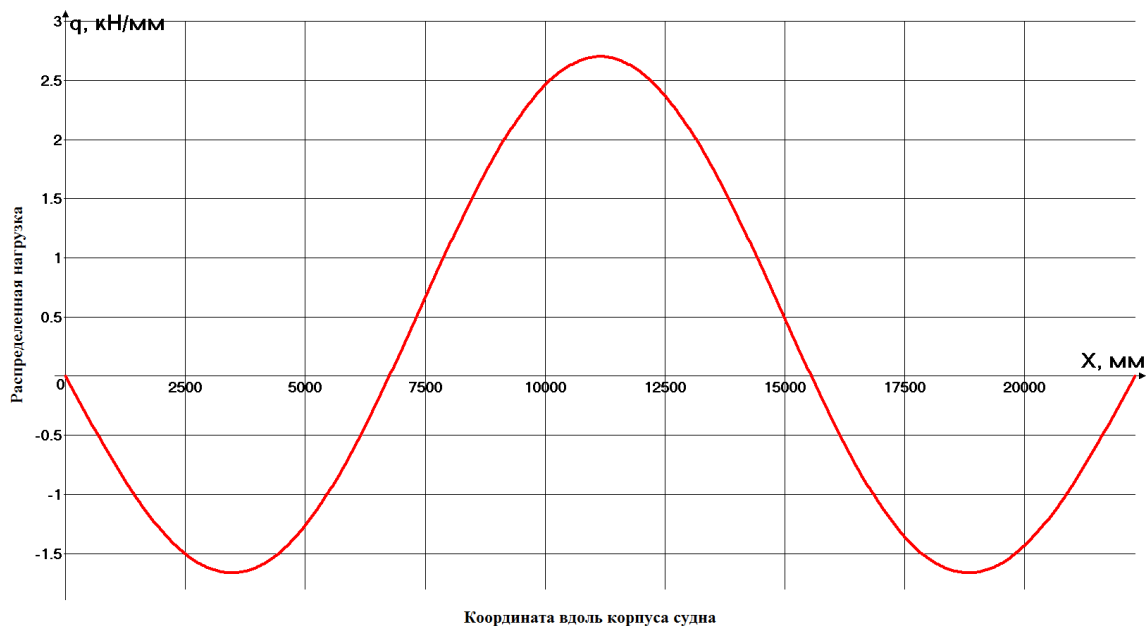


Рис. 12. График функции  $q(x)$  в зависимости от координаты  $x$  (0 соответствует корме судна)

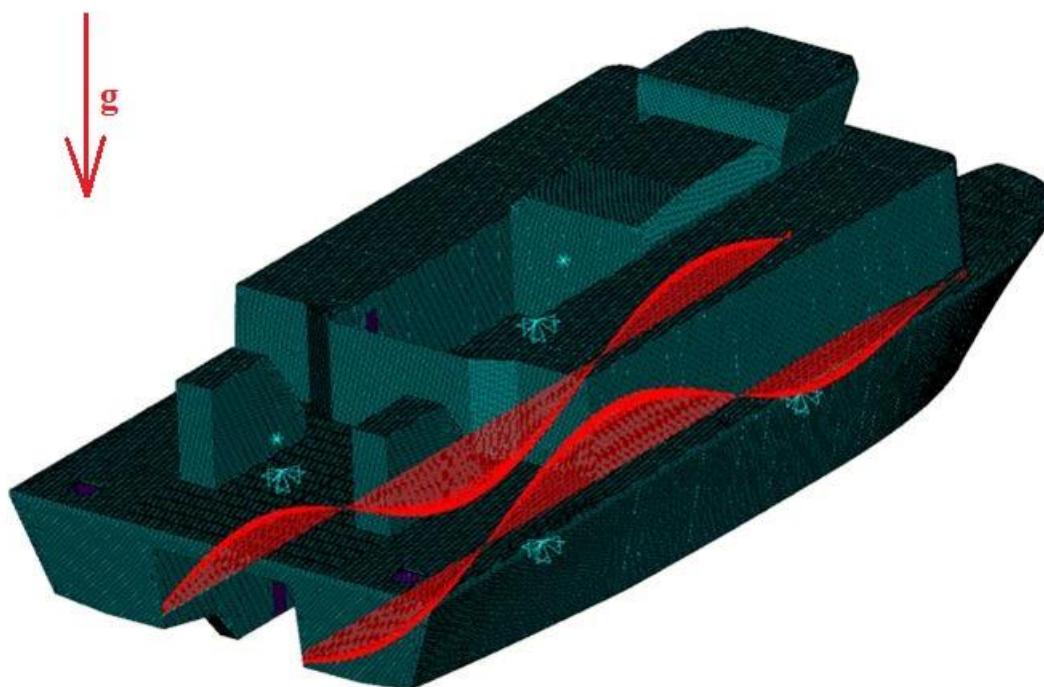
Согласно описанию, изложенному в Регистре, данная нагрузка прикладывается к балке, заменяющей корпус. Мы же, обладая пространственной КЭ моделью катамарана, будем прикладывать ее несколько по-иному, однако, не противореча при этом требованиям регистра.

### ***КЭ постановка задачи***

Рассчитанное давление прикладывается по внутреннему борту по линии КВЛ и действует вдоль оси  $z$ . Таким образом, давление через внутренний борт напрямую действует на балки моста, позволяя промоделировать влияние изгиба корпусов в противоположных направлениях на несущие связи моста.

В точках с координатами  $x = 6751$  мм и  $x = 15548$  мм, данная функция обращается в ноль. Именно эти сечения в перегородках корпуса и будут закреплены, чтобы исключить перемещения катамарана как твердого тела.

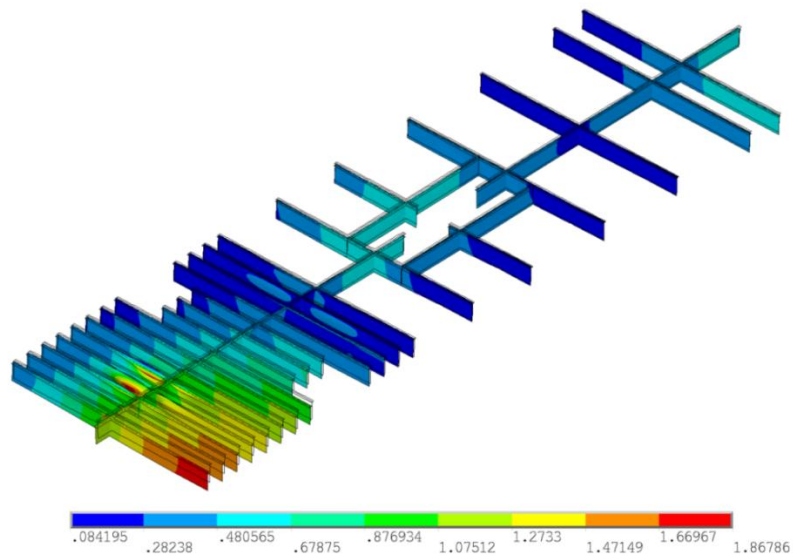
Постановка задачи с приложенными к ней граничными условиями приведена на рисунке 13.



*Рис. 13. Постановка задачи*

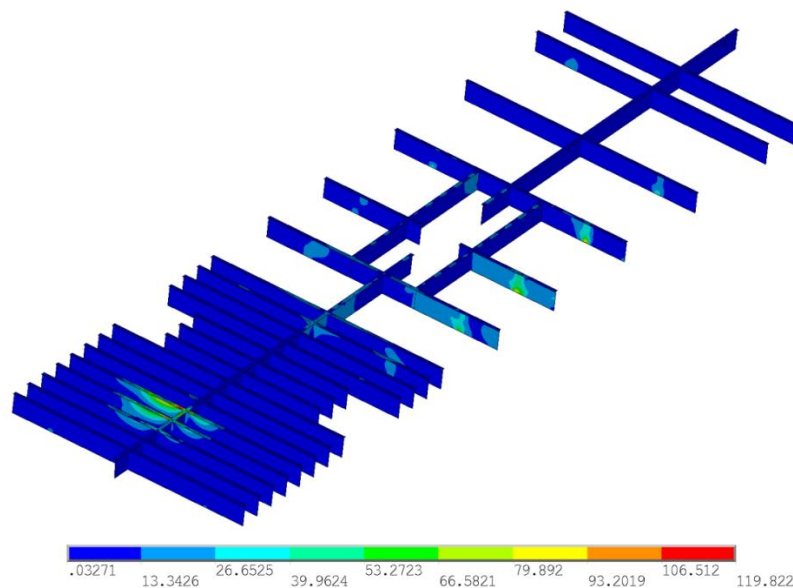
### ***Решение задачи***

Катамаран, обладая массой, изгибается относительно закрепленных точек. Его носовая и кормовая части под действием собственного веса перемещаются вниз, в то время как центральная часть корпуса выгибается вверх. Приложенная дополнительно к правому борту нагрузка  $q(x)$  усиливает этот изгиб, действуя вместе с собственным весом катамарана, а приложенная к левому корпусу нагрузка  $-q(x)$  наоборот ему препятствует. Эффект несимметричного изгиба можно отследить и по перемещениям балок моста (рис. 14). Перемещения максимальны в кормовой балке справа.



*Рис. 14. Модуль вектора перемещений в балках моста, мм*

Напряжения в балках моста изображены на рисунке 15. Максимальные напряжения 119.8 МПа достигаются на 28 шпангоуте у внутреннего борта справа и не превышает предела прочности, мост выдерживает приложенную нагрузку.



*Рис. 15. Интенсивность напряжений по Треска в балках катамарана, МПа*

### **Выводы**

Таким образом, по результатам проведенных расчетов можно утверждать, что согласно Российскому Речному Регистру балки моста удовлетворяют заданным критериям прочности и выдерживают все требуемые нагрузки:

1. на тихой воде
2. при движении лагом;
3. при движении косым курсом к волне, при котором одновременно с поперечным изгибом наблюдается поперечное скручивание;

4. при движении косым курсом к волне, при котором корпуса изгибаются в противоположных направлениях.

Также стоит отметить, что совокупность постановок задач, сформулированных в данной работе, представляет из себя методику расчета прочности моста катамарана методом конечных элементов в соответствии с требованиями РРР. Таким образом, данная методика может быть перенесена на все суда катамаранного типа, проектируемые в соответствии с требованиями Российского Речного Регистра.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Госты. Нормативы [Электронный ресурс]: Российский Речной Регистр. Правила 2008 год. URL: <http://gostrf.com/normadata/1/4293827/4293827288.htm#i7497545> (дата обращения: 08.07.2018).

2. Численные подходы к расчету маломерных судов [Электронный ресурс]: магистерская диссертация: 15.04.03 / П.И. Кирсанов; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Институт передовых производственных технологий; науч. рук. А.И. Боровков, А.А. Михайлов. URL: <http://elib.spbstu.ru/dl/2/v17-2949.pdf/info> (дата обращения: 08.07.2018)

#### **STRENGTH CALCULATION OF A CATAMARAN'S BRIDGE DECK BY THE FINITE ELEMENTS METHOD**

Kirsanov Pavel, master of applied mechanics

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University,  
St. Petersburg, Russia, e-mail: pakirs@mail.ru

*In this article strength calculation of bridge deck of catamaran Pioner-M is considered. A methodology for calculating the strength of a catamaran's bridge deck in accordance with the requirements of the Russian River Register is developed. This methodology includes a set of finite-element problem statements and can be used to perform strength calculations of other catamarans. All problems were solved in ANSYS Mechanical.*

УДК 620.179

#### **АНАЛИЗ УСТАНОВОК ПО ИССЛЕДОВАНИЮ СЛОЖНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В КЛЕЕВОМ СОЕДИНЕНИИ**

Романюта Дмитрий Александрович, начальник отраслевой лаборатории  
Злыгостев Денис Валерьевич, директор НИЦС

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,  
Калининград, Россия, e-mail: dmitrij.romanyuta@klgtu.ru; denis.zlygostev@klgtu.ru

*В работе отмечена важность исследования клеевого соединения композитных материалов в условиях сложного напряжения. Представлен обзор отечественных и зарубежных установок по исследованию адгезионных соединений при совместном действии касательных и нормальных напряжений*

В настоящее время клеевые соединения активно находят свое применение в судостроении и судоремонте. Использование различных клеевых составов является неотъемлемой частью строительства и ремонта различных судовых стеклопластиковых конструкций. По этой причине правильный выбор клея и расчет его прочностной способности является гарантией длительной службы стеклопластикового судна в целом.

Исследуя работу клеевых соединений, в подавляющем большинстве случаев руководствуются стандартизованными испытаниями соединений на нормальный отрыв, согласно ГОСТ 14760-69, или испытаниями на сдвиг по ГОСТ 14759-69. Однако данные испытания не имитируют настоящую работу адгезионных соединений, т.к. клеевые конструкции в реальной жизни работают в условиях сложного напряжения: при совместном действии и нормальных и касательных напряжений. Поэтому использование результатов отдельных испытаний при оценке прочности клеевых соединений является некорректным.

Вопрос создания установок и методик расчета по оценке реальной работы клеевых конструкций поднимался уже давно, в связи с чем было создано большое количество отечественных различных устройств и образцов.

Известен способ [1], при котором используется образец, состоящий из двух полуколец разрезанных по диаметру 1 и соединенных с помощью клея 2 (рис. 1.). Растягивающая нагрузка прикладывается к внутренней части образца с помощью опор 3 испытательной машины. Меняя угол между линией клеевого шва и линией приложения нагрузки, можно создавать различные комбинации нормальных и касательных напряжений. Так, если линия клеевого шва перпендикулярна линии приложения нагрузки, то в адгезионной связи создаются исключительно нормальные напряжения. Если линия клеевого шва сонаправлена с линией нагрузки – создаются исключительно касательные напряжения.

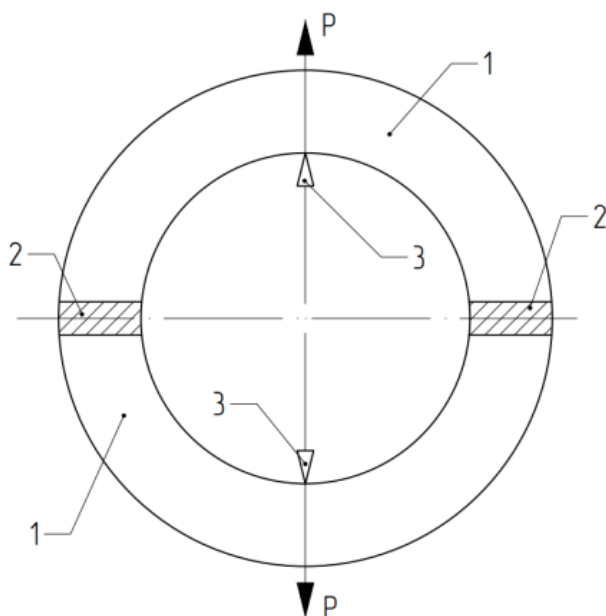


Рис. 1. Образец, для оценки сложного напряженного состояния в клеевом соединении, согласно [1]



Существует способ оценки прочности клеевого соединения при сложном нагружении, с помощью образца конической формы [2]. Образец состоит из двух частей (рис. 2.): обоймы 1 с специфическим коническим отверстием, и заглушки 2, форма которой соответствует форме отверстия обоймы. Обе части соединены с помощью адгезива 3. Прикладывая к заглушке осевую силу, в клеевом соединении возникают напряжения, направленные как по образующей конуса, так и по нормали к ней. С помощью простейших формул курса «Сопротивления материала», зная величину прикладываемой силы, угол конусности и площадь адгезионного соединения можно вычислить величины касательных и нормальных напряжений.

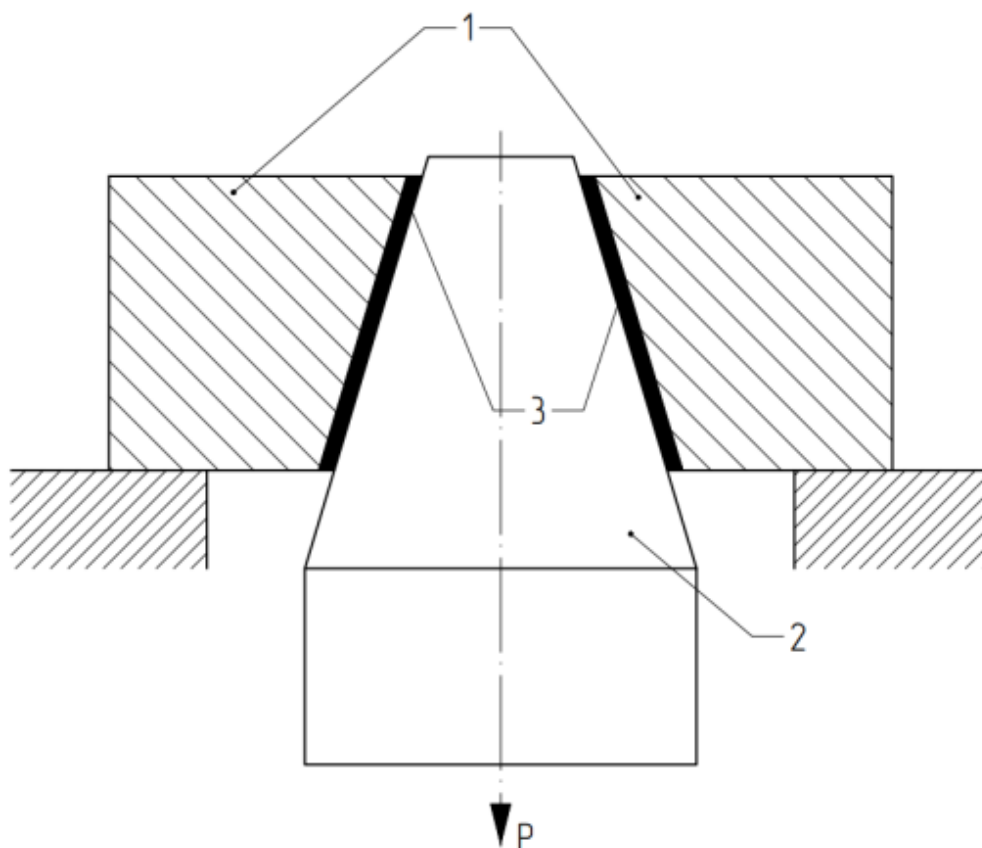


Рис. 2. Образец, для оценки сложного напряженного состояния в клеевом соединении, согласно [2]

С помощью образцов с различной конусностью можно добиться различного соотношения нормальных и касательных напряжений.

Представители института проблем прочности АН Украинской ССР предложили свое устройство по исследованию сложного напряженного состояния в клеевом соединении [3]. Устройство (рис. 3) содержит станину 1 с определенным захватом 2 для образца 3, выполненного в форме балки. Собственно образец, состоит из двух частей, соединенных друг с другом с помощью клеевого шва 4. Свободный конец балки связан с динамометром 5, под которым располагается силовозбудитель 6. На некотором расстоянии от клеевого шва к опытной балки прикреплен кронштейн 7, с подвижным роликом 8, опирающимся на вертикальную стенку 9, перпендикулярную оси испытываемой балки 3. Наличие кронштейна с упорным подвижным роликом, а также определенного геометрического соотношения конструктивных частей установки обеспечивает отсутствие изгибающего момента в плоскости клеевого шва.

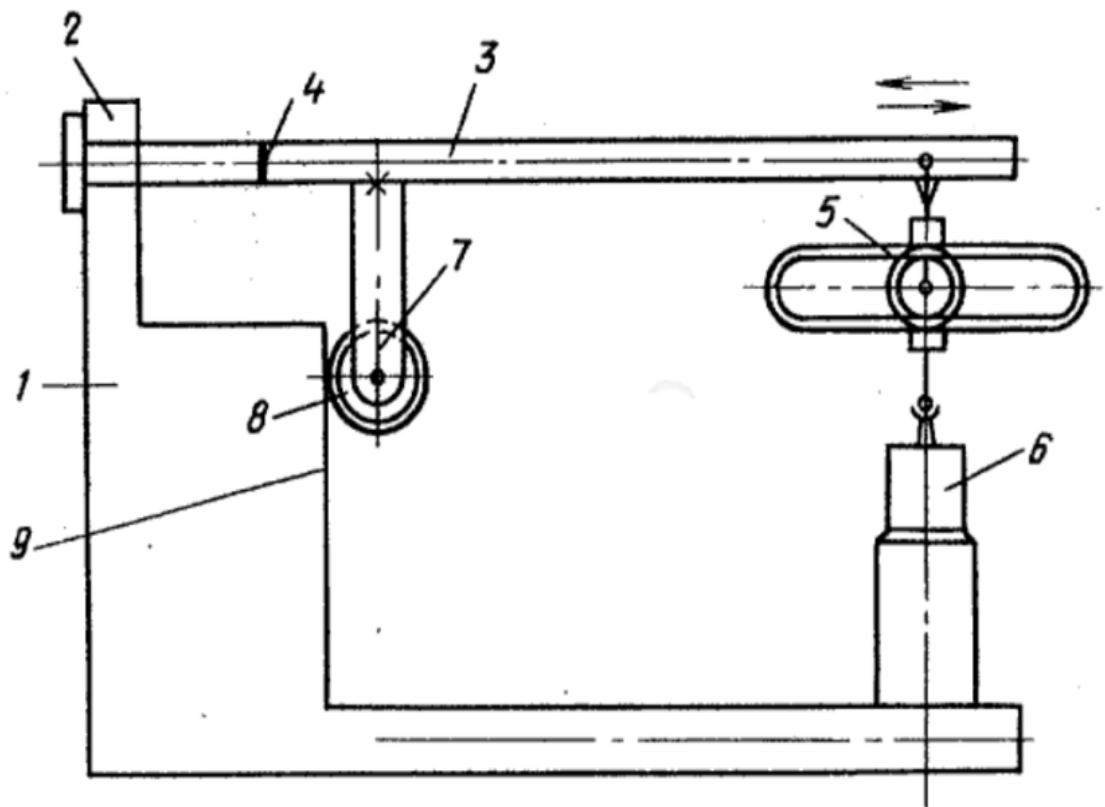


Рис. 3. Установка, для оценки сложного напряженного состояния в клеевом соединении, согласно [3]

Последняя описанная установка оказалась весьма популярной, в связи с чем были созданы ее различные модификации [4 – 6].

Например, была откорректирована форма испытываемого образца [5], с целью снижения концентрации касательных напряжений в клеевом слое и повышении точности эксперимента. Авторы изобретения нового образца рекомендуют использовать образец переменной ширины (рис. 4. (а)) форма которого подчиняется определенной функции. Такая форма способствует равномерному распределению касательных напряжений по всей высоте образца (рис. 4. (б)).

Сама конструкция устройства также несколько видоизменялась. Например, была предложена модернизация [6], заключающаяся в установке под кронштейном и роликом подвижного упора (рис. 5), способствующего расширению возможных комбинаций нормальных и касательных напряжений.

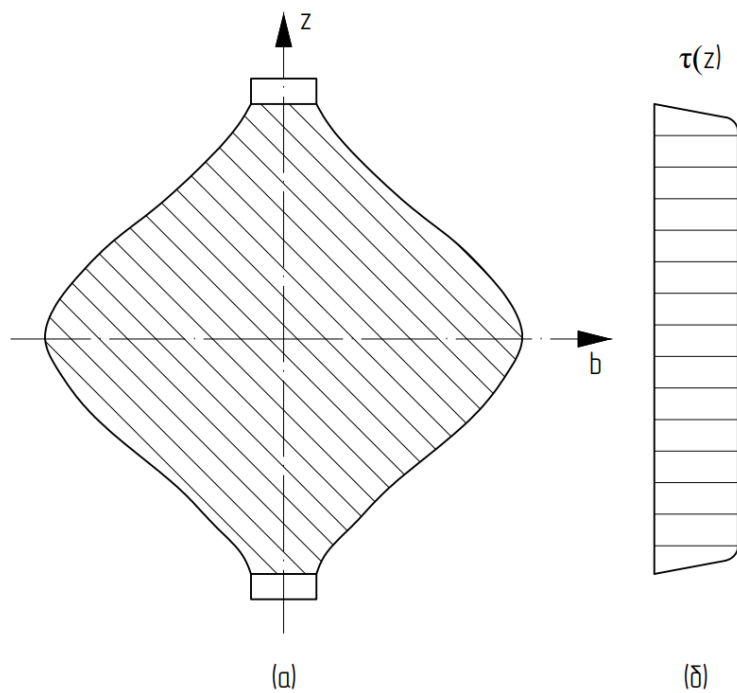


Рис. 4. Образец, для оценки сложного напряженного состояния в клеевом соединении, согласно [5]

За рубежом, для исследования сложного напряженного состояния в клеевом соединении используют, так называемый, тест Аркана, разработанный в Израиле [7]. Суть метода заключается в испытании двух специфичных полукруглых образцов 1, соединенных между собой клеевым швом 2 (рис. 6).

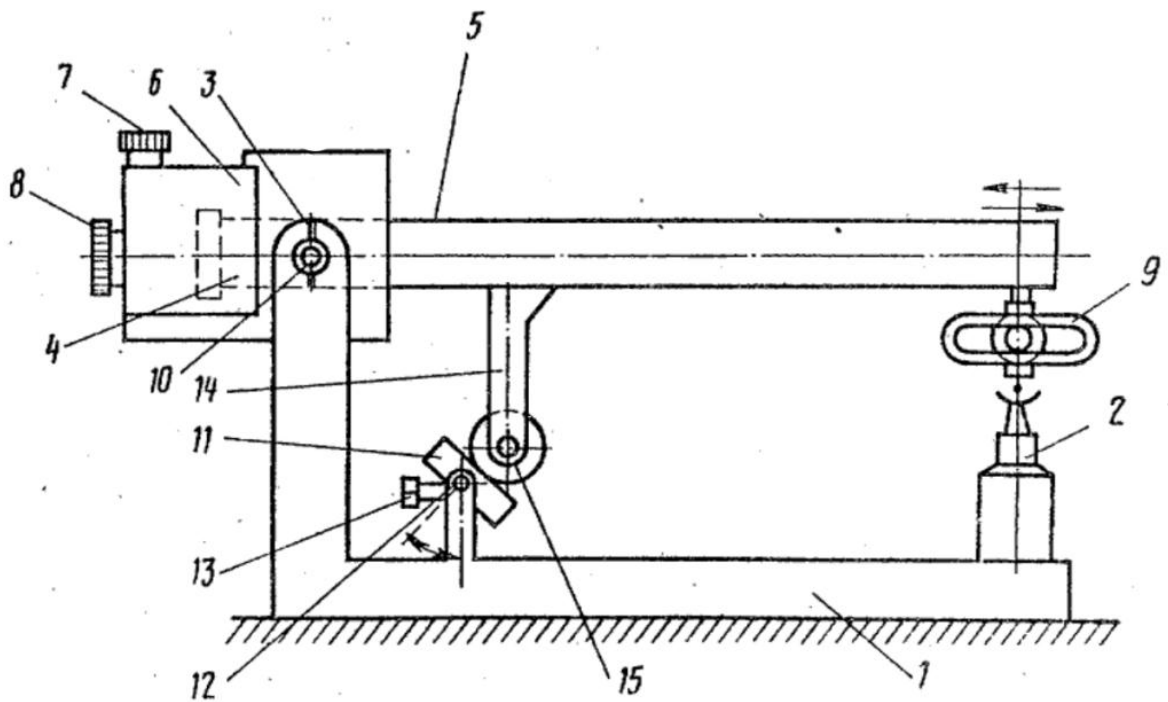


Рис. 5. Образец, для оценки сложного напряженного состояния в клеевом соединении, согласно [6]

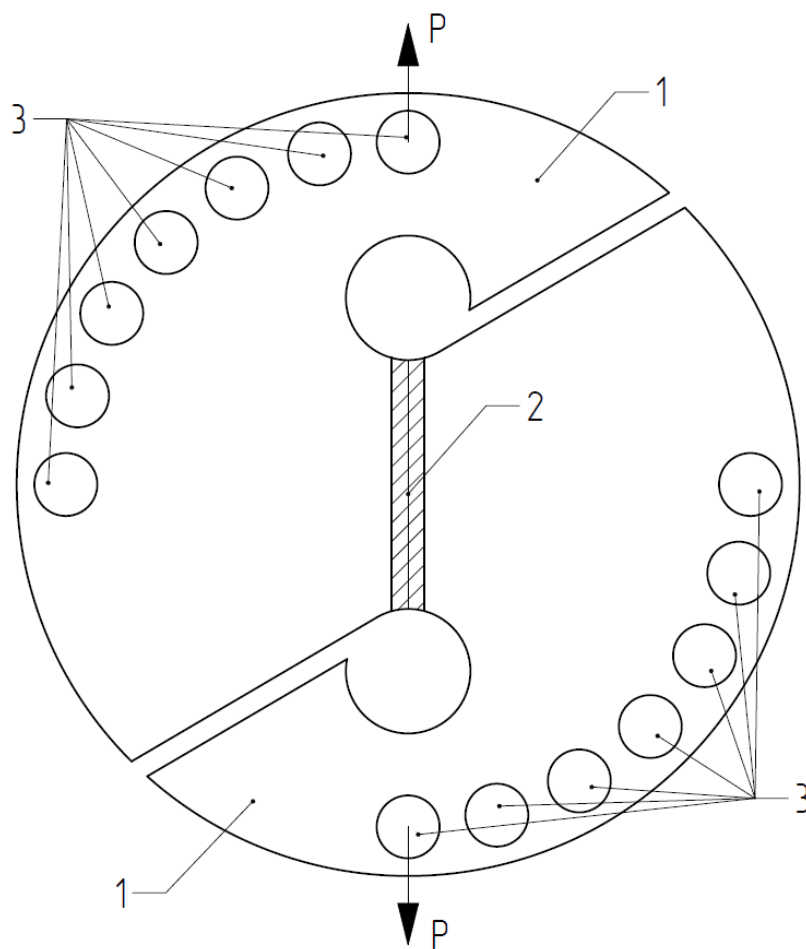


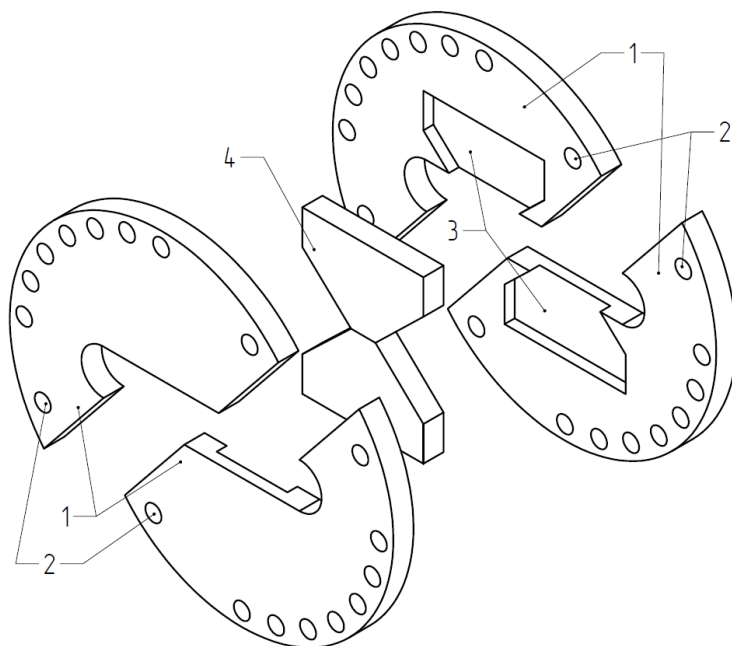
Рис. 6. Образец, для оценки сложного напряженного состояния в клеевом соединении, согласно [7]

Каждый образец имеет на своей внешней стороне ряд отверстий 3, с помощью которых крепится в испытательной машине. Таким образом, меняя угол между линией приложения силы и линией клеевого шва можно создавать различные комбинации нормальных и касательных напряжений.

Данная методика набрала большую популярность и стала использоваться повсеместно. По этой причине было издано большое количество разнообразных модернизаций данной методики и различных советов к проведению опытов [8 – 11].

Таким образом, проанализировав существующие установки и методики оценки прочности клеевого соединения, было принято решения о создании устройства, прототипом которого является образец Аркана.

В ОЛЭППС НИЦС КГТУ была изготовлена установка, модель которой изображенная на рис. 7. Данная установка представляет из себя четыре полукруглых диска 1, которые имеют на внешней стороне ряд отверстий для крепления к испытательной машине. Диски попарно соединяются с помощью центрующих отверстий 2 и штифтов. Отличительной особенностью установки является наличие специального выреза 3, повторяющего форму испытательного образца 4, склеенного из двух частей. С помощью данной разработки имеется возможность испытывать образцы толщиной от 5 до 10 мм с любой толщиной клеевого шва.



*Рис. 7. Модель созданной установки для исследования сложного напряженного состояния в клеевом соединении*

Изготовленная установка с креплениями к испытательной машине приведена на рис. 8.



*Рис. 8. Изготовленная установка*

Подводя итог, можно сказать, что разработанная и созданная в ОЛЭППС НИЦ судостроения «КГТУ» установка по исследованию сложного напряженного состояния в адгезионном соединении позволит более подробно и тщательно изучить свойства клев в реальных эксплуатационных условиях, и поспособствует корректировке методики проектирования и ремонта судов из композитных материалов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Способ определения прочности адгезионных соединений : пат. 278183 СССР, МКИ G 01n 19/04 / М.М. Алексюк, Ю.И. Козуб (СССР). - № 1291921/25-28 ; заяв. 16.12.1968 ; опуб. 05.08.1970, Бюл № 25. 2 с.
2. Образец для определения прочности адгезионного соединения: пат. 418769 СССР, МКИ G 01n 19/04/М.М. Алексюк, Ю.И. Козуб, В.А. Борисенко, Ю.М. Свиридовский (СССР). - № 1802469/25-28; заяв. 29.06.1972; опуб. 05.03.1974, Бюл № 9. 2 с.
3. Устройство для определения прочности адгезионной связи: пат. 485364 СССР, МКИ G 01n 19/04 / Э.С. Уманский, Б.А. Ляшенко, Н.Л. Позен, Ю.К. Значков (СССР). - № 1789989/25-28 ; заяв. 29.05.1972 ; опуб. 25.09.1975, Бюл № 35. 2 с.
4. Устройство для определения прочности адгезионных соединений: пат. 1337736 СССР, МКИ G 01n 19/04 / С.В. Буйлов, Е.А. Власенко, С.В. Дятченко (СССР). - № 3985030/25-28 ; заяв. 08.10.1985 ; опуб. 15.09.1987, Бюл № 34. 3 с.
5. Образец для определения адгезионной прочности: пат. 1548696 СССР, МКИ G 01n 19/04 / С.В. Буйлов, Е.А. Власенко, С.В. Дятченко, С.И. Корягин(СССР). - № 4382244/25-28 ; заяв. 08.12.1987 ; опуб. 07.03.1990, Бюл № 9. 3 с.
6. Устройство для определения прочности адгезионных соединений: пат. 1559270 СССР, МКИ G 01n 19/04 / С.В. Буйлов, А.Ф. Шабанов (СССР). - № 4449609/25-28 ; заяв. 24.05.1988 ; опуб. 23.04.1990, Бюл № 15. 3 с.
7. M. Arcan, Z. Hashin, A. Voloshin. A method to produce uniform plane-stress states with applications to fiber-reinforced materials // Experimental Mechanics. 1978. Volume 18, Issue 4, pp 141–146
8. S. C. Hung, K. M. Liechti. An evaluation of the arcan specimen for determining the shear moduli of fiber-reinforced composites // Experimental Mechanics. 1997. Volume 37, Issue 4, pp 460-468
9. H. A. Richard, A. Eberlein. Material characteristics at 3D-mixed-mode-loadings // Procedia Structural Integrity. 2016. Volume 2, pp 1821-1828.
10. J.M. Greer Jr., S.E. Galyon Dorman, M.J. Hammond. Some comments on the Arcan mixed-mode (I/II) test specimen // Engineering Fracture Mechanics. 2011. Volume 78, Issue 9, pp 2088-2094
11. Abuzar Es'haghi Oskui, Naghdali Choupani, Moharram Shameli. 3D Characterization of Mixed-Mode Fracture Toughness of Materials Using a New Loading Device // Latin American Journal of Solids and Structures. 2016. Volume.13, № 8, pp. 1464 – 1482.

### ANALYSIS OF INSTALLATIONS TO STUDY COMPLEX STRESS CONDITION IN ADHESIVE CONNECTION

Romanyuta Dmitriy Alexandrovich, head of the industrial laboratory of operational strength of fishing vessels of the research center for shipbuilding  
Zlygostev Denis Valerievich, director of the research center for shipbuilding

Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,  
e-mail: dmitrij.romanyuta@klgtu.ru; denis.zlygostev@klgtu.ru

*In this work, the importance of studying the adhesive bonding of composite materials under conditions of complex stress was noted. The review of domestic and foreign installations for the study of adhesion compounds under the joint action of tangential and normal stresses is presented.*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМЫ ОБВОДОВ МАЛОМЕРНОГО РЫБОЛОВНОГО ТРАУЛЕРА С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ЕГО МОРЕХОДНЫХ КАЧЕСТВ

Чуреев Евгений Андреевич, аспирант

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,  
Калининград, Россия, e-mail: e.chureev@klgtu.ru

*Разработка формы корпуса современных маломерных рыболовных судов является одной из основных задач в проектировании судов данного типа. Математические инструменты при оценке мореходных качеств судов не могут обеспечить необходимую точность расчетов. В работе представлены результаты модельных испытаний маломерных рыболовных судов с анализом влияния формы корпуса на различные мореходные качества*

### 1. Введение

Для рыбопромышленников Калининградской области работа в Балтийском море ограничивается, в основном, 26 подрайоном. Из материалов анализа в работах [1] и [2], однозначно можно сделать вывод, что воспроизводить старые проекты судов нецелесообразно и необходимо создавать абсолютно новый флот для добычи рыбы на Балтике.

Новый флот – новый тип малого рыболовного судна – преимущественно для современного тралового промысла. Согласно [2], оптимальный архитектурно – конструктивный тип судна для промысла на Балтийском море должен иметь следующие основные отличительные особенности:

- судно должно быть траулером, так как в данном регионе это является основным способом лова в 26 подрайоне Балтийского моря;

- на судне должны быть оборудованы танки для хранения улова наливом. При этом, в случае промысла донных пород рыбы, должна быть предусмотрена возможность оборудования сухого трюма для хранения рыбы в ящиках со льдом;

- машинное отделение должно быть размещено в кормовой части судна с прямой валолинией;

- рубка на судне должна быть промыслово-рулевой и установлена в средней части судна, возможно смещенной в корму от миделя, что позволит лучше контролировать и управлять промысловыми операциями из рубки. Также смещение в корму центра парусности улучшит управляемость судна;

- судно должно иметь две палубы или удлиненную баковую надстройку. В шельтердечном пространстве должно быть размещено, по возможности, наибольшее количество оборудования для минимизации промысловых операций на открытой палубе;

- корпус судна должен быть оборудован носовым бульбом: в целях улучшения поведения судна на коротком крутом волнении Балтийского моря;

- на судне должен быть установлен рыбонасос для перекачивания улова из трала в рыбный танк;

- рыбный танк на судне должен быть охлаждаемым при помощи системы RSW и/или с использованием льдогенераторов (предпочтительнее генераторы жидкого льда);

- на борту судна должен быть установлен гидравлический кран или другое грузовое устройство, предназначенное для подключения приемного шланга рыбонасоса к кутку трала, либо для выливки улова из трала частями;

- при ведении промысла донных пород рыб, предварительная обработка улова должна проходить в закрытых помещениях.

Наиболее существенными достижениями в области технологии промысла, повлиявшими на архитектурно-конструктивный тип и назначение малотоннажных рыболовных судов, являются:

- появление новых сверхуловистых отечественных донных и пелагических тралов, например, разработанных в регионе Калининградской области фирмой «Фишеринг сервис» г. Пионерский. Этой фирмой разработаны тралы, которыми сейчас пользуется практически вся Европа. Разовые уловы рыбы при тралении новыми тралами, не могут быть целиком подняты на промысловую палубу судов. Поднятие улова невозможно по нескольким причинам: как по величине вылова, при которой невозможно обеспечение остойчивости добывающего судна, так и по размещению кутка трала на промысловой палубе. В связи с этим, появилась необходимость откачивать рыбу из тралов рыбонасосами или эрлифтами, не поднимая трал из воды. С другой стороны, добывающие суда из-за значительных величин выловов, потеряли возможность обработки улова на судне, т. е. стали чисто добывающими;

- для возможности сохранения значительных уловов рыбы на современных промысловых судах они должны быть или супертраулерами, или траулерами - производственными рефрижераторами. Эксплуатация этих типов судов в условиях исключительных экономических зон России должна проходить по другой схеме организации взаимодействия промысловой и береговой региональной инфраструктуры. В противном случае, добывающие суда должны стать судами с наливными танками;

- появление носовых бульбовых надделок (носовых бульбов), функционально расширяющих их традиционное назначение.

Следует отметить, что первоначально бульбовые формы носа на судах, эксплуатируемых при числах Фруда 0,25-0,35, предназначались для снижения волнового сопротивления за счет интерференции волн от корпуса судна и специально спроектированного носового бульба. Носовой бульб уменьшал амплитуду носовой волны и увеличивал длину корпуса, что приводило к уменьшению чисел Фруда и уменьшению волнового сопротивления.

Однако уже на рубеже 1980-х годов в европейской практике стали появляться носовые бульбы и на тихоходных судах, которые устраивались только с целью увеличения относительной длины подводной части корпуса. Бульбы в кормовой оконечности судна обеспечивали выравнивание потока и подтекание к ахтерштевню. Относительные скорости движения малотоннажного флота, достигали величин  $F_r = 0,40 - 0,50$ , поэтому изменились рекомендации проектантам по выбору параметров формы и элементов корпуса промысловых судов длиной от 12 до 26 м. Ранее опубликованные рекомендации проектантам были получены по результатам мореходных испытаний моделей судов ФРП с традиционными в то время обводами корпусов. Эти мореходные испытания выполнялись опытовыми бассейнами мира по заданию ФАО (Food and Agriculture Organization of the United Nations) и были опубликованы в открытой печати в сборнике *Fishing Boats of the World (part 3.P. 139-169, P. 540)*.

Однако, с тех пор, существенно изменился ходовой режим малотоннажного промыслового флота, резко возросли мощности главной силовой установки, усилились требования к повышению мореходности.



Первоначально бульбовые формы корпуса объяснялись конструкторами как возможность снижения сопротивления воды движению среднетоннажных и крупнотоннажных судов и значительно лучшими условиями удифферентовки судов.

В 2000-е годы носовые бульбы появились даже на малотоннажных судах, длиной 8 – 10 метров, что объяснялось требованием повышения мореходности малотоннажных судов флота рыбной промышленности (ФРП) на волнении. Суда с традиционными обводами зарывались в подошве коротковолнового волнения. Появились две формы бульбовых обводов: исландского типа с большой полнотой мидель-шпангоута (рис. 1) и норвежского типа, с так называемыми, мореходными обводами (рис. 2).

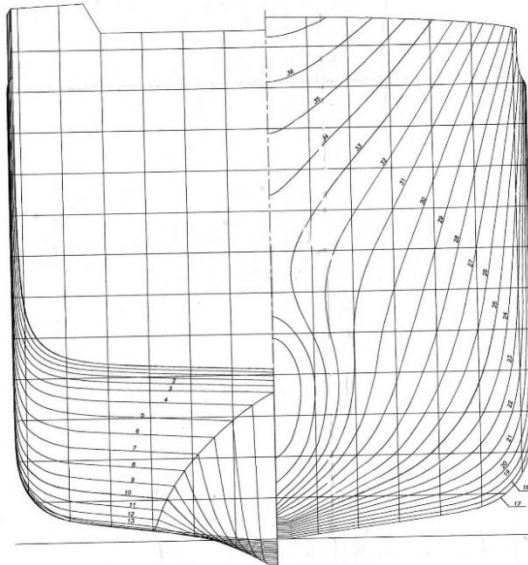


Рис. 1. Практический корпус с бульбовыми обводами по исландскому типу

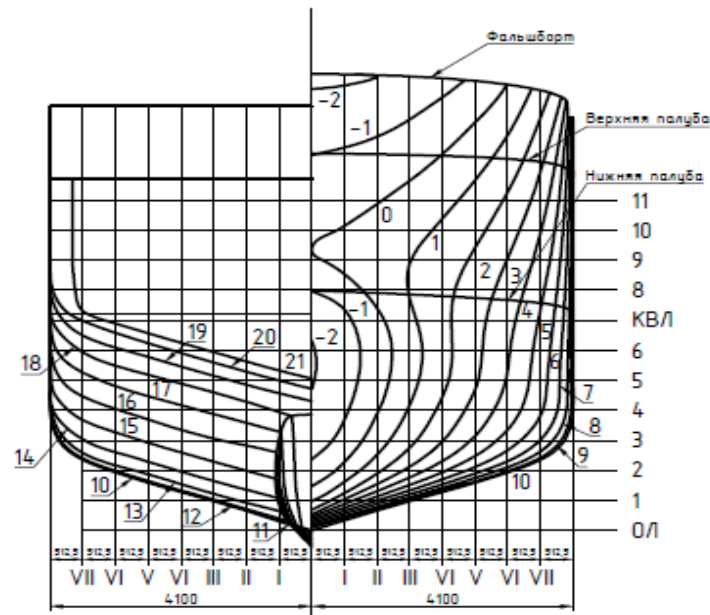


Рис. 2. Теоретический корпус с бульбовыми обводами по норвежскому типу

Таким образом, можно отметить, что в конце прошлого века сформировалась концепция использования носовых бульбов: с одной стороны, для выравнивания ватерлиний (уход от S-образности) в подводной части носовой оконечности достаточно широких корпусов судов ФРП, а с другой – появилась теория «прорывания» носовым бульбом волн встречного волнения.

## 2. Форма корпуса

Форма корпуса (подводная часть), в первую очередь, зависит от режима работы судна. Для работы на Балтике, учитывая небольшое удаление районов промысла от берега, достаточны скорости свободного хода до 12 узлов. При длине судна 24 метра, это соответствует числам Фруда до 0,39-0,40, но в большинстве случаев, подобные суда эксплуатируются рыбаками на экономических режимах – 10 – 11 узлов, что соответствует  $Fr = 0,32 - 0,36$ . Не секрет, что данные числа Фруда соответствуют переходным режимам хода, при которых начинает формироваться сопутствующая волна, длина которой увеличивается с увеличением числа Фруда и при достижении  $Fr = 0,4$  подошва волны перемещается в район кормового перпендикуляра, при этом резко увеличивается сопротивление.

Для приближенной оценки мореходных качеств, в первую очередь сопротивления воды движению судна, на ранних этапах проектирования, используют серийные диаграммы результатов модельных испытаний. Если обратиться к справочнику по теории корабля [4], то можно увидеть диапазоны изменения характеристик моделей, которые были испытаны в рамках серийных модельных испытаний. Помимо справочной литературы, в настоящее время имеются достаточное количество программных продуктов, которые позволяют производить расчеты буксировочного сопротивления на ранних стадиях проектирования. Одной из наиболее зарекомендовавших себя программных продуктов является ПО Maxsurf. Данное программное обеспечение позволяет производить расчеты буксировочного сопротивления глиссирующих судов (методы Савитского, Бланта и Фокса, Вэймана), водоизмещающих судов (методы Вэймана, Холтропа, Комптона, Фанга, Ван Оортмерссена, 60 серии) и яхт. Наиболее подходящими методами определения сопротивления для малых траулеров являются методы Холтропа, Комптона и Ван Оортмерссена.

Проанализировав справочную литературу и описание к ПО Maxsurf, можно увидеть, что современные полные формы корпусов маломерных промысловых судов типа МРТК не подходят (по отношению L/V и коэффициенту продольной полноты  $\phi$ ) ни под одну из доступных серий модельных испытаний. Это создает определенные проблемы при определении мощности главного двигателя судна на начальных этапах проектирования. Конечно, один из ключевых факторов при выборе мощности ГД является сопротивление трала и буксировочная мощность комплекса "судно + трал" на скоростях до 4-6 узлов (в зависимости от типа трала). Как показывают результаты проектных проработок, необходимая буксировочная мощность комплекса "судно + трал" на тралении больше, чем необходимая буксировочная мощность на свободном ходу. Данный факт зачастую наталкивает проектантов на мысль, что *при наличии избыточной мощности ГД судна на свободном ходу, вопросами оптимизации формы корпуса, с целью уменьшения сопротивления воды движению судна, можно пренебречь.*

*Данное мнение не бесспорное.* При проектировании малых и маломерных судов для таких акваторий, как Балтийское море, необходимо уделять особое внимание вопросам поведения судна на волнении - всхожесть на волну, заливаемость рабочих пространств открытых палуб, характеристикам килевой и бортовой качки и ходкости.

Оптимизационное проектирование с целью решения этих вопросов позволит сократить время простоя судна из-за плохих метеоусловий, и одновременно улучшить условия пребывания людей на судне. Дополнительно, при минимизации сопротивления воды движению судна, будет появляться экономический эффект из-за экономии топлива на переходах от берега до места промысла и обратно.

### 3. Экспериментальное исследование

Исследование одного из вопросов оптимизации формы корпуса судов данного класса было проведено в лаборатории мореходных качеств судов Научно-исследовательского центра судостроения ФГБОУ ВО "КГТУ" на примере исследования влияния носового бульба на мореходные качества.

МРТК "Марлин" пр. В-410 польской постройки, принадлежащий одной из рыбопромышленных организаций Калининградской области. Указанное судно - траулер. После переоборудования под загрузку улова наливом получил сильный дифферент на нос, в результате чего, в процессе эксплуатации, обнаружилась серьезная проблема заливаемости с носа на крутом коротком волнении Балтийского моря. Теоретический чертеж МРТК "Марлин" пр. В-410 представлен на рис. 3, а основные данные по судну представлены в таблице 1. Явление заливаемости судна с носа не позволяло полностью заполнять танки уловом, что, в свою очередь, негативно сказывалось на экономике судна.

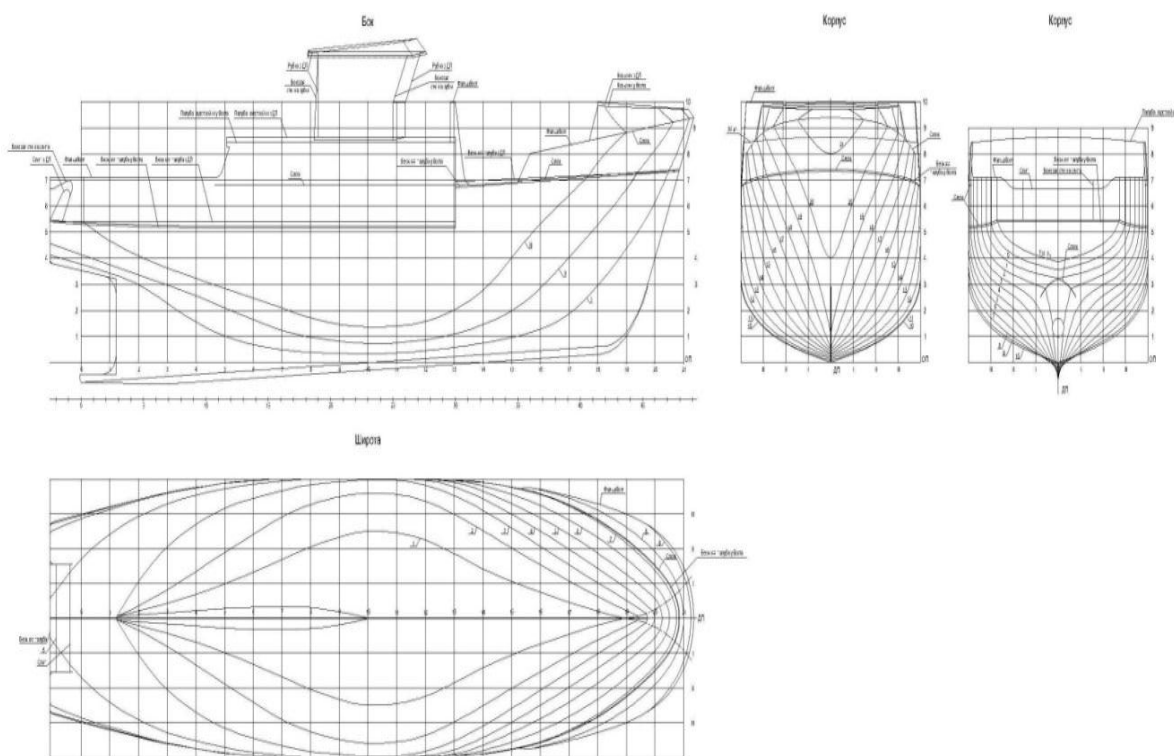


Рис. 3. Теоретический чертеж МРТК «Марлин» пр. В-410

## Основные данные по судну МРТК «Марлин» пр. В-410

Тип судна, название	Малый рыболовный траулер кормового траления «Марлин»
Назначение	Траловый лов
Район плавания	Водные бассейны разряда «М-СП 3,5»
Длина габаритная	25,8 м
Длина по КВЛ	24,3 м
Ширина габаритная	7,20 м
Ширина по КВЛ	7,20 м
Высота борта	3,49 м
Высота надводного борта	0,316 м
Осадка по ГВЛ	3,18 м
Водоизмещение	264 т
Расчетная скорость свободного хода	10,5 узлов

С целью исправления ошибки при переоборудовании указанного судна под наливное, одна из проектных организаций Калининградской области разработала проект модернизации судна, который заключался в изменении носовой оконечности - установки носовой бульбовой наделки. Теоретический чертеж судна "Марлин" с бульбообразной носовой оконечностью представлен на рис. 4.

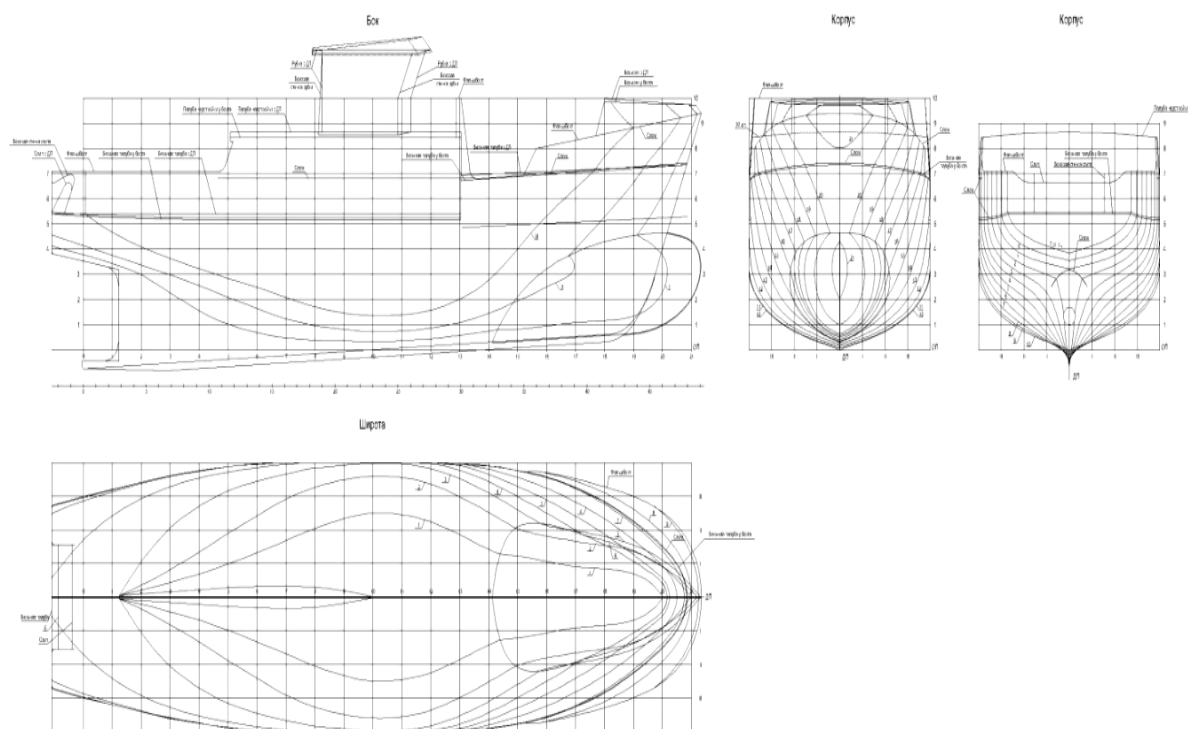


Рис. 4. Теоретический чертеж МРТК «Марлин» с бульбообразной носовой оконечностью

С целью предварительной оценки результата, из-за трудностей расчета заливаемости и ходкости судна с бульбом расчетными методами, в лаборатории мореходных качеств судов НИЦС КГТУ были проведены исследования на масштабных моделях судов в опытовом бассейне без и с носовым бульбом. По договоренности с Заказчиком, комплекс исследований включал в себя:

- буксировочные испытания модели судна на тихой воде (сопротивление);
- испытания модели судна на встречном регулярном волнении с длиной волны  $0,8L$ ;  $1,0L$  и  $1,2L$  при скорости судна 5 узлов (при проверке на заливаемость), где  $L$ —длина судна. Здесь принята единая длина для всех вариантов – 24,4 м, как длина от транца до пересечения бульба с форштевнем. При обработке буксировочных испытаний – принималась фактическая длина по ватерлинии.

В результате данных сравнительных модельных испытаний можно было увидеть, что буксировочное сопротивление на модели судна с бульбом на полной скорости (10,5 узлов) на  $15\div 20\%$  меньше (в зависимости от состояния загрузки), в отличие от модели судна без бульба. Однако, при одинаковой массе груза, на модели с бульбом на скорости около 8,5 узлов наблюдалось увеличение буксировочного сопротивления в районе 30% от исходной модели. Данные показания объясняются неблагоприятным, с точки зрения ходкости, обтеканием носовой оконечности судна при данной посадке судна и подтверждает, что характеристики бульба могут быть оптимальными только на одной определенной скорости.

В отношении заливаемости носовой части судна: в опытах интенсивность заливания определялась по толщине слоя воды, принимаемой моделью на перекрытие козырька в процессе продольной качки на встречном волнении. Замеры показали, что все варианты подвержены заливаемости в той или иной степени. Однако, интенсивность заливания вариантов с бульбом все же меньше, чем без бульба. Из сравнения замеров вариантов, можно заключить, что на данном судне решающую роль играет высота надводного борта в носу. Ее увеличение хотя бы на метр сыграло бы существенную роль в уменьшении заливаемости.

Увеличение надводного борта может быть обеспечено не только за счет высоты козырька, но и за счет установки волнолома на перекрытии козырька по всей ширине судна в этом месте.

Помимо исследований, проводимых с моделью т/х "Марлин", в лаборатории мореходных качеств судов выполнялись исследования модели МРТК нового типа, основные размерения которого представлены в таблице 2, а теоретический чертеж представлен на рис. 5.

Данная модель являлась результатами эскизной проработки МРТК, выполненной конструкторским бюро «Адомат» (г. Светлый, Калининградская область).

Таблица 2

### Основные размерения МРТК нового типа

Тип судна, название	МРТК нового типа
Назначение	Лов и перевозка рыбы
Длина между перпендикулярами	23,1 м

Ширина габаритная	8,50 м
Ширина по КВЛ	8,50 м
Расчетная скорость свободного хода	11,0 узлов
Теоретический чертеж	См. рис. 5

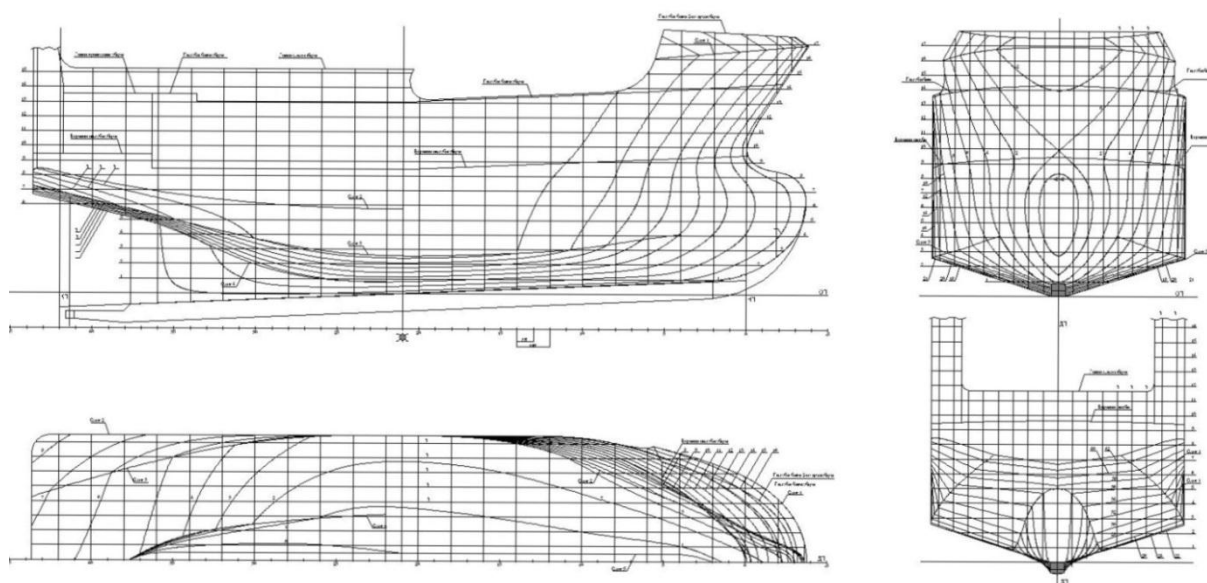


Рис. 5. Теоретический чертеж МРТК нового типа

Исследования проводились с целью определения поведения судна на тихой воде в следующих случаях посадки (таблица 3):

Таблица 3

### Случаи нагрузки судна

Наименование	1 случай нагрузки	2 случай нагрузки	3 случай нагрузки
Посадка судна	$T=3,80$ м Ровный киль	$T_H=3,43$ м; $T_K=4,17$ м	$T_H=2,71$ м; $T_K=3,91$ м

В результате исследований было выявлено, что по достижению ожидаемых скоростей движения судна (9-12 узлов) наблюдалось сильное увеличение буксировочного сопротивления и достаточно большой ходовой дифферент на нос. Кривые изменения остаточного сопротивления и ходового дифферента модели судна представлены на рис. 6 и 7.

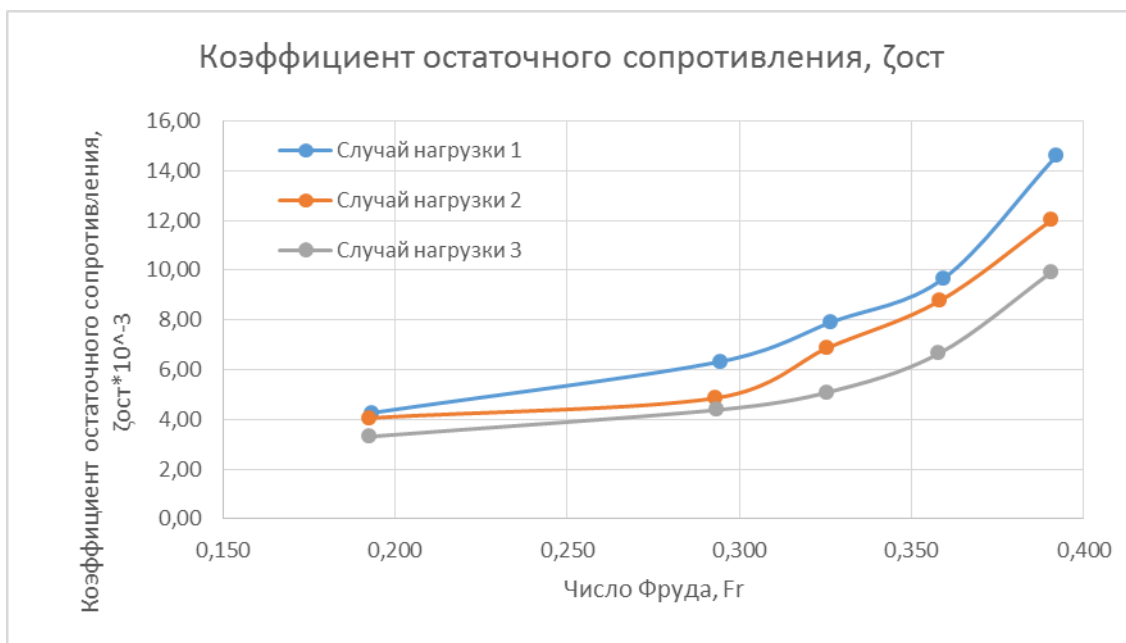


Рис. 6. Кривые коэффициента остаточного сопротивления от числа Фруда

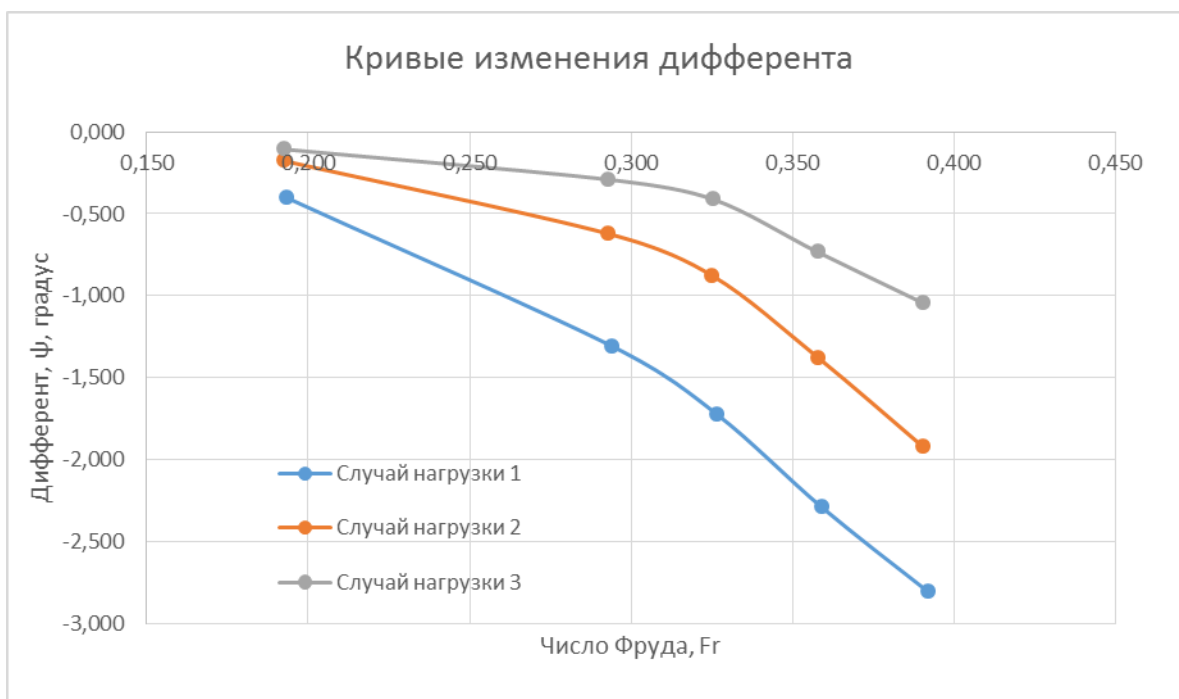


Рис. 7. Кривые изменения дифферента от числа Фруда

Исследования показали, что на переходных режимах наблюдался относительно большой ходовой дифферент на нос. Причиной этому может являться область низкого давления, образующаяся в районе наибольших объемов корпуса при обтекании жидкости на относительно больших числах Фруда, так и геометрическая форма носового бульба модели, которая может давать дифферентующий на нос момент в процессе движения. Особенно это можно увидеть на фотографиях носовой оконечности при проведении испытаний (рис. 8, 9, 10).

Кроме того, анализ данных испытаний показывает явную взаимосвязь между ходовым дифферентом на нос (просадкой носовой оконечности) и резким ростом буксировочного сопротивления.



*Рис. 8. Вид сбоку (форштевень) в 1 случае нагрузки. Скорость 11 узлов*



*Рис. 9. Вид сбоку (форштевень) во 2 случае нагрузки. Скорость 11 узлов*





*Рис. 10. Вид сбоку (форштевень) в 3 случае нагрузки. Скорость 11 узлов*

#### **4. Выводы**

Основываясь на вышеизложенном, можно сделать вывод, что подходить к вопросу проектирования формы корпуса для маломерных судов промысловых судов для акватории Балтийского моря необходимо с позиции комплексного решения задачи:

- поведения судна на волне (всхожесть на волну, килевая качка, заливаемость открытых участков палубы),
- наличия достаточных объемов в носовой оконечности (носовой бульб) для лучшей удифферентовки судна в статике и минимизации ходового дифферента судна на нос;
- формы носовой оконечности (в том числе бульба) судна для минимизации негативных явлений, описанных выше.

Следует отметить, что при решении задач по оптимизации мореходных качеств судов данного типа при помощи математических инструментов (программное обеспечение), трудно оценить ходовое изменение осадки и просадки судна. Поэтому, для их определения необходимы экспериментальные исследования с применением масштабных моделей в опытовых бассейнах.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Чуреев Е.А. Несоответствие мощностей промыслового флота и береговой инфраструктуры в Калининградской области // Материалы международного морского форума. – Калининград: из-во БГАРФ, 2016. – 1648 с.
2. Чуреев Е.А. К вопросу о выборе архитектурно-конструктивного типа малого рыболовного траулера для Балтийского моря // Труды V Международного Балтийского морского форума. – Санкт-Петербург: Научно-исследовательский центр «Морские интеллектуальные технологии», 2017. – 175 с.

3. Разработка концептуального проекта модернизации маломерного рыболовного траулера по типу пр. 1328 («Балтика»), для северо-западного региона России, с возможностью использования функции прохождения промысловой практики и обучения будущих специалистов отраслевых учебных заведений [Текст]: технический отчет / ФГБОУ ВО «КГТУ»; рук. Злыгостев Д.В.; исполн.: Маслюк Е.В. [и др.]. – Калининград, 2016. – 121 с. (на правах рукописи).

4. Справочник по теории корабля: В трех томах. Том 1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители / Под ред. Я.И. Войткунского. – Л.: Судостроение, 1985. – 768 с.

## **A STUDY ON THE FORM OF A SMALL FISHING TRAWLER CONFIGURATION WITH THE AIM OF IMPROVING ITS NAVIGABILITY**

Chureev Evgeniy Andreevich, graduate student

Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,  
e-mail: e.chureev@klgtu.ru

*The development of the hull shape of modern small-sized fishing vessels is one of the key tasks in the design of vessels of this type. Mathematical tools in assessing the seaworthiness of ships can not provide the necessary accuracy of calculations. The paper presents the results of model tests of small-sized fishing vessels with the analysis of the effect of the hull shape on various seaworthiness.*

## СЕКЦИЯ «ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ СУДОВ»

## SECTION "ELECTRICAL EQUIPMENT OF SHIPS"

УДК 628.25

### БАЛАНС РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ СУДОВЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ: ПРОБЛЕМЫ И НЕКОТОРЫЕ ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Белей Валерий Феодосиевич, профессор, д-р техн. наук

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,  
Калининград, Россия, e-mail: vbeley@klgtu.ru

*Дана оценка расчета баланса реактивной мощности при использовании табличного метода расчета мощности судовой электростанции. Предложена методика расчета потребляемой реактивной мощности асинхронными электроприводами. На примере судна РТМ-С показана эффективность индивидуальной компенсации реактивной мощности*

Вопросам оценки баланса реактивной мощности (РМ) на судах уделяется недостаточно внимания как на стадии проектирования, так и в процессе эксплуатации [1, 2]. При использовании табличного метода, при расчете мощности судовой электростанции для ряда судов не составляется баланс реактивной мощности. Или некорректно рассчитывается потребляемая РМ при заданном коэффициенте загрузки привода. Так как на судах преобладает нагрузка, обусловленная работой асинхронных электроприводов, то она в основном и определяет баланс РМ судовой электроэнергетической системы.

РМ асинхронных электроприводов при различных режимах эксплуатации может быть рассчитана с учетом рабочих характеристик асинхронного электродвигателя (рис. 1) по выражению 1 или на основе каталожных данных.

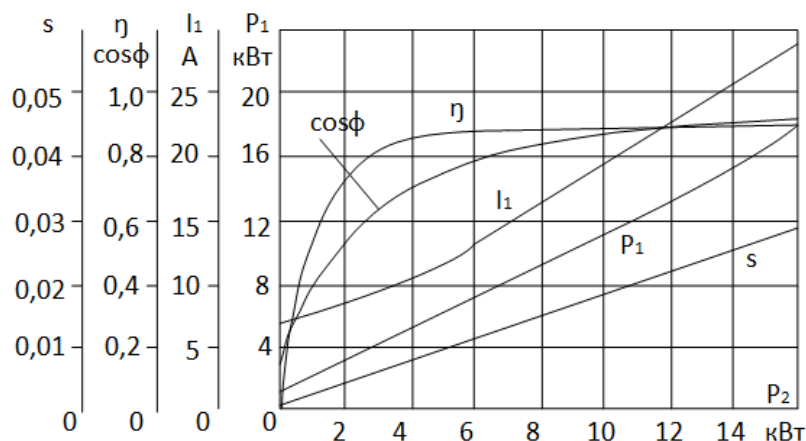


Рис. 1. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

$$Q_1 = \frac{K_3 \cdot P_{2H}}{\eta_1} \cdot \cos \varphi_3 \quad (1)$$

$Q_1$  – потребляемая асинхронного электродвигателем РМ при заданном коэффициенте загрузки  $K_3$  и коэффициенте полезного действия -  $\eta_1$ .

Расчет РМ по каталожным данным проводится с учетом уточненной схемы замещения асинхронной машины (рисунок 2) по выражениям 2-6 [3].

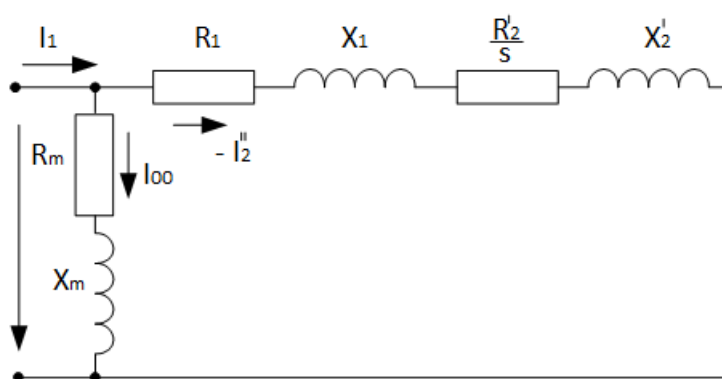


Рис. 2. Уточненная электрическая схема замещения асинхронной машины

$$I_{00} = \frac{U_1}{R_m + jX_m} = \text{const}, \quad (2)$$

$$-I''_2 = \frac{U_1}{\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + X_k^2} * \left[\left(R_1 + \frac{R'_2}{s}\right) - jX_k\right] \quad (3)$$

$$Q_0 = 3I_{00}^2 \cdot X_m, \quad (4)$$

$$Q_{\delta 1} + Q_{\delta 2} = 3(I''_2)^2 \cdot X_k \quad (5)$$

$$Q_1 = Q_0 + Q_{\delta 1} + Q_{\delta 2} \quad (6)$$

где,  $X_k = X_1 + X'_2$ .

Коэффициент загрузки ( $K_3$ ) асинхронного электродвигателя равный единице имеет место при номинальном скольжении  $s_{\text{НОМ}}$  (7), а долевые значения ( $s$ ) вычисляются в прямо пропорциональной зависимости от коэффициента загрузки асинхронного двигателя (рисунок 1) с учетом  $s_{\text{НОМ}}$  по выражению 8.

$$s_{\text{НОМ}} = \frac{n_1 - n_{\text{НОМ}}}{n_1} \quad (7)$$

$$s = s_{\text{НОМ}} \cdot K_3 \quad (8)$$

где,  $n_1$  и  $n_{\text{НОМ}}$  – соответственно синхронная и номинальная скорости вращения асинхронного электродвигателя.

Рассмотрим баланс РМ ЭЭС валогенератора (ВГ) судна типа РТМС (таблица 1, рисунок 3). Следует отметить, что при ходе судна с тралом имеет место высокое по-

треблении РМ и следовательно низкий  $\cos \varphi = 0,34$ . Режим работы системы возбуждения ВГ предназначен для диапазона  $\cos \varphi$  от 0,4 до 1.

Таблица 1

Энергобаланс ЭЭС валогенератора на судах типа РТМ-С

№	Наименование электроприводов, получающих питание от ВГ	Кол-во	Р <sub>н</sub> , кВт	η <sub>н</sub> , %	Ход судна с тралом				Подъем трала			
					К <sub>0</sub>	К <sub>н</sub>	Р, кВт	Q, кВАр	К <sub>0</sub>	К <sub>н</sub>	Р, кВт	Q, кВАр
1	ЭД гидроагрегата траловой лебедки	2	235	93	1	0,16	81	306	1	0,09	455	380
2	ЭД комбинированного вспомогательного насоса	2	14	87	0,5	0,8	13	6	0,5	0,8	13	6
3	ЭД кабельной лебедки	4	31/82/60	85	0,5	0,2	28,2	45	0,5	0,2	28,2	45
4	ЭД гиневой лебедки	2	31/86/60	85	-	-	-	-	1	0,2	28,2	45
5	Управление	1	6	-	-	-	6	-	-	-	6	-
Всего		12			cos φ=0,34		128,2	357	cos φ=0,74		530,4	476

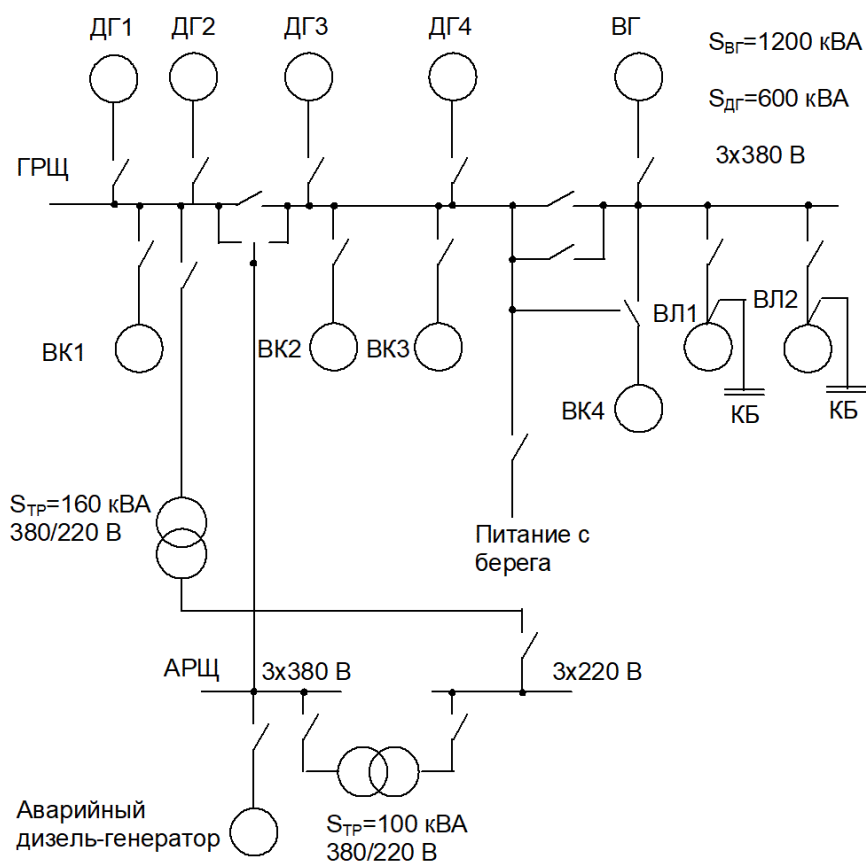


Рис. 3. Упрощенная электрическая схема электроэнергетической системы судна типа РТМ-С с указанием мест подключения конденсаторных батарей

Опытные данные о работе ВГ и орудий лова на судах типа РТМ-С свидетельствуют о более низких значениях  $\cos \varphi$ .

Таблица 2

**Данные о работе ВГ, орудий лова судов типа РТМ-С на промысле**

Режим работы	Скорость траления, м/с	Улов, т	Работа с орудиями			Работа ВГ				Судно
			Постановка трала	Траление, мин	Подъем трала	I, А	U, В	P, кВт	cos φ (расчет)	
Траление 19.09.81	5	10	21-10-21-15	115		750	390	100	0,2	Куршская коса
					23-10-23-50	1100		300	0,404	
Траление 26.07.84	5,5	6	00-10-00-45	105		700	310	100	0,212	Тритон
					02-30-03-20	900	390	300	0,494	
Поиск рыбы 01.11.84			00-10-00-30			700	390	100	0,211	
				395		800	390	200	0,37	
					03-45-04-45	700	390	100	0,211	
Траление 15.04.84	5,5	5	01-30 01-55	180		850	390	150	0,28	Русское поле
					04-55-05-55	1000	390	300	0,445	
Траление 20.04.	5,5	15	05-30-06-00	120						Орфей
					08-00-08-45	650	390	300	0,684	

Для решения данной проблемы целесообразно использовать индивидуальную компенсацию РМ асинхронных электроприводов ваерной лебедки, что было и выполнено на судне РТМ-С (таблица 3).

Таблица 3

**Результаты производственных испытаний электропривода гидроагрегата ваерной лебедки с конденсаторной батареей на судне РТМ-С «Багратионовск»**

Режим работы ВЛ	Время работы в сутки, час	Давление масла в системе гидропривода, кг/см <sup>2</sup>	Измеряемые величины	Мощность конденсаторной установки (КУ), кВАр		
				Без КУ	104	150*
Выбор трала	1,1	135	I, А	420	290	281
			cos φ	0,63	0,88	0,94
Ход судна с тралом	10	50	I, А	307	155	108
			cos φ	0,31	0,61	0,86

Подключение КУ к зажимам асинхронного двигателя уменьшает величину тока, потребляемую электродвигателем при той же активной мощности на валу. Поэтому защита (QF<sub>1</sub>) и система контроля работы электропривода (СУ1) должны быть отрегулированы на новое номинальное значение тока электропривода (I<sub>ЭП</sub>) (рисунок).

$$I_{\text{ЭП,ном}} = \frac{P_{2H}}{\eta_H \cdot \sqrt{3} \cdot U_H \cdot \cos \varphi_{\text{ЭП,ном}}}; \quad (9)$$

$$\cos \varphi_{\text{ЭП,ном}} = \frac{P_{1H}}{\sqrt{P_{1H}^2 + (Q_{1H} - Q_{КУ})^2}}. \quad (10)$$

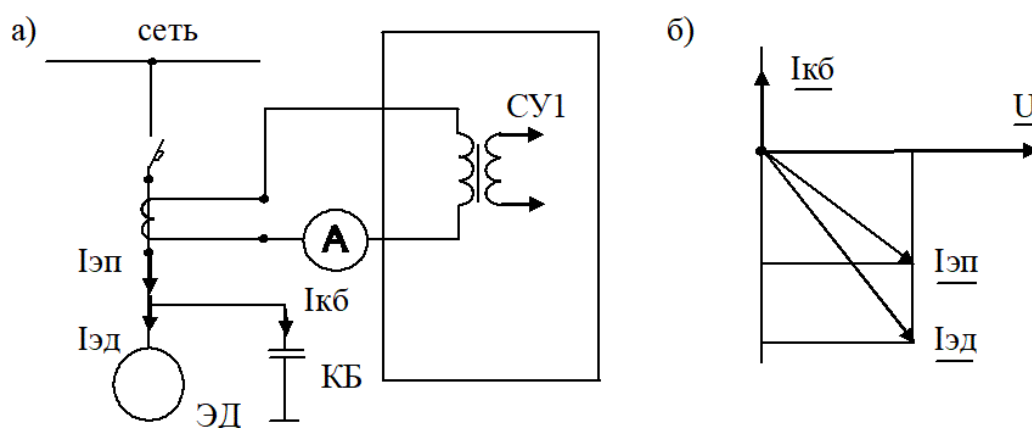


Рис. 4. Однолинейная принципиальная схема (а) и векторная диаграмма (б) асинхронного электропривода с системой индивидуальной компенсации реактивной мощности

Применение индивидуальной компенсации РМ для электроприводов ваерных лебедок значительно повышает  $\cos \varphi$  валогенератора, снижает ток в обмотке статора и потери электроэнергии в силовых цепях тракта валогенератор – ГРЦ – электродвигатели ваерной лебедки, обмотке возбуждения валогенератора, обеспечивает электромагнитную совместимость валогенератора с сетью (рисунок 5) [4].

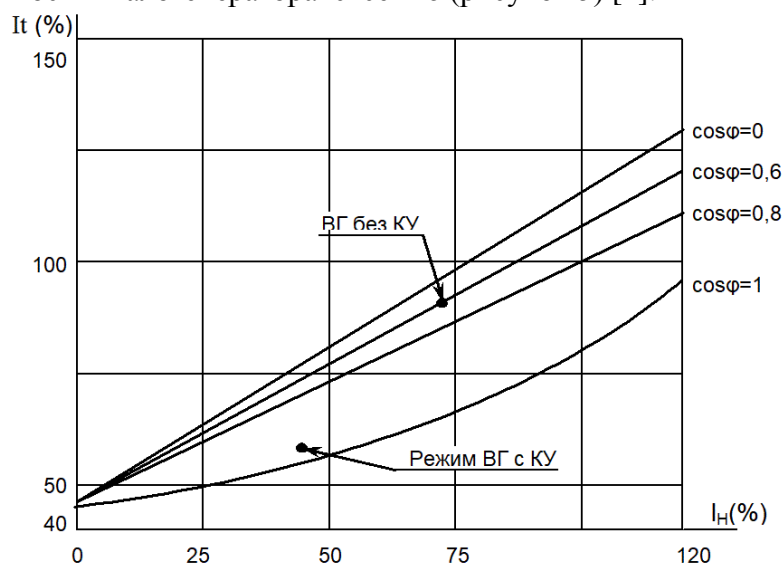


Рис. 5. Регулировочная характеристика валогенератора судна РТМ-С

При окончательном выборе мощности конденсаторов, присоединяемых к зажимам асинхронного двигателя, следует иметь в виду, что при мощности конденсаторов, превышающей 50% полной номинальной мощности двигателя, могут возникнуть перенапряжения и колебания момента на валу двигателя при его коммутации с присоединенным конденсатором. Поэтому изготовители двигателей рекомендуют, чтобы для крупных двигателей мощность присоединенной конденсаторной батареи не превышала 20-25% мощности двигателя. Если мощность конденсаторной батареи превышает рекомендованную величину, то следует провести проверку на обеспечение электромагнитной устойчивости рассматриваемой системы. В работе [5] получено выражение, связывающее величину емкостного сопротивления с остальными параметрами системы на границе устойчивости при отключении асинхронного электродвигателя с конденсаторной батареей от сети.

$$\omega_{r1,2} = \sqrt{\frac{x_c(x_{al} + x_{al}^l) - r^2}{2x_{al} \cdot x_{al}^l} \pm \left[ \frac{x_c(x_{al} - x_{al}^l) - r^2}{2x_{al} \cdot x_{al}^l} \right]^2 - \frac{x_c^2}{x_{al} \cdot x_{al}^2}}; \quad (11)$$

$$x_{al} = x_a + x_l; \quad x_{al}^l = x_a^l + x_l; \quad x_a = x_\mu + x_l; \quad x_a^l = x_l + x_{2\pi}; \quad r = r_l + r_l,$$

где  $x_a^l$  - переходное индуктивное сопротивление асинхронного двигателя с учетом пускового индуктивного сопротивления рассеивания ротора;

$r_l$  и  $x_l$  – соответственно активное и индуктивное сопротивления линии.

При скорости вращения ротора, близкой к синхронной, электромагнитная устойчивость нарушается при  $x_c \approx x_a$ . С ростом активного сопротивления в цепи обмотки статора область самовозбуждения сужается, и при определенном его значении  $r > r_{кр}$  самовозбуждение не возникает

$$r_{кр} = \sqrt{x_c(x_{al} + x_{al}^l - 2\sqrt{x_{al} \cdot x_{al}^l})}. \quad (12)$$

Согласно расчетам, при подключении к зажимам асинхронного двигателя электропривода гидроагрегата ваерной лебедки судна типа РТМ-С конденсаторной батареи мощностью 150 кВАр. Самовозбуждение не наступает.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панов В.А. Судовые электростанции и расчет их мощности. – Л.: Судостроение, 1965. – 132 с.
2. Российский морской регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских судов. –2016. Издание утв. 15.09.2015 г.
3. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока: Учебник для вузов. – СПб.: Питер, 2008. - 350 с.; ил.
4. Качество электроэнергии на судах: Справочник / В.В. Шейнихович [и др.]. – Л.: Судостроение, 1988. –180 с.
5. Самовозбуждение и самораскачивание в электрических системах / В.А. Веников, Н.Д. Анисимов, А.И. Долгинов, Д.А. Федоров. – М.: Высшая школа, 1964. – 330 с.



## REACTIVE POWER BALANCE OF SHIPBOARD POWER SYSTEMS: TECHNICAL CHALLENGES AND SOLUTIONS

Beley Valeriy Feodosievich, Dr. Sc. (Eng), prof.

Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,  
e-mail: vbeley@klgtu.ru

*The article concerns the estimation of reactive power balance with the tabular method for calculation of a shipboard power plant capacity. The author proposes his method for calculation of the reactive power consumed by induction motor. The efficiency of the individual reactive power compensation is shown on the example of the fishing vessel's power system.*

УДК 629.12.066:621.31

## СТРУКТУРА ЗАЩИТЫ ЭКИПАЖЕЙ ОТ СМЕРТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОТРАВМ И ПРИЧИНЫ ИХ НЕДОСТАТОЧНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

<sup>1</sup>Благинин Владимир Анатольевич, доцент, канд. техн. наук

<sup>1</sup>Кажекин Илья Евгеньевич, канд. техн. наук

<sup>2</sup>Юсып Вячеслав Михайлович, начальник кафедры

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,  
Калининград, Россия, e-mail: prp-met@rambler.ru

<sup>2</sup>Филиал ФГКОУ ВПО «Военный учебно-научный центр военно-морского  
флота, "Военно-морская академия им. Н.Г. Кузнецова"», Калининград, Россия,  
e-mail: v-yu48@yandex.ru

*Показана недостаточная эффективность действующего в настоящее время комплекса защитных и профилактических мероприятий, направленных на предотвращение смертельного электротравматизма на объектах морской техники. Выявлены причины невозможности его дальнейшего существенного улучшения и необходимость изменения самой концепции решения проблемы обеспечения полной электробезопасности*

### Введение

На всех этапах развития морской техники проблема защиты членов экипажей от смертельных электропоражений неизменно признаются одной из наиболее важных. Вместе с тем, постоянные усилия, которые на протяжении многих лет направлялись на обеспечение электробезопасности судов и кораблей, пока не привели к желаемым вариантам. Из практики следует, что показатели электроопасности целых флотов или их многочисленных частей с годами не уменьшается, а наоборот, находясь на неприемлемо высоком уровне, они демонстрируют заметную тенденцию к дальнейшему росту.

Одновременно с весьма опасными судами, которые в большом количестве эксплуатируются в нескольких отечественных флотах, имеются и такие, для которых проблема предотвращения несчастных случаев из-за электропоражений оказалась практи-

чески полностью решенной. По количеству судов «безопасная» часть совокупного отечественного флота не уступает «опасной» части. На входящих в ее состав судах смертельные электротравмы не фиксировались в течение нескольких десятилетий. К таким судам относятся малые суда рыбопромыслового флота, часть танкерного флота, обслуживающие суда портов и др. Особенно убедительно возможность существования полностью безопасных флотов подтверждается данными весьма продолжительных наблюдений за отдельным количеством судов, находящихся под наблюдением Российского речного регистра. Их численность значительно превышает 20 тысяч единиц. В течение нескольких десятилетий на них не произошло ни одного смертельного случая из-за поражения людей электрическим током. Исключение составил единственный случай гибели человека; но он произошел не в результате прикосновения к электрооборудованию бортовых электроэнергетических систем, а был вызван касанием к аккумуляторной батарее напряжением 24 В.

Общий объем наблюдений за речным флотом, показавшим себя как полностью безопасная группа судов, превысил величину  $10^6$  судо-лет. Если даже учесть единственный случай гибели человека из-за прикосновения к аккумуляторной батарее, то усредненная вероятность смертельного поражения на речных судах не превысит величину  $10^{-6}$  чел/судно в год. Обычно в качестве нормы пренебрежимо малых рисков принимается величина относительного числа погибающих в пересчете на одного члена персонала (экипажа) в год. Для развитых стран она принята равной  $10^{-6}$  чел/год [1]. Указанное выше относительное количество погибших, полученное в расчете на одно судно в год, а не на одного члена экипажа, оказывается в несколько раз меньше указанной нормы пренебрежимо малых рисков, поскольку в состав каждого экипажа входит не один, а несколько человек.

Если на судне или корабле риск смертельного электропоражения не превышает норму пренебрежимо малых значений, равную  $10^{-6}$  чел/год, то они должны быть признаны полностью безопасными. На таких объектах не следует проводить какие-либо дополнительные мероприятия для дальнейшего повышения их электробезопасности.

Изложенные выше факты показывают, что одни и те же профилактические мероприятия при их приложении к разным флотам или к их многочисленным частям могут приводить к диаметрально противоположенным результатам. Это указывает на их недостаточную универсальность и эффективность, а также на случайный характер результатов, достигаемых при их использовании. В связи с этим представляется необходимым установить причины, по которым действующий сейчас электрозащитный комплекс не позволяет обеспечить практически полную электробезопасность на всех объектах морской техники, а не только на их части.

### **Защитные мероприятия в системе «человек-судно»**

При изучении общих причин недостаточной эффективности применяемого электрозащитного комплекса удобно использовать понятие системы «человек-судно». Под такой системой следует понимать крупные соединения или категории объектов морской техники в совокупности с их экипажами. Именно в таких системах возникают несчастные случаи. Отдельные морские объекты или их малочисленные группы не могут образовывать подобные системы, поскольку в ходе непосредственных наблюдений сложившиеся электроопасности принципиально не могут быть установлены.

Указанное ограничение обусловлено важнейшим свойством, отличающим явление смертельного электротравматизма на флотах. Оно заключается в том, что образующие его поток несчастных случаев представляет собой случайный процесс с крайне редкой реализацией создающих его событий. На подавляющем большинстве объектов

морской техники экипажам удается избегать смертельных электротравм в течение всего срока эксплуатации их судов или кораблей.

Разумеется, это не означает, что такие объекты следует считать безопасными в отношении возможности возникновения несчастных случаев из-за действия электрического тока. Истинный уровень их опасности может быть выявлен только по результатам очень больших объемов наблюдений, измеряемых тысячами или десятками тысяч судов-лет. Для отдельных судов и кораблей, а также для малочисленных групп морской техники проведение наблюдений в таких объемах принципиально невозможно.

Введение понятия системы «человек-судно» позволяет разделить весь комплекс защитных и профилактических мероприятий на две части по их принадлежности к элементам «человек» и «судно». Мероприятия, относящиеся к элементу «человек», имеют организационный характер. Их действие в конечном итоге направлено на предотвращение опасных прикосновений людей к токоведущим частям бортового электрооборудования путем воздействия на «человеческий фактор». Технические средства защиты относятся к элементу «судно». Они предназначены для предотвращения летальных исходов в тех случаях, когда не удастся исключить прикосновение людей к электрооборудованию организационными мерами.

В составе общего электротехнического комплекса первоочередное внимание обычно уделяется организационным мерам профилактики. В этой направленности защитных действий реализуется предположение о том, что для предотвращения смертельных электротравм следует так воздействовать на людей, чтобы они понимали необходимость исключения опасных прикосновений к электрооборудованию. Это, в свою очередь, требует соответствующей профессиональной подготовки членов экипажей, включающей подготовку в области электротехники и техники безопасности. Необходимо также поддерживать на высоком уровне служебную и бытовую дисциплину, повышать личную и коллективную ответственность рядового состава и руководителей всех уровней, а также соблюдать установленный режим труда и отдыха, позволяющий членам экипажа выполнять свои обязанности без ошибок и промахов. Перечень способов и видов организационных мер защиты приведен в ГОСТе [2].

Практика показывает, что организационные меры воздействия на «человеческий фактор» имеют весьма ограниченные возможности. Они, безусловно, предотвращают многие несчастные случаи и должны рассматриваться как необходимая и важная часть общего электротехнического комплекса. Но при этом совершенно очевидно, что организационные мероприятия не способны самостоятельно обеспечить высокий уровень безопасности морской техники. Даже при очень интенсивном их использовании, имеющим место, например, в работе с экипажем военных кораблей или с коллективами электротехнических подразделений промышленных предприятий, в них не удастся полностью избежать опасных прикосновений к электрооборудованию. Последствия подобных прикосновений могут быть весьма тяжелыми и находят отражение в статистике смертельных электротравм. Данные о травмах показывают, что по относительному количеству погибших именно эти категории лиц превосходят другие (см. например, [3]).

Мероприятия технического характера, в отличие от организационных, потенциально способны обеспечивать полную безопасность в системе «человек-судно». Об этом свидетельствуют упомянутые выше статистические данные о существовании очень многочисленной группы объектов отечественной морской и речной техники. Эта группа эксплуатируется в тех же условиях, что и «опасная» часть флотов, но отличающаяся от нее практически полной электробезопасностью.

Действие технической составляющей общего электротехнического комплекса направлено на устранение или компенсацию конструктивных недостатков элемента «судно», создающих условия и предпосылки для смертельных электротравм. Они

включают в себя два основных технических решения. Первое из них заключается в выборе класса напряжения сети. Условием выбора номинального напряжения является оптимальное сочетание низкой электроопасности бортовых электроустановок с их высокой экономичностью. Теоретические исследования и опытная эксплуатация различных образцов морской техники с разными величинами номинальных напряжений позволили принять решение об использовании напряжений, не превышающих 400 В.

Второе решение заключается в установлении режима нейтрали для электроэнергетических систем. Для электросистем постоянного и переменного токов, смонтированных на морских объектах, выбран режим изолированной нейтрали. Это означает, что все элементы бортовых электросистем изолированы от корпусов судов и кораблей.

Оба технических решения приняты уже давно и они единообразно применяются на всех судах и кораблях. Однако, как отмечено выше, результаты их использования на разных группах морской техники могут оказаться диаметрально противоположенными. Очевидно, что радикальные расхождения результатов применения одних и тех же защитных комплексов, совпадающих в их организационных и технических составляющих, можно объяснить только особенностями самих бортовых электроустановок.

Из изложенного следует, что основным направлением работы по обеспечению полной электробезопасности морской техники следует признать развитие технических средств защиты. Оно должно проводиться с учетом индивидуальных особенностей бортовых электросистем на каждом из судов и кораблей.

### **Системные недостатки действующей защиты**

Выше отмечено, что недостаточную эффективность действующие системы защиты от электротравм пока не удалось преодолеть, несмотря на все попытки ее совершенствования, предпринимавшиеся на протяжении нескольких десятилетий. Это обстоятельство прямо указывает на системный кризис в решении проблемы электробезопасности морской техники. Для его разрешения недостаточны меры по совершенствованию действующей защиты. Необходимо изменить сам подход к решению проблемы безопасности.

Разработка новой концепции предотвращения смертельных электротравм на судах и кораблях должна предусматривать выявление и устранение существующих системных недостатков применяемой защиты, поскольку именно они не позволяют существенно повысить электробезопасность морской техники. Ниже описаны некоторые из системных недостатков нынешнего электрозащитного комплекса, которые обусловлены статически редкой реализацией события гибели людей от тока.

Во-первых, к системным недостаткам комплекса следует отнести невозможность на его основе получать какие-либо количественные оценки опасности для каждого объекта в отдельности. В результате эта важнейшая эксплуатационная характеристика остается неопределенной. Она не нормируется и не контролируется. В настоящее время невозможно проранжировать морскую технику по уровням опасности отдельных объектов, невозможно определить необходимость применения дополнительных средств технической защиты от электропоражений, а также невозможно решить целый ряд других важных задач по управлению индивидуальными уровнями электроопасности судов и кораблей.

Ясно, что этот недостаток действительно является системным. Он очень значительно сказывается на нынешних возможностях действующего электрозащитного комплекса, а также определяет результаты будущих попыток повысить его эффективность.

Во-вторых, важным недостатком действующего комплекса следует признать его инерционность в отношении получения каких-либо количественных данных об уровнях электроопасности морской техники даже в тех случаях, когда получение подобных оце-

нок принципиально возможно, т.е. для больших групп длительно контролируемых судов и кораблей. В этих случаях накопление исходных данных о смертельных электротравмах должно продолжаться несколько лет, что практически исключает даже постановку задачи по изучению влияния многих отдельных факторов на уровень электробезопасности флота в целом. В результате попытки совершенствовать систему обеспечения электробезопасности на флотах предпринимаются в условиях отсутствия необходимых исходных данных. Только этим можно объяснить то, что нынешний электрозащитный комплекс сохраняется многие годы почти в неизменном виде, несмотря на его недостаточную эффективность.

В-третьих, к системным недостаткам комплекса следует отнести также его избирательность в применении. Объединяемые в нем организационные и технические мероприятия единообразны как по содержанию, так и по использованию. Они предназначены для всех судов и кораблей вне зависимости от их индивидуальных особенностей. Между тем, выше было показано, что именно особенности бортовых электросистем определяют эффективность защиты от электропоражений и возможность достижения высокого уровня безопасности нынешними и перспективными средствами.

Непредсказуемость и самопроизвольность результатов, достигаемых путем применения действующего сейчас защитного комплекса, представляет собой другую сторону его избирательности. Пока мы не можем даже приблизительно оценить достаточность подобной защиты по отношению к отдельным группам морской техники.

В-четвертых, в рамках действующего защитного комплекса невозможно раздельно оценить вклады в общий уровень электроопасности, привносимые отдельными элементами «человек» и «судно» в общий уровень собственной опасности каждой из систем «человек-судно». Представляется, что именно поэтому в настоящее время без достаточного количественного обоснования продолжают считать важнейшим способом уменьшения численности смертельных электротравм совершенствование организационных мер профилактики.

Состав системных недостатков электрозащитных комплексов отечественных морских флотов не ограничивается отмеченными выше. Их более подробный анализ требует раздельного рассмотрения особенностей применения организационных и технических защитных мероприятий. Результаты подобного анализа по объему выходят за пределы настоящей статьи и здесь не излагаются.

## **Выводы**

В заключение, на основании изложенных сведений можно сделать следующие выводы.

1. Действующий в настоящее время комплекс электрозащитных мероприятий не обладает необходимой эффективностью. При его использовании все отечественные флоты могут быть разделены на две части – опасные и полностью безопасные. Наличие радикально расходящихся результатов при использовании одного и того же набора организационных и технических мероприятий, направленных на предотвращение смертельного электротравматизма на флотах, является достаточным основанием для их пересмотра.

2. Действующий электрозащитный комплекс имеет ряд недостатков системного характера. Их устранение, проводимое путем постепенного совершенствования отдельных защитных мероприятий, принципиально не возможен. В связи с этим пересмотр мероприятий комплекса должен представлять собой изменение самой концепции решения проблемы обеспечения безопасности людей на объектах морской техники.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хенли Э.Дж. Кумамото Х. Надежность технических систем и оценка риска. М.: Машиностроение, 1984. 528 с.
2. ГОСТ 12.1.019-79. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
3. Манойлов В.Е. Основы электробезопасности. Л.: 1976. 344 с.

### **STRUCTURE OF THE PROTECTION OF CREWS FROM DEATH ELECTRIC TRAFFIC AND THE CAUSES OF THEIR INSUFFICIENT EFFECTIVENESS**

<sup>1</sup>Blaginin Vladimir Anatolyevich, Associate Professor, Doctor of Sciences

<sup>1</sup>Kazhekin Ilya Evgenievich, Doctor of Sciences

<sup>2</sup>Yusyp Vyacheslav Mikhailovich, Head of the Department

<sup>1</sup>Kalininsrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,

e-mail: npp-met@rambler.ru

<sup>2</sup>The branch of the Military Training and Research Center of the Navy

"Naval Academy named. N.G. Kuznetsova ", Kaliningrad, Russia,

e-mail: v-yu48@yandex.ru

*The article shows the insufficient efficiency of the current range of protective and preventive measures aimed at preventing lethal electroinjuries in marine objects of marine engineering. The reasons for the impossibility of its further substantial improvement and the need to change the very concept of solving the problem of ensuring full electrical safety are revealed.*

УДК 629.12

### **МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НАСОСОВ РУЛЕВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА СУДНА «ОМСКИЙ 135» ПРОЕКТА 1743.1**

Бочарова Наталья Владимировна, доцент, канд. техн. наук

Шабалин Леонид Дмитриевич, доцент, канд. техн. наук

Сивуха Марина Эрнстовна, доцент

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,

Калининград, Россия, e-mail: nw.bocharova@yandex.ru

*Целью данной работы является модернизация системы управления и защиты насосов рулевого электропривода судна «Омский 135» на основе современной системы SIMO-CODE-DP, позволяющей не только заменить существующую релейно-контакторную схему, но и расширить защитные, управляющие функции, а также функции контроля. Система SIMOCOD- DP соответствует требованиям Правил Регистра РФ*

Рулевой электропривод относится к ответственным электроприводам непосредственно влияющих на безопасность судна. Поэтому согласно требованиям Правил Регистра РФ к электрическим приводам и управлению рулевыми устройствами на судне должна быть предусмотрена световая и звуковая сигнализация в случае:

- исчезновения напряжения в цепи питания каждого силового агрегата, а также системы управления;
- короткого замыкания, обрыва фазы, замыкания на корпус;
- неисправности канала передачи данных, аппаратных средств и программного обеспечения;
- минимального уровня масла в любой из систем гидравлической системы.

Кроме этого должны быть предусмотрены средства отключения любой системы управления с мостика от рулевого привода, который она обслуживает. Главный электрический или электрогидравлический привод, состоящий из одного или более силовых агрегатов, должен получать питание по двум отдельным фидерам, проложенным непосредственно от главного и аварийного распределительных щитов разными трассами.

Авторулевой «Печора», установленный на судне «Омский135», управляет электрогидравлической рулевой машиной. Авторулевой «Печора», созданный на базе системы «Аист», предназначен в основном для судов речного флота. В рулевых электрогидравлических приводах перекладка руля производится агрегатом электродвигатель-насос. На судне «Омский135» в качестве приводных электродвигателей применяют нерегулируемые короткозамкнутые асинхронные электродвигатели (АМ70, 8кВт, 950 об./мин.) с непосредственным включением посредством магнитных пускателей (ПМ, 380В, 20.5А).

Схема силового привода рулевой машины предусматривает дистанционный пуск и остановку электродвигателей насосов из рулевой рубки и румпельного отделения. Для этого применяются пакетные переключатели, которые имеют фиксацию положения, что обеспечивает самозапуск двигателя после возможного перерыва питания.

Контакторная станция управления силовым приводом установлена в румпельном отделении, там же находится и щит питания рулевого устройства, напряжение на который подается по двум независимым линиям, разведенным по бортам. Автоматы, установленные на ГРЩ и АРЩ, защищают фидеры и схему от коротких замыканий. Состояние силового привода контролируется системой сигнализации – звуковой и ламповой. В румпельном отделении на щите для каждого фидера установлены сигнальные лампы наличия питания. Аналогичные лампы находятся в постах дистанционного пуска исполнительных двигателей, а также в посту управления рулем, рулевой рубке и в ЦПУ. Через трансформаторы (ОСВМ 0.63кВА, 380/133В) получает питание устройство сигнализации УСПДОМ4 (поставлено фирмой в комплекте с двигателем). Устройство содержит выключатель запуска насоса, звуковой сигнал о перегрузке насоса, кнопку снятия звукового сигнала, световой сигнал о работе насоса, а также трансформатор питания.

Перегрузка привода контролируется с помощью тепловых токовых реле, контакты которых действуют на световую и звуковую сигнализацию. При этом происходит мигание ламп за счет заряда-разряда конденсатора в цепи катушки реле, контакты которой замыкают и размыкают цепи питания ламп.

Работа электродвигателей насосов гидравлических рулевых машин имеет ряд особенностей:

- малая загрузка (коэффициент загрузки менее 0.5) особенно в режиме автоматического удержания судна на курсе, что обеспечивается малыми отклонениями пера руля при малой частоте включений (2-3 в минуту);
- удаленность от мест несения вахтенной службы, что исключает постоянное наблюдение за состоянием, тем более на автоматизированных судах;

- в практике эксплуатации нередки случаи заклинивания по различным причинам насосов электрогидравлических приводов с последующей стоянкой под током.

Характерными особенностями является и работа рулевых приводов в повторно-кратковременном режиме с большим количеством переключений, а также широкие пределы изменения момента на валу электродвигателя.

Сигнализация от перегрузки в рулевых электроприводах выполнена на основе тепловых реле с термобиметаллическими элементами. Такие элементы включены в две фазы электродвигателя. Оценка температуры двигателя производится косвенно по интегральному значению тока, протекающему через термоэлемент. Эффективность работы теплового реле зависит от степени соответствия тепловых свойств реле и двигателя. Удовлетворительное действие защиты будет в том случае, если допустимое время перегрузки двигателя и время срабатывания реле при том же токе совпадают. При повторно-кратковременном режиме, который сопровождается частыми пусками, температурные характеристики реле и двигателя не совпадают, что ухудшает эффективность защиты. Кроме того сам сигнал о перегрузке или обрыве фазы может быть не воспринят персоналом из-за неисправности сигнальных ламп или ревуна. Следует также отметить, что в зоне перегрузок (1.05 – 1.25) номинального тока работа тепловых токовых реле нестабильна. Если обрыв фазы электродвигателя произойдет при малых нагрузках электропривода, то потребляемый ток увеличивается, но величина его не превзойдет величины номинального тока и сигнализация о перегрузке не сработает. Согласно техническим условиям тепловое реле не срабатывает в течении 60 минут при токе 1.1 номинального и должно срабатывать не более, чем за 20 минут при токе 1.35 номинального тока уставки. Поэтому при отсутствии вахты в румпельном отделении обрыв фазы работающего электродвигателя может быть обнаружен при очередном запуске после остановки. В случае заклинивания двигателя насоса сигнализация о перегрузке сработает, если тепловое реле работоспособно и настроено, причем сигнал о перегрузке должен быть подан за время, не превышающее допустимого времени стоянки двигателя под током. Однако в реальных обстоятельствах срабатывание сигнализации может произойти с запозданием вследствие разброса характеристик тепловых реле, влияния пониженной температуры среды в румпельном отделении и т.д.

Значительно упростить схему управления и защиты электродвигателей насосов рулевой машины возможно с помощью системы SIMOCOD-DP. Это устройство управления и защиты двигателя с интерфейсом PROFIBUS-DP. Микропроцессор – центральный элемент системы. Все защитные и управляющие функции обрабатываются микропроцессором. Встроенные трансформаторы тока позволяют регистрировать такую важную измеряемую величину, как электрический ток. Система SIMOCOD-DP полностью включает в себя все функции управления и мониторинга, а также сигнализации. Отпадает необходимость во внешней релейной схеме управления. Сигнал обратной связи «Двигатель Включен/Отключен» формируется по наличию/отсутствию рабочего тока.

В результате применения системы SIMOCOD-DP уменьшается количество соединительных проводов и точек подключения, а следовательно и число неполадок, отпадает необходимость в промежуточных реле и клеммах.

Система SIMOCOD-DP содержит несколько видов защит, действие которых основано на измеряемом токе:

- защита/сигнализация от перегрузки;
- защита/сигнализация от обрыва фазы;
- защита/сигнализация от блокировки ротора.

Работа устройства возможна в диапазоне токов от 0.25 до 820А. Основной модуль определяет ток в трех фазах при помощи встроенных трансформаторов тока.



Таким образом, система SIMOCOD-DP дает возможность выполнить требование Правил Регистра в части наличия сигнализации обрыва фазы рулевого электропривода, а также использовать более качественную сигнализацию о перегрузке на основе токовой или температурной защиты на основе термисторов, встроенных в обмотки двигателя.

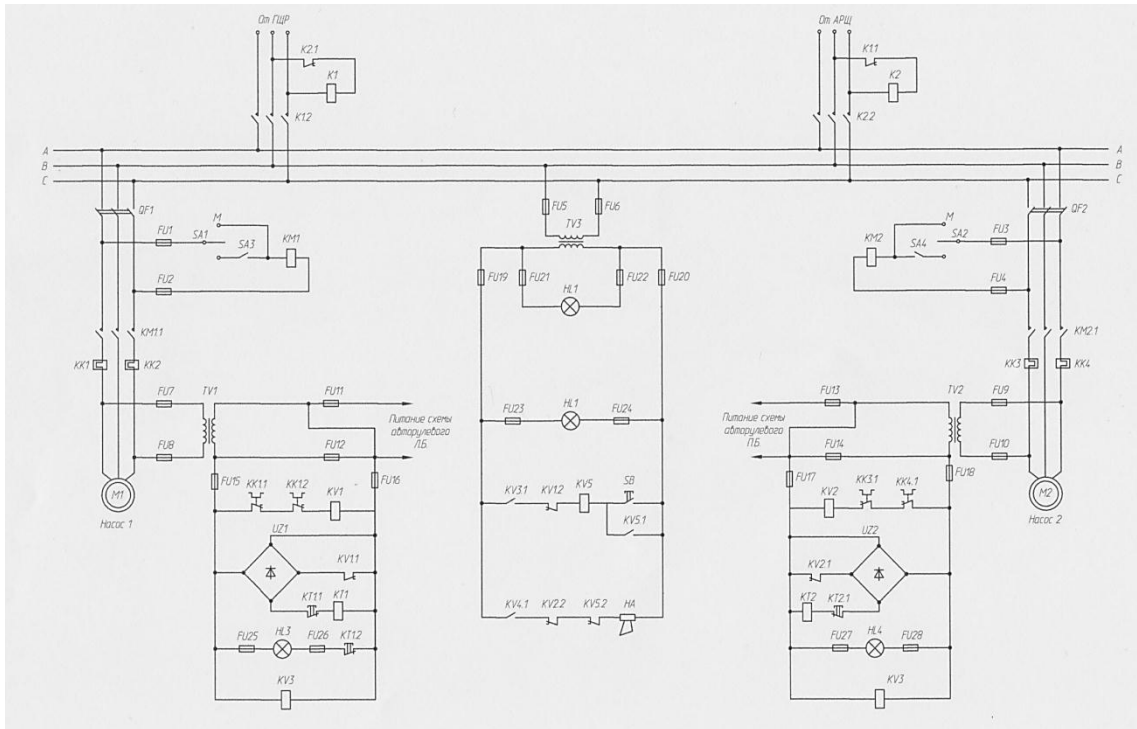


Рис. 1. Схема рулевого привода с использованием традиционной технологии

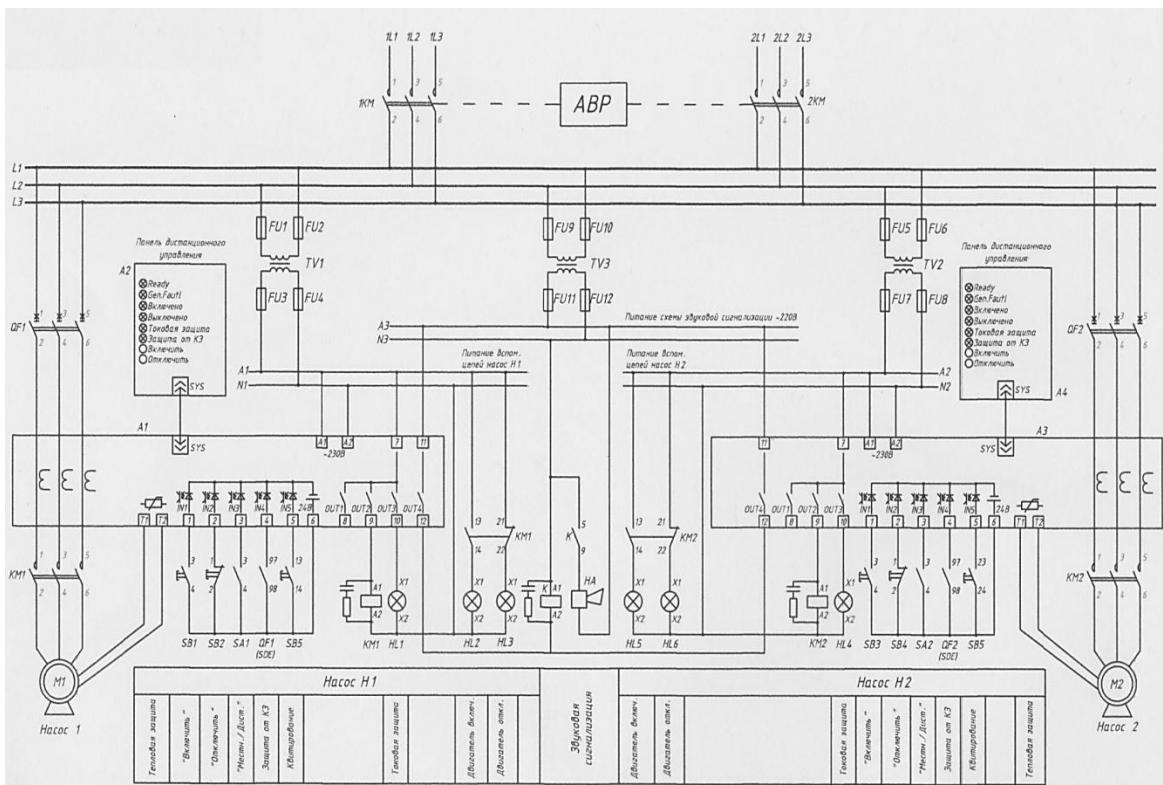


Рис. 2. Схема рулевого привода с использованием устройства SIMOCOD-DP

Использование системы SIMOCOD-DP расширяет функции контроля температуры, напряжения, мощности чередования фаз, коэффициента мощности. Появляется возможность отслеживать текущие данные:

- текущее состояние двигателя (включено, отключено, влево, вправо, медленно, быстро);
- напряжения и токи в фазах;
- активную и полную мощность;
- модель нагрева обмотки двигателя;
- температуру двигателя.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калязин Е.А., Рокотян Ю.В., Филимонов В.Д., Игнатьев Л.Л. Электрическая защита судового электрооборудования. – Л.: Судостроение, 1983. – 240 с.

#### **MODERNIZATION OF THE CONTROL AND PROTECTION SYSTEM FOR ELECTRIC MOTORS OF THE ELECTRIC POWER STEERING PUMPS OF THE "OMSKIY 135" VESSEL (PROJECT 1743.1)**

Bocharova Natalia Vladimirovna, Dr. Sc., Associate Professor  
Shabalin Leonid Dmitrievich, Dr. Sc., Associate Professor  
Sivukho Marina Ernstovna, Associate Professor

Kalininsrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,  
e-mail: nw.bocharova@yandex.ru

*The purpose of this work is to modernize the control and protection system for the electric power steering pumps of "Omskiy 135" vessel on the basis of the modern SIMOCODE-DP system, allowing to replace the existing relay-contactor circuit and extend the protective and control functions. The SIMOCOD-DP system complies with the requirements of the Russian Maritime Register Rules.*

УДК 621.316.06001.4

#### **АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВНОЙ ГАРМОНИКЕ В НИЗКОВОЛЬТНЫХ СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОСЕТЯХ**

Кажекин Илья Евгеньевич, доцент, канд. техн. наук

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,  
Калининград, Россия, e-mail: kazhekin@mail.ru

*Работа посвящена феррорезонансным процессам, возникающим на основной гармонике. Сделан обзор причин возбуждения феррорезонансных процессов, а также проведена оценка возможности их появления в низковольтных судовых электросистемах.*

*При этом учитывались особенности построения судовых электросетей, а также их основные параметры*

В судовых электросетях имеется ряд индуктивных элементов, характеристики которых при определенных условиях могут оказаться существенно не линейными. К таким элементам относятся генераторы, силовые трансформаторы, реакторы, магнитопроводы которых насыщаются, вследствие чего их индуктивность меняется в широких пределах в течение каждого периода промышленной частоты. Взаимодействие этих элементов с фазной ёмкостью электрической сети, может привести к возникновению феррорезонанса на основной, высших и низших гармониках.

На основной гармонике возникновение феррорезонанса, как правило, обусловлено появлением несимметрии в электросистеме. Возникновение феррорезонанса на высших гармониках может быть вызвано как автопараметрическим резонансом из-за изменения параметров цепи, так и в результате переходных процессов. Возникновение феррорезонанса на субгармониках может быть вызвано только переходными процессами.

Любое возникновение феррорезонанса в электросистемах считается нежелательным, поскольку сопровождается протеканием свертоков, появлением высших гармоник и опасных перенапряжений, поэтому оценка возможности их возникновения необходима для надежной эксплуатации бортового электрооборудования. Как правило, возможность возникновения феррорезонанса устраняется на этапе проектирования системы. Однако при разработке судовых электроустановок это явление традиционно не принимается во внимание. Более того, феррорезонансные перенапряжения практически не исследовались в судовых электросистемах, в отличие от других видов перенапряжений, например дуговых [1].

Возможность возникновения феррорезонансных явлений во многом определяется режимом нейтрали электросети. В этом плане наиболее близким к низковольтным судовым сетям являются распределительные сети средних классов напряжения. Механизмы формирования феррорезонанса в таких сетях достаточно подробно изучены и рассмотрены как в нормативной документации, так и в учебной и научной литературе. Однако не все известные виды феррорезонанса могут возникать в низковольтных судовых электроэнергетических системах (СЭЭС). В то же время, некоторые особенности бортовых электросистем могут стать причиной феррорезонансных явлений, формирование которых не возможно в береговых электроустановках. Например, случаи феррорезонанса, обусловленные насыщением магнитопроводов измерительных трансформаторов напряжения, не могут возникнуть в СЭЭС, поскольку трансформаторы напряжения, подключенные между фазами электросистемы и корпусом судна, в них не используются.

Ниже рассмотрены основные причины появления феррорезонанса в судовых электросистемах и оценена возможность их возникновения. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00622.

### **1. Феррорезонанс при контакте с корпусом оборванной фазы в электросистеме с изолированной нейтралью**

Схема электросети в таком режиме может быть изображена следующим образом:

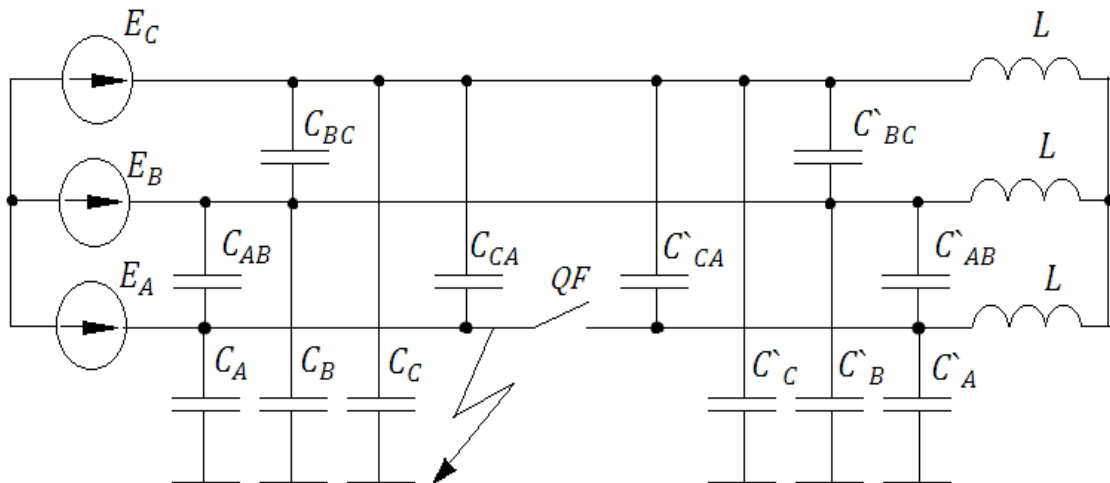


Рис. 1. Схема судовой электросистемы с изолированной нейтралью при обрыве и контакте с корпусом одной из фаз

В результате обрыва одной из фаз и замыкании ее на корпус в электросети образуется феррорезонансный контур, включающий в себя активное сопротивление электрооборудования, емкости сети и индуктивности силовых и осветительных трансформаторов. Схема феррорезонансной цепи изображена ниже.

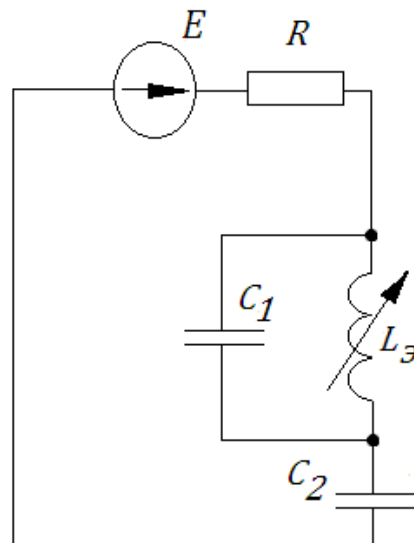


Рис. 2. Эквивалентная схема контура нулевой последовательности судовой электросистемы при анализе феррорезонансных процессов

Схема замещения, изображенная на рисунке 2, описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} \underline{E} = \underline{U}_R + \underline{U}_L(I_L) + \underline{U}_C, \\ \underline{I}_{C_2} = \underline{I}_{C_1} + \underline{I}_L, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\underline{E}$  – ЭДС феррорезонансного контура;  $\underline{U}_R$  – падение напряжения на активном сопротивлении феррорезонансного контура;  $\underline{U}_L(I_L)$  – падение напряжения на нелинейной индуктивности;  $\underline{U}_C$  – падение напряжения на емкости  $C_2$ ;  $\underline{I}_{C_2}$  – ток через емкость  $C_2$ ;  $\underline{I}_{C_1}$  – ток через емкость  $C_1$ ;  $\underline{I}_L$  – ток через нелинейную индуктивность.

Условия возникновения феррорезонанса в цепи, изображенной на рисунке 2 можно сформулировать следующим образом.

1) Емкость  $C_2$  должна находиться в пределах, определяемых изменением нелинейной индуктивности при насыщении магнитопроводов электрооборудования:

$$\omega L_1 \geq \frac{1}{\omega C_2} \geq \omega L_2, \quad (2)$$

где  $\omega$  – угловая частота электросети;  $L_1$  – индуктивность нелинейного элемента в ненасыщенном состоянии;  $L_2$  – индуктивность нелинейного элемента в насыщенном состоянии.

2) Величина энергии, поступающей в контур должна быть больше энергии, рассеиваемой на его активном сопротивлении. Если проанализировать вольтамперные характеристики элементов контура, составленные по выражению (1), то это условие для основной гармоники можно записать следующим образом:

$$\begin{cases} |\underline{E}| > |\underline{U}_R|, \\ \left| \underline{U}_L(I_L) + \underline{U}_C \right| = 0. \end{cases} \quad (3)$$

3) Начальные условия переходных процессов должны быть достаточны для перехода системы в состояние равновесия, соответствующее феррорезонансу. При дальнейшем анализе принимается, что в электросистеме нельзя исключать переходных процессов, способных привести к феррорезонансу в случае выполнения первых двух условий, соответствующих выражениям (2) и (3).

Для схемы, изображенной на рисунке 1, справедливо следующее соотношение  $C_2 = C_A$ . Если рассматривать только параметры трехфазных трансформаторов ТСВМ и ТСЗМ мощностью от 1.6 кВА до 250 кВА [2], то следует отметить, что величина  $\omega L_1$  может варьироваться в пределах от 41 мкОм до 2.6 мОм. По данным об измеренных фазных емкостях судовых электросетей, опубликованных в [3], величина  $\frac{1}{\omega C_2}$  может находиться в диапазоне от 0.22 мОм до 4.55 мОм. Учитывая, что величина  $\omega L_2$ , как правило у трансформаторов незначительна, условие (2) вполне выполнимо в судовых электросистемах.

Условие (3) также будет выполняться практически всегда, поскольку для случая, изображенного на рис. 1,  $E = 1.5E_\Phi$ , где  $E_\Phi$  – амплитуда фазной ЭДС, а  $|\underline{U}_R|$  близко к нулю, поскольку судовые кабельные линии, как правило, короткие и их активное сопротивление мало.

## 2. Феррорезонанс при обрыве двух фаз в электросистеме с изолированной нейтралью

Схему, описывающую электросистему с изолированной нейтралью при обрыве двух фаз, можно представить следующим образом.

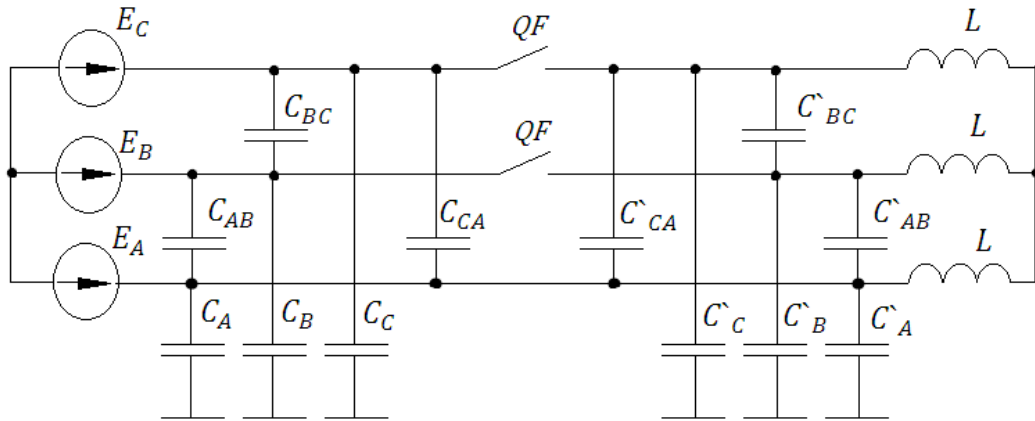


Рис. 3. Схема судовой электросистемы с изолированной нейтралью при обрыве двух фаз

Путем эквивалентных преобразований схему, изображенную на рисунке 3, можно привести к виду на рисунке 2. При этом величина емкости  $C_2$  и ЭДС контура  $E$  будут определяться следующими выражениями:  $C_2 = C'_B + C'_C$  и  $E = E_\Phi$ . Используя эти выражения, а также диапазоны значений емкостей, приведенные в [6], можно провести оценку выполнения условий (2) и (3).

Поскольку в рассматриваемом случае несимметрии емкость увеличилась по сравнению с проанализированной ранее схемой, то можно считать, что условие (2) также будет выполняться при определенных сочетаниях параметров электросистемы. Несмотря на снижение величины  $E$  и некоторое увеличение  $U_R$ , условие (3) также будет выполняться.

### 3. Феррорезонанс при обрыве одной из фаз в электросистеме с изолированной нейтралью

При обрыве одной из фаз электросистемы схему судовой электросистемы можно изобразить следующим образом.

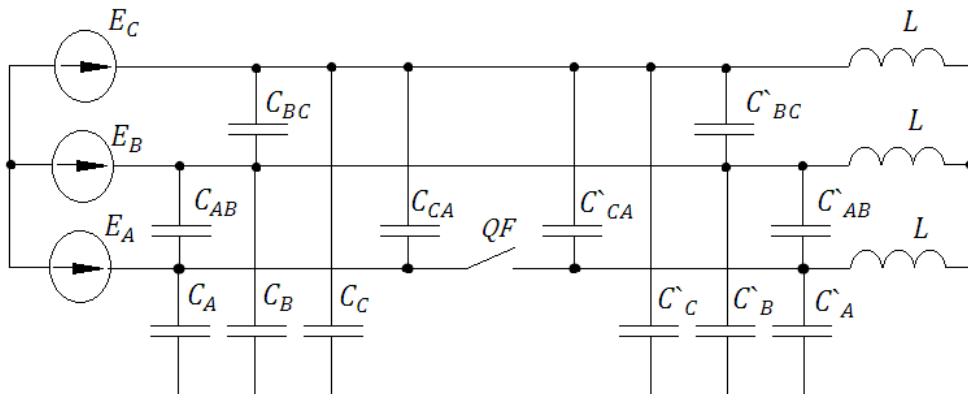


Рис. 4. Схема судовой электросистемы с изолированной нейтралью при обрыве одной из фаз

Такую схему можно привести к виду, представленному на рисунке 2. В этом контуре емкость  $C_2$  будет равна  $C'_A$ , а ЭДС составит  $0.5E_\Phi$ . Из этого следует, что при определенных сочетаниях параметров электросистемы в рассматриваемом случае несимметрии также может возникнуть феррорезонанс.

#### 4. Феррорезонанс при однофазном замыкании в электросистеме с заземленной через реактор нейтралью

Следует отметить, что такой режим нейтрали на судах используется крайне редко. Однако его применение способно привести к одновременному улучшению целого ряда показателей, характеризующих безопасность электросистемы [4], а следовательно рассмотрение возможных последствий его применения нельзя исключать. Схема замещения низковольтной судовой электросистемы с нейтралью, заземленной через реактор, при однофазном замыкании может быть представлена следующим образом.

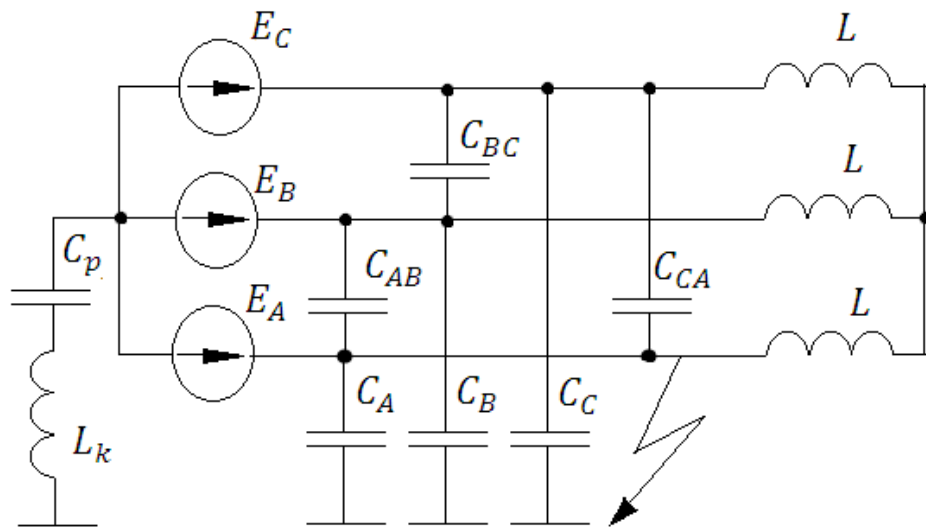


Рис. 5. Схема судовой электросистемы с заземленной через реактор нейтралью при контакте с корпусом одной из фаз

В [5] рассмотрены переходные процессы в такой цепи и обоснован переход к более простой схеме замещения, изображенной на рисунке 6, при исследовании феррорезонансных процессов.

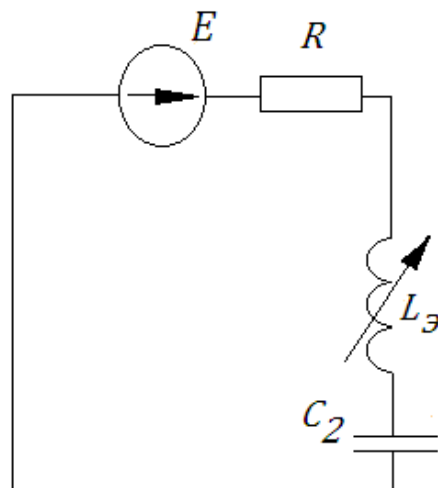


Рис. 6. Схема судовой электросистемы с заземленной через реактор нейтралью

Рассматриваемая схема включает следующие элементы  $R$  – активное сопротивление, включающее сопротивление токопроводов электросети, самого ДГР и корпуса судна;  $L_э$  – индуктивность нелинейного элемента, вольтамперная характеристика кото-

рого может быть представлена как  $U_L(I) = U_0 + K \cdot I$ , где  $U_0$  – напряжение, соответствующее насыщению;  $K$  – коэффициент аппроксимации;  $C_2 = C_p$  – суммарная емкость разделительных конденсаторов;  $E = E_\phi$  – фазная ЭДС сети.

Условие для возникновения феррорезонанса в этом контуре может быть описано следующим выражением.

$$R \leq \frac{E \cdot (1 - K \omega C_2)}{\omega C_2 \sqrt{U_0^2 - E^2}} \quad (4)$$

Поскольку в выражение (4) входят преимущественно параметры устройства заземления нейтрали, выполнение этого условия и возможность возникновения феррорезонанса определяется характеристиками цепи реактора и разделительными емкостями. При грамотном проектировании устройства феррорезонанс может быть исключен. Способ заземления нейтрали, позволяющий это реализовать на основе выражения (4) реализован в [6].

### 5. Феррорезонанс при естественной несимметрии в электросистеме с заземленной через реактор нейтралью

Естественная несимметрия фазных емкостей в низковольтных судовых электросистемах ничем не ограничивается. Согласно [7] ее степень может достигать 55.7%. В этих условиях важно рассмотреть влияние на возможность возникновения феррорезонанса отклонения фазных емкостей друг от друга. Схема замещения судовой электросистемы может быть представлена следующим образом.

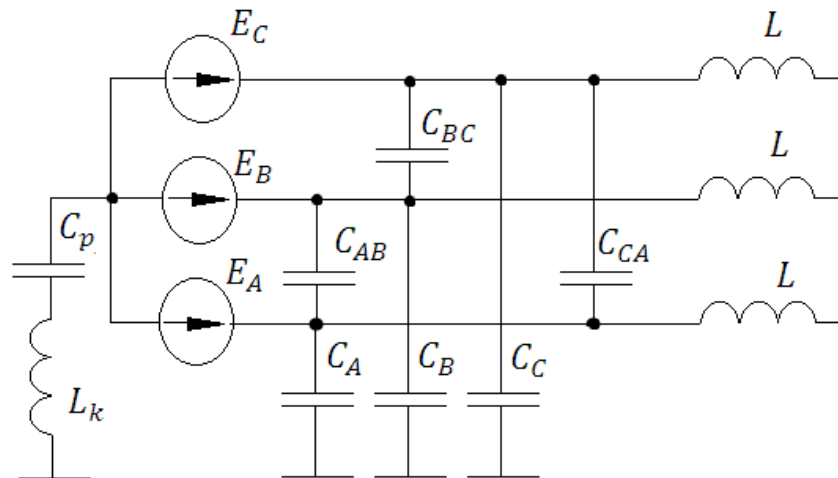


Рис. 7. Схема судовой электросистемы с заземленной через реактор нейтралью

Схема может быть сведена к виду, изображенному на рис. 6. В этом случае элементы схемы будут выражать следующие параметры бортовой электроустановки  $R$  – активное сопротивление, включающее сопротивление токопроводов электросети, самого ДГР и корпуса судна;  $L_3$  – индуктивность нелинейного элемента, вольтамперная характеристика которого может быть представлена как и в п.4;  $C_2$  – суммарная фазная емкость электросети разделительных конденсаторов;  $E$  – ЭДС контура, равный напряжению несимметрии. В рассматриваемом контуре условия возникновения феррорезонанса также могут быть определены выражением (4).



## Выводы

1. Анализ показал, что возникновение феррорезонансных явлений в низковольтных судовых электросистемах исключать нельзя. При определенных сочетаниях параметров электрооборудования условия для их появления выполняются.

2. В большинстве случаев феррорезонансные процессы могут быть устранены на этапе проектирования судовых электроустановок.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Благинин, В.А. Дуговые перенапряжения в судовых электросистемах с различными режимами нейтрали / В.А. Благинин, В.И. Лозовенко, И.Е. Кажекин // Известия КГТУ. 2008. №13. С. 118-121.

2. Справочник судового электротехника: В 3-х т. / Под общ. ред. Г. И. Китаенко. 1980. 624 с.

3. Ксенофонтов А.П. Защитные устройства в судовых и береговых электроустановках рыбной промышленности / А.П. Ксенофонтов, Ю.А. Шестопалов, В.Я. Островский // М.: «Легкая и пищевая промышленность». 1984. 254 с.

4. Кажекин, И.Е. Определение требований к защите судовых электроэнергетических систем от однофазных замыканий/ И.Е. Кажекин // Электрика. 2011. №3. С. 35-38.

5. Благинин, В.А. Описание феррорезонансных процессов при однофазных замыканиях в судовых электроэнергетических системах с компенсированной нейтралью/ В.А. Благинин, И.Е. Кажекин/ Сборник «Инновации в науке и образовании – 2011. Труды IX Международной научной конференции. 2011. С.427-430.

6. Способ заземления нейтрали: пат. 2516437 Рос. Федерация: МПК H02H3/20, H02H9/04 / Кажекин И.Е., Благинин В.А.; заявитель и патентообладатель Благинин В.А. - № 2012131721/07; заявл. 24.07.2012; опубл. 27.01.2014 Бюл. № 3

7. Благинин, В.А. Проблема несимметрии фазных емкостей низковольтных судовых электроэнергетических систем с резонансно-заземленной нейтралью / И.Е.Кажекин, В.А. Благинин // Сборник V международный балтийский морской форум. 2017. С. 270-274.

## ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF FERRORESONANCE PROCESSES AT THE FUNDAMENTAL HARMONIC IN THE LOW-VOLTAGE SHIP ELECTRIC SYSTEMS

Kazhekin Ilya Evgenievich, Doctor of Science

Kalininsrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,  
e-mail: kazhekin@mail.ru

*The work is devoted to the ferroresonance processes arising on the basic harmonic. The article reviews the reasons for the excitation of ferroresonance processes and assesses the possibility of their appearance in low-voltage ship electrical systems. At the same time, the features of the ship's electrical networks, as well as their main parameters, were taken into account.*

## АЛГОРИТМ МИНИМИЗАЦИИ РАСХОДА ТОПЛИВА ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНЫХ АГРЕГАТОВ

Кузнецов Сергей Емельянович, профессор, д-р техн. наук  
Алексеев Николай Андреевич, профессор, канд. техн. наук  
Виноградов Андрей Александрович, доцент

ФГБОУ ВО «ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова», Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: KuznecovSE@gumrf.ru; kaf\_saees@gumrf.ru; eric\_esseker@mail.ru

*Приведена зависимость удельного расхода топлива судового дизель-генераторного агрегата от вырабатываемой электрической мощности и коэффициента мощности. Указаны основные причины, вызывающие перерасход топлива СДГ-агрегатов. Различия в зависимостях удельного расхода топлива от вырабатываемой мощности и коэффициента мощности для однотипных СДГ-агрегатов одинаковой номинальной мощности. Дан алгоритм распределения нагрузки между параллельно работающими судовыми дизель-генераторными агрегатами с учетом зависимостей удельного расхода топлива от вырабатываемой мощности и коэффициента мощности каждого СДГ-агрегата*

При эксплуатации судовых дизель-генераторных агрегатов (СДГ-агрегатов) важной задачей является снижение расхода топлива.

Минимальный расход топлива одного СДГ-агрегата при изменении нагрузки определяется его зависимостью удельного расхода топлива  $q$  от выходной электрической мощности генератора  $P_r$ , первоначально полученной при заводских испытаниях исправного СДГ-агрегата с использованием штатного топлива и приводимой в паспортных данных каждого СДГ-агрегата. Минимальный удельный расход топлива обычно соответствует диапазону нагрузок, составляющему 75–85% от номинальной электрической мощности агрегата. В паспортных данных обычно приводится зависимость удельного расхода топлива только от активной электрической нагрузки СДГ-агрегата, то есть при  $\cos\varphi = 1$ . С уменьшением  $\cos\varphi$  нагрузки удельный расход топлива увеличивается.

Перерасход топлива одного СДГ-агрегата (по отношению к паспортным данным) может быть вызван следующими основными причинами:

1. Снижение технического состояния СДГ-агрегата, то есть увеличением потерь мощности в дизеле и (или) генераторе.
2. Пониженное качество используемого дизельного топлива.
3. Неустановившиеся (переходные) режимы работы СДГ-агрегата в связи с изменением электрической нагрузки.
4. Существенная недогрузка работающих СДГ-агрегатов и, как следствие этого, работа СДГ-агрегата в неоптимальном режиме с повышенным удельным расходом топлива.
5. Снижение коэффициента мощности электрической нагрузки, приводящее к увеличению реактивной мощности, то есть увеличению полного электрического тока при той же активной мощности и, как следствие этого, относительное увеличение потерь мощности в синхронном генераторе и в кабелях электрической сети.

6. Пониженная эффективность приемников электроэнергии (в основном электродвигателей из-за их недогрузки).

В процессе эксплуатации в следствие действия указанных причин происходит изменение зависимости удельного расхода топлива от выходной мощности дизеля (генератора), то есть увеличение удельного расхода топлива и смещение диапазона нагрузок, соответствующих минимальному удельному расходу топлива. При этом изменения удельного расхода топлива СДГ-агрегата, связанные со снижением уровня технического состояния агрегата, можно устранить путём технического обслуживания или ремонта.

Согласно требованиям Правил классификации и постройки морских судов [Т.2. – СПб: РМРС, 2015. – 807 с.] Российского морского регистра судоходства (РМРС) при параллельной работе генераторов переменного тока в диапазоне от 20 до 100% общей нагрузки распределение ее на каждый генератор должно происходить пропорционально их мощностям и не должно отличаться более, чем на 15% от расчетной нагрузки большего из генераторов или на 25% от расчетной нагрузки рассматриваемого генератора в зависимости от того, что меньше. В настоящее время распределение общей нагрузки между параллельно работающими ДГА производится согласно этим требованиям, но без учета зависимости удельного расхода топлива от вырабатываемой электрической мощности каждого СДГ-агрегата.

Для однотипных дизель-генераторных агрегатов даже одинаковой номинальной мощности и сборки зависимости УРТ от относительной мощности генератора  $\bar{P}_r = \frac{P_r}{P_{ГН}}$  и коэффициента мощности  $\cos \varphi$ , как правило, не совпадают, ( $P_{ГН}$  - номинальная мощность,  $P_r$  – фактическая мощность генератора) [2], а для СДГ-агрегатов неодинаковой мощности различие зависимостей  $q$  ( $\bar{P}_r$ ) может быть более значительным.

В связи с неодинаковым характером изменения удельного расхода топлива от  $\bar{P}_r$  и  $\cos \varphi$ , а в ходе длительной эксплуатации СДГ-агрегатов эти зависимости изменяются. Различие может увеличиться, для каждого из параллельно работающих генераторов распределение общей нагрузки судовой электростанции строго пропорционально их номинальным мощностям может оказаться неэффективным с точки зрения минимизации удельного расхода топлива.

Так как Правилами классификации и постройки морских судов РМРС допускаются отклонения при распределении нагрузки между параллельно работающими генераторами пропорционально их мощностям, в связи с чем и с учетом различия зависимостей удельного расхода топлива от мощности, нагрузку между генераторами можно делить с учетом этих зависимостей так, чтобы общий удельный расход топлива был меньше, чем если бы нагрузка делилась строго пропорционально.

При параллельной работе СДГ-агрегатов для минимизации общего расхода топлива при заданных общей электрической нагрузке и  $\cos \varphi$  нагрузки судовой электростанции важное значение имеет распределение нагрузки с учётом фактических зависимостей удельного расхода топлива от мощности и  $\cos \varphi$  каждого СДГ-агрегата, соответствующих в текущий момент фактическому техническому состоянию СДГ-агрегатов.

Для этого следует удельный расход топлива каждого СДГ-агрегата представить в виде регрессионной зависимости удельного расхода топлива  $q(P_r)$  от значения электрической мощности  $P_r$  и  $\cos \varphi$  [1, 2, 3]:

$$q(P_r) = \frac{k_1}{\cos^4 \varphi} \cdot P_r^3 + \frac{k_2}{\cos^2 \varphi} \cdot P_r^2 + (k_5 + \frac{k_6}{\cos^2 \varphi}) \cdot P_r + k_3 + \frac{k_4}{P_r} \quad (1)$$

где  $q(P_r) = \frac{10^3 \cdot Q}{P_r}$  (г/кВт·ч) – удельный расход топлива ДГА;

$P_r$  (кВт) – мощность синхронного генератора;

$Q$  (кг/ч) – расход топлива;

$\cos \varphi$  – коэффициент мощности нагрузки;

$k_1 \div k_6$  – постоянные коэффициенты, зависящие от технического состояния ДГА:

$$k_1 = \frac{10^{15}}{9 \cdot U^4} \cdot K_G^2 \cdot K_{D2} \text{ (г/кВт}^4 \cdot \text{ч)}; \quad k_2 = \frac{2 \cdot 10^9}{3 \cdot U^2} \cdot K_G \cdot K_{D2} \text{ (г/кВт}^3 \cdot \text{ч)}; \quad k_3 = 10^3 \cdot K_{D1},$$

$$\text{(г/кВт} \cdot \text{ч)}; k_4 = 10^3 \cdot Q_{\text{пост}}, \text{ (г/ч)}; k_5 = 10^3 \cdot K_{D2}, \text{ (г/кВт}^2 \cdot \text{ч)}; k_6 = \frac{10^9 \cdot K_G \cdot K_{D1}}{3 \cdot U^2}, \text{ (г/кВт}^2 \cdot \text{ч)};$$

$K_G$  (кВт/А<sup>2</sup>);  $K_{D1}$  (кг/кВт·ч);  $K_{D2}$  (кг/кВт<sup>2</sup>·ч);  $U$  (В) – напряжение генератора;  $Q_{\text{пост}}$  (кг/ч) – постоянная составляющая расхода топлива, соответствующая расходу топлива на холостом ходу.

Первоначальная регрессионная зависимость  $q(P_r)$  определяется на основе заводских испытаний СДГ-агрегата. В дальнейшем она корректируется (непрерывно или периодически при техническом обслуживании СДГ-агрегата) с учетом его фактического состояния.

При параллельной работе двух СДГ-агрегатов решается задача выбора мощности параллельно работающих СДГ-агрегатов ( $P_{r1}$  и  $P_{r2}$ ), обеспечивающих требуемую нагрузку судовой электростанции

$$P = P_{r1} + P_{r2}, \quad (2)$$

при минимальном суммарном удельном расходе топлива

$$q(P) = [q(P_{r1}) + q(P_{r2})] \rightarrow \min. \quad (3)$$

Зависимость удельного расхода топлива СДГ-агрегата от мощности генератора и  $\cos \varphi$  может быть представлена в соответствии с методикой, изложенной в статье [1] в виде уравнения (1). Минимальный суммарный удельный расход топлива (3), соответствующий измеренным электрической мощности судовой электростанции  $P$  и коэффициента мощности  $\cos \varphi$ , определяется на основе совместного решения системы двух уравнений (1) для первого и второго СДГ-агрегатов и уравнения (2). Укрупненная схема алгоритма решения данной задачи представлена на рис.1 – производится непрерывное измерение мощности и  $\cos \varphi$  судовой электростанции. Результаты измерений и регрессионные зависимости (1) для каждого СДГ-агрегата вводятся в компьютерную модель. В ней на основе анализа возможных распределений нагрузки между параллельно работающими СДГ-агрегатами при заданных мощности судовой электростанции и  $\cos \varphi$  определяется распределение нагрузки с минимальным общим удельным расходом топлива.

Техническая реализация данного алгоритма может быть осуществлена в автоматическом режиме в современных судовых программируемых микропроцессорных системах управления, например, в системе управления электростанцией РРМ-300 (см. <https://dvk-electro.ru/ObpowerStation/ppm300.html> «Общее описание, инструкция оператора, инструкция по установке»), содержащей широкий набор функций, необходимый для управления электроустановками морского базирования. В полуавтоматическом режиме автономная реализация данного алгоритма позволит использовать полученные результаты в качестве поддержки принятия решения обслуживающим персоналом (вахтенным) по рациональному распределению нагрузки параллельно работающих СДГ-агрегатов в конкретном режиме работы судовой электростанции.

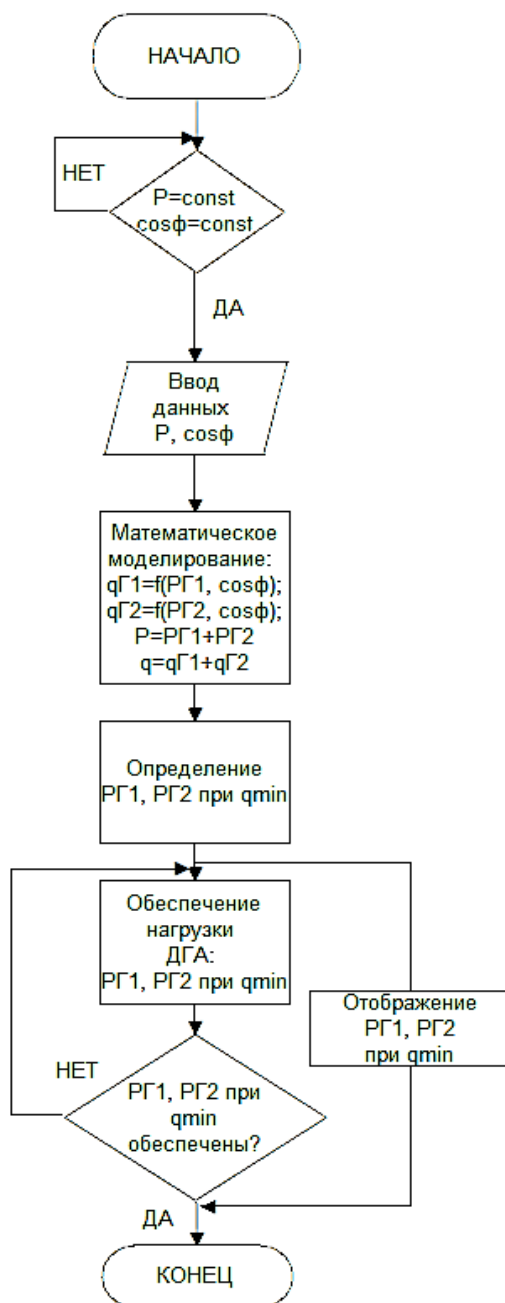


Рис.1 Блок-схема алгоритма распределения нагрузки между параллельно работающими судовыми дизель-генераторными агрегатами

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов, С.Е. Влияние нагрузки и коэффициента мощности на расход топлива судового дизель-генераторного агрегата. // С.Е. Кузнецов, Ю.В. Кудрявцев // Судостроение. – 2011. – №6 – с. 30-32.
2. Кузнецов, С.Е. Удельный расход топлива судового дизель-генераторного агрегата/С.Е. Кузнецов, А.А. Виноградов// Тезисы докладов V МНК «Морская техника и технологии. Безопасность морской индустрии». 21-27 мая 2017 г. Калининград: КГТУ, 2017. – С. 141-143
3. Алексеев, Н.А. Способ распределения нагрузки между параллельно работающими судовыми дизель-генераторными агрегатами/Н.А. Алексеев, А.А. Виноградов, С.Е. Кузнецов// Патент на изобретение RU2645387C1, опубликовано 21.02.2018, Бюл. № 6. – 7 с.

## **ALGORITHM OF FUEL CONSUMPTION MINIMIZATION FOR PARALLEL WORK OF SHIP DIESEL GENERATORS**

Kuznetsov Sergey Emelyanovich, Professor, Doctor of Technical Sciences  
Alekseev Nikolay Andreevich, Professor, Candidate of Technical Sciences  
Vinogradov Andrey Aleksandrovich, Associate Professor

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint-Petersburg,  
Russia, e-mail: KuznecovSE@gumrf.ru; kaf\_saees@gumrf.ru; eric\_esseker@mail.ru

The dependence of the specific fuel consumption of the ship diesel-generator aggregate on the generated electric power and the power factor is given. The main reasons that cause fuel consumption of SDG-aggregates and differences in the dependence of the specific fuel consumption on the generated power and the power factor for identical SDG units of the same nominal power are indicated. An algorithm for load distribution between parallel marine diesel generator sets is given, taking into account the dependence of the specific fuel consumption on the output power and the power factor of each SDG unit.

УДК 629.5.054.03-52

## **ПРОГРАММА ПОИСКА НЕИСПРАВНОСТЕЙ СУДОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ**

Павликов Сергей Алексеевич, доцент, канд. техн. наук

Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО  
«КГТУ», Калининград, Россия, e-mail: sergeypavlikov@mail.ru

*Представлена блок-схема алгоритма, реализованного на языке бейсик, руководящая действиями персонала в процессе поиска неисправности в одной из судовых систем. Алгоритм предписывает персоналу выполнение конкретных действий, по результатам которых можно однозначно и быстро найти и устранить неисправный элемент*

На судах находит широкое применение программа ТРИМ, позволяющая осуществлять правильное и своевременное выполнение работ по эксплуатации судового оборудования, ведущая учёт и пополнение судов запчастями, и реализующая ряд других функций. Программу поиска неисправностей судового электрооборудования можно рассматривать как дополнение к программе ТРИМ, направленное на оказание помощи судовому механическому персоналу в работах по устранению неисправностей в судовых системах управления, сигнализации и защиты судовых механизмов. На ряде судов отсутствует электромеханический персонал и зачастую опыта и знаний механического персонала недостаточно для выполнения таких работ. Данная программа может использоваться не только как управляющая действием механического персонала при проведении ремонтных работ, но и как обучающая.

В данной работе представлена программа диагностирования и устранения неисправностей системы управления компрессором холодильной установки грузового трюма судов проекта 488.

Управление программой осуществляется через экранное окно монитора, изображённое на рис. 1.

В левой части экранного окна находится текстовая информация, соответствующая алгоритму поиска неисправности в системе управления компрессором. Алгоритм предписывает персоналу выполнение конкретных действий, по результатам которых можно однозначно определить последующий шаг продвижения по алгоритму вплоть до окончания диагностирования. Каждый шаг алгоритма, если он не является окончательным, заканчивается вопросом. Утвердительный ответ на вопрос фиксируется нажатием на кнопку «ДА», неутвердительный – на кнопку «НЕТ» и в зависимости от этого программа выполняет переход к тому или иному очередному шагу алгоритма. Кнопка «НАЗАД» позволяет вернуться на один шаг алгоритма.

В правой части экранного окна изображена электрическая схема компрессора, на которую опирается алгоритм диагностирования. Состояние органов управления схемы в процессе диагностирования не меняется.

На рис. 2 представлена блок-схема программы диагностирования компрессора, реализованная на языке бейсик.

Каждому блоку схемы соответствует текстовая информация, выводимая в экранное окно. Блоку 1 соответствует запись «Программа диагностирования системы управления компрессором». При нажатии на кнопку «ДА» программа переходит к блоку 2 со следующей записью, руководящей действиями персонала «Нажать кнопку отключения компрессора. Осмотреть состояние сигнальных ламп и световых табло системы управления и защиты компрессора и установить причину отказа. Неисправность в системе управления?». По результатам осмотра персонал должен ответить на этот вопрос нажатием на кнопки «ДА» или «НЕТ». Если «ДА», то осуществляется переход к блоку 3 «Перейти на дистанционное или местное управление. Проверить наличие напряжения питания и целостность предохранителей в системе управления и защиты компрессора. При необходимости пригласить специалиста с берега». В соответствии с этой записью персонал проверяет напряжение питания. Если питание есть, то неисправность в системе управления или защиты. Для устранения этой неисправности знаний механического персонала может оказаться недостаточно, поэтому нужно приглашать специалиста с берега и на этом выполнение программы заканчивается. Если «НЕТ», то неисправность в цепи главного тока и осуществляется переход к блоку 4 «Перейти на дистанционное или местное управление. Включить и через 20 секунд отключить компрессор, одновременно контролируя поведение двигателя. Электродвигатель и компрессор работают?». Если «ДА» – переход к блоку 5 «При наличии тестовых программ использовать их для локализации неисправности. При невозможности устранить неисправность на месте пригласить специалиста с берега». Если «НЕТ» – переход к блоку 6 «Двигатель гудит и не вращается?». Если «ДА» – переход к блоку 7 «Неполнофазный режим или повреждение двигателя. На кнопку включения компрессора повесить плакат НЕ ВКЛЮЧАТЬ, РАБОТАЮТ ЛЮДИ! Снять предохранители в цепи главного тока компрессора. Отсоединить кабель от электродвигателя компрессора. С помощью мультиметра измерить сопротивление обмоток двигателя. Сопротивление обмоток одинаковы?». Если «ДА» – переход к блоку 8 «Подключить кабель на место. С помощью мультиметра отыскать обрыв фазы в цепи главного тока и устранить неисправность». Если «НЕТ» – переход к блоку 9 «Электродвигатель неисправен» и КОНЕЦ.

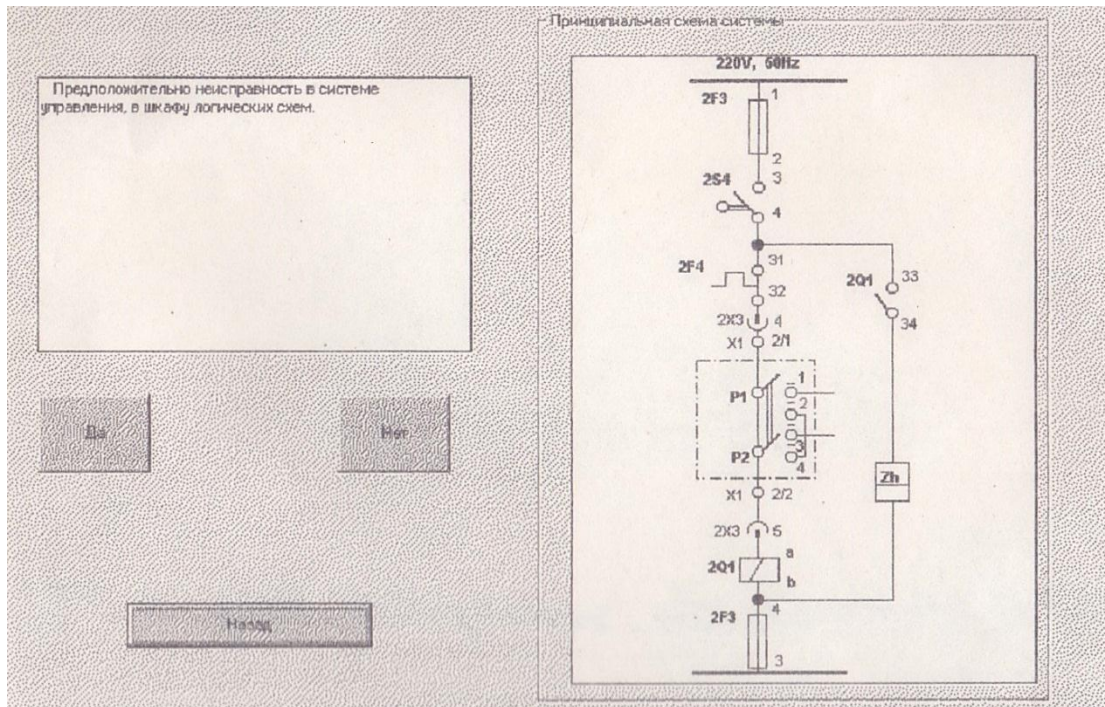


Рис. 1. Экранное окно монитора

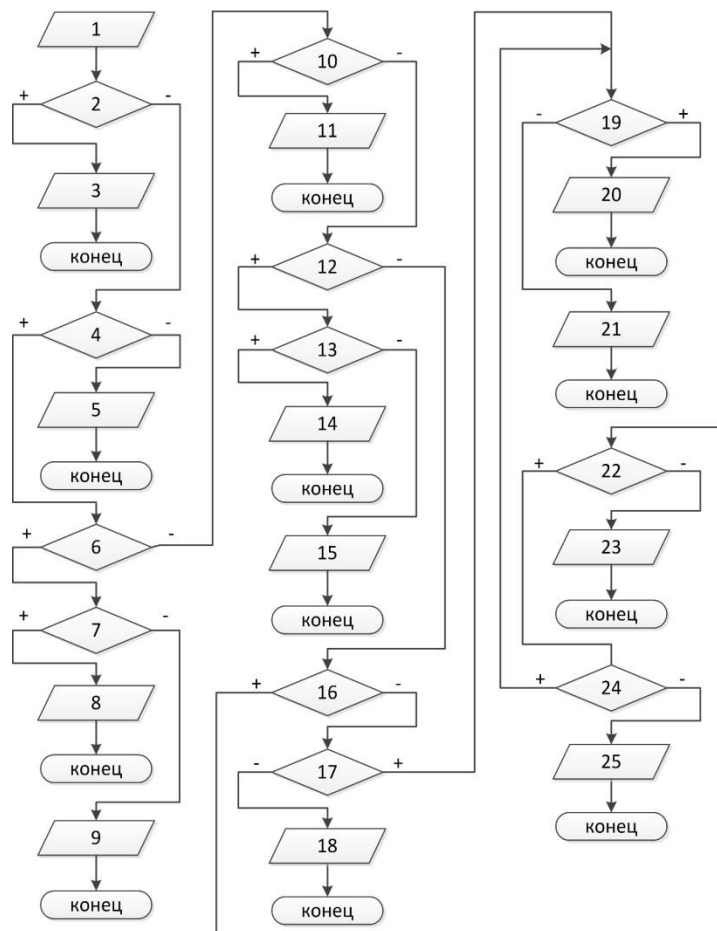


Рис. 2. Блок-схема для программы диагностирования системы управления компрессором холодильной установки грузового трюма



Если ответ на вопрос блока 6 «НЕТ», т. е. двигатель не гудит, то переход к блоку 10 «Проверить возврат теплового реле. Проверить целостность предохранителей в цепях главного тока, управления и защиты. Проверить наличие напряжения до и после указанных предохранителей и соответствие его номинальному значению. Проверить штатное положение коммутационных аппаратов в цепях главного тока, управления и защиты. Неисправность обнаружена?». Если «ДА» – переход к блоку 11 «Устранить и запустить компрессор». Если «НЕТ» – переход к блоку 12 «Подключить вольтметр к катушке магнитного пускателя электродвигателя компрессора. Включить и через 20 секунд отключить компрессор. На катушке номинальное напряжение?». Если «ДА» – переход к блоку 13 «Магнитный пускатель срабатывает?». Если «ДА» – переход к блоку 14 «Неисправность в цепи главного тока. Осмотром и замерами с использованием мультиметра отыскать неисправность в цепи главного тока. Устранить неисправность и запустить компрессор». Если «НЕТ» – переход к блоку 15 «Обрыв катушки магнитного пускателя. Заменить магнитный пускатель и запустить компрессор». Если ответ на вопрос блока 12 «НЕТ», т. е. на катушке магнитного пускателя напряжение отсутствует, то переход к блоку 16 «Неисправность в цепи управления. Подключить вольтметр к контактам, при замыкании которых подаётся напряжение на катушку МП электродвигателя компрессора. Напряжение на контактах есть?». Если «НЕТ» – переход к блоку 17 «Проверить состояние других контактов в цепи катушки МП электродвигателя компрессора следующим образом: измерить напряжение на контактах и, если оно отсутствует измерить сопротивление между контактами. Напряжение и сопротивление равны 0?». Если «НЕТ» – переход к блоку 18 «Контакт неисправен или неисправно управляющее устройство». Если контакт исправен, то для ремонта управляющего устройства пригласить специалиста с берега. Если «ДА» – переход к блоку 19 «Контакт исправен (замкнут). Снять напряжение с цепи управления двигателем компрессора и повесить плакат НЕ ВКЛЮЧАТЬ, РАБОТАЮТ ЛЮДИ! Проверить целостность проводов и сопротивление контактов в цепи катушки магнитного пускателя. Сопротивление контактов превышает 1 Ом?». Если «ДА» – механическое повреждение контакта или контактора. Если «НЕТ» – заменить провод. Если ответ на вопрос блока 16 «ДА», т. е. напряжение на контактах есть, то переход к блоку 22 «Нажать на кнопку ПУСК КОМПРЕССОРА, предварительно перейдя на местное или дистанционное управление. Показание вольтметра изменилось?». Если «НЕТ» – переход к блоку 23 «Неисправно реле или другое устройство, управляющее этим контактом, или неисправность в подсистеме пуска компрессора. Проверить выполнение условий пуска». Если «ДА» – переход к блоку 24 «Проверить состояние других контактов в цепи катушки МП следующим образом: измерить напряжение между всеми контактами и, если оно отсутствует измерить сопротивление контактов в замкнутом положении. Напряжение и сопротивление равны 0?». Если «НЕТ» – перейти к блоку 25 «Контакт неисправен или неисправно управляющее устройство». Если «ДА» – вернуться к блоку 19.

Предлагаемая программа позволяет, действуя в соответствии с алгоритмом, быстро по характерным признакам найти неисправный узел или найти и устранить неисправный элемент системы управления. При этом работы по отысканию неисправностей могут осуществляться персоналом, имеющим самые элементарные познания об электрооборудовании судна и пользовании компьютером. Разработка подобных программ для максимального количества судовых механизмов повысит качество их эксплуатации и ремонта на судах без электромеханического персонала или с электромеханическим персоналом, не имеющим достаточного опыта работы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Константинов В.Н. Системы и устройства автоматизации судовых энергетических установок. – Л.: Судостроение, 1988. – 312 с.

## **PROGRAM OF TROUBLESHOOTING OF SHIPS ELECTRIC EQUIPMENT**

Pavlikov Sergey Alekxseevich, candidate of Science, associate Professor

Baltic fishing fleet state academy FSBEI HE "KSTU", Kaliningrad, Russia,  
e-mail: sergeypavlikov@mail.ru

*A block diagram of an algorithm implemented in the BASIC language that guides the personnel in the process of troubleshooting in one of the ship systems is presented. Algorithm prescribes to the personnel the performance of specific actions, the results of which can uniquely and quickly find and fix the defective element.*

УДК 629.12.066

## **ПОРТАТИВНЫЕ ТИРИСТОРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ**

Приходько Валентин Макарович, доцент, канд. техн. наук, профессор  
Приходько Ирина Валентиновна, ст. преподаватель  
Саладин Андрей Владимирович, аспирант

ФГБОУ ВО «ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова», Санкт-Петербург, Россия,  
e-mail: prihodki-3@yandex.ru

*Представлен разработанный и внедрённый энергосберегающий способ экологически чистой токовой пожаробезопасной сушки изоляции увлажнённых обмоток электрооборудования на штатном месте установки без демонтажа и разборки посредством предложенного портативного регулируемого тиристорного преобразователя*

В отрасли морского и речного транспорта в современных условиях при монтаже, эксплуатации и ремонте электрооборудования судов, портов и гидротехнических сооружений необходимы энергосберегающие экологически чистые методы и эффективные технические средства сушки изоляции увлажнённых обмоток электрических машин автоматизированных электроприводов и электроустановок [1, 2].

В отрасли водного транспорта при судоремонте для сушки и восстановления сопротивления изоляции обмоток берегового и судового электрооборудования традиционно и широко применяются сушильные печи. Например, в электроцехе ООО «Омского судоремонтно-судостроительного завода», ОАО «Иртышского пароходства» при ремонте крупногабаритного судового электрооборудования сушка производится в сушильной печи инициативной разработки, большой массы, размеры которой 3500x2500x2000 мм, напряжение трехфазного переменного тока 220 В, частотой 50 Гц. Данная сушильная электропечь с нагревательными элементами (тэнами) имеет массивный металлический теплоизолированный корпус, внутри которого по рельсам электроприводом перемещается (вперед, назад) тележка с нагруженным высушиваемым судовым или береговым электрооборудованием. После загрузки электрооборудования судов, портов, гидросооружений в сушильную электропечь с передней стороны её автоматически закрывают дверью вертикального перемещения (вверх, вниз) с дистанционным автоматизированным электроприводом. Сушильная электропечь с наружной сто-

роны двери имеет вытяжной шкаф для охраны окружающей среды и труда в электроцехе. Для контроля за параметрами технологического процесса сушки берегового и судового мощного силового электрооборудования на пульте управления сушильной электропечи установлены амперметр на ток 100 А (типа Э8021) и вольтметр на напряжение 450 В (Э8021). Измерение температуры во внутренней области сушильной мощной печи осуществляется термоконтактным термометром типа ТКП-160Сч-УХЛ в пределах 100° – 200°С с контактными датчиками на напряжение 220 В, 50 Гц. С пульта управления предусмотрено ручное и автоматическое контактное дистанционное регулирование температуры сушки помещенного внутрь сушильной печи берегового и судового электрооборудования. Сопротивление изоляции высушиваемого электрооборудования судов, портов, гидротехнических сооружений измеряют мегаомметром после окончания сушки и выгрузки его из сушильной печи с помощью тележки, при этом отсутствует непрерывный автоматический контроль его в технологическом процессе прогрева. Недостаточно эффективная теплоизоляция приводит к нагреву массивного металлического корпуса, двери сушильной электропечи и отрицательно воздействует на окружающую среду и обслуживающий персонал.

Кроме этого, в электроцехе «Омского судоремонтно-судостроительного завода» ИРП при ремонте малых судовых электрических машин и электрооборудования небольшой мощности для их сушки в стационарных условиях также используется другая сушильная электропечь собственного изготовления значительной массы, размерами 2500x2000x1500 мм. Электропитание этой сушильной электропечи осуществляется от сети напряжением трёхфазного переменного тока 220 В, частотой 50 Гц. Все операции по загрузке и выгрузке электрических машин малых габаритов в данную сушильную печь производятся вручную, она не имеет автоматизированного электропривода и дистанционного управления, контроля, системы диагностики. Измерение температуры в технологическом процессе сушки реализовано в этой сушильной печи с помощью термоконтактного термометра ТКП-160Сч-УХЛ с пределами 100° – 200°С с контактными датчиками на напряжение 220 В, 50 Гц. В технологическом процессе сушки электрооборудования судов различного назначения металлическая тяжёлая дверь с асбестовой теплоизоляцией и без дистанционного автоматизированного электропривода существенно нагревается, излучающее тепло которой ощущается обслуживающим персоналом. Тёплая дверь, в некоторой степени теплопроводящий корпус сушильной электропечи приводят к существенному нагреву окружающего воздуха в электроцехе, несмотря на то, что вблизи двери имеется вытяжка.

Известные традиционные в судоремонте методы и технические средства сушки изоляции электрооборудования, вращающихся электрических машин наружным конвективным обогревом с помощью сушильных электропечей, электрических ламп, воздуходувок имеют существенные недостатки: большой расход электроэнергии, так как нагреваются, кроме обмоток, якоря, магнитопроводы, станины и другие элементы электрооборудования; длительность процесса прогрева; значительные трудозатраты на проведение сушки и др. Кроме того, теплоизлучение ухудшает экологическую среду в электроцехе. Для исключения отрицательного воздействия сушки на окружающую среду необходимо перейти на качественно новые, прогрессивные, «безпечные» технологические процессы прогрева изоляции электрооборудования судов, портов и гидротехнических сооружений. В частности, обработка и сушка электрической изоляции силовых трансформаторов в условиях их монтажа, обслуживания и ремонта представляет совокупность сложных технологических процессов, выполнение которых требует применения специального оборудования и приборов, значительных материально-технических и трудовых затрат. Эффективность и качество электроремонтных работ на судах, в портах и гидротехнических сооружениях во многом определяются оснащённостью специа-

лизированным оборудованием, в том числе универсальными переносными портативными преобразователями-регуляторами [3].

Для экологически чистой энергосберегающей пожаробезопасной токовой сушки и восстановления изоляции статорных обмоток вращающихся электрических машин большой мощности на штатном месте установки без демонтажа и разборки предложен переносной портативный регулируемый тиристорный преобразователь (ПРТП). Авторами разработан для обслуживающего персонала при технической эксплуатации электрооборудования судов различного назначения, портов, гидросооружений и для ремонтных служб предприятий отрасли водного транспорта новый переносный регулируемый тиристорно-диодный преобразователь ПРТП-400/220-380. Использование экологически чистого энергосберегающего ПРТП позволяет производить на судах, в портах и гидротехнических сооружениях безразборную эффективную ресурсосберегающую сушку увлажненных статорных обмоток крупногабаритных вращающихся электрических машин. Внедрение и применение ПРТП с электронным управлением способствует сохранению чистоты окружающей среды. Реализован энергосберегающий способ экологически чистой управляемой токовой сушки и восстановления изоляции отсыревших обмоток электрооборудования, электрических машин на штатном месте без демонтажа и разборки в судовых эксплуатационных условиях с помощью нового ПРТП для снижения их аварийности, интенсификации технологического процесса прогрева и повышения электропожаробезопасности на судах различного назначения [4, 5].

В заводских условиях на одном из предприятий АО «Дальневосточная распределительная сетевая компания», в филиале «Приморские центральные электрические сети» изготовлены опытные промышленные образцы ПРТП, которые прошли период длительной эксплуатации с различными климатическими воздействиями окружающей среды. Комплексные лабораторные и всесторонние производственные испытания проведены совместно с отделом изоляции филиала «Приморские центральные электрические сети». Кроме этого другой опытный образец ПРТП сделан в металле старшим электромехаником земснаряда «Днепровский-601» (проекта 1519 завода «Ленинская кузница») на Днепропетровской ремонтно-эксплуатационной базе флота (Украина) по научно-технической и конструкторской документации, предоставленной авторами. Положительные результаты испытаний и внедрения ПРТП в технологический процесс сушки твердой изоляции берегового и судового электрооборудования в различных климатических условиях свидетельствуют о его высокой надежности, экономичности и большом коэффициенте полезного действия. ПРТП обладают малыми материалоемкостью, массой и габаритами, оптимальными технико-экономическими характеристиками. Максимальные значения мощности, напряжения и тока сушки (прогрева) на выходе ПРТП ограничиваются только возможностями установленных силовых тириستоров, диодов и при необходимости могут быть увеличены [5].

Принципиальная электрическая схема экологически чистого энергосберегающего ПРТП представлена на рис. 1. ПРТП предназначен для экологически чистых пожаробезопасных прогрева, подсушки, поддержания сопротивления изоляции силового электрооборудования и сушки электрических машин способом переменного тока на штатном месте установки без демонтажа и разборки при эксплуатации и ремонте. Кроме этого, он может использоваться в мобильных электротехнических комплексах для профилактических высоковольтных испытаний, прожигания, диагностики пробоя дефектной изоляции и определения повреждения в электроэнергетических системах морских, речных портов и гидротехнических сооружений. В испытательно-прожигающей передвижной установке ПРТП осуществляет регулирование бесконтактно, плавно тока прожигания и создание высших гармонических составляющих тока, подаваемого через

высоковольтный трансформатор в повреждённую отключенную линию электропередачи, для диагностики пробоя изоляции и отыскания места скрытого дефекта.

Ввиду создания оптимальных режимов прогрева изоляции обмоток электрооборудования, гибкости её регулирования, отсутствия загрязнения окружающей среды и возможности применения ПРТП в качестве регулятора-потребителя для судовых электроприёмников, не критичных к форме напряжения (например, калориферов, тиглей), он перспективен и найдёт широкое использование в судоремонте. Выполнена разработка улучшенной технологии сушки статорных обмоток ремонтируемых асинхронных береговых и судовых электродвигателей внедрением токового оптимального нагрева их после пропитки лаками.

Техническая характеристика переносного портативного регулируемого тиристорного преобразователя:

1. Напряжение питания (переменное), В...	220 или 380.
2. Число фаз питающей сети .....	2/1.
3. Частота питающей сети, Гц.....	50.
4. Номинальный ток нагрузки, А.....	400.
5. Пределы регулирования выходного переменного напряжения от напряжения питания, % .....	5 – 95.
6. Охлаждение.....	воздушное, принудительное.
7. Режим работы.....	длительный, ПВ до 100%
8. Габаритные размеры, мм.....	440x310x210.
9. Масса, кг.....	20.

Основу ПРТП (регулятора переменного тока последовательного типа) составляют два встречно-последовательно соединенных мощных тиристора VS1, VS2, шунтированных силовыми полупроводниковыми диодами VD1, VD2, с импульсно-фазовым способом управления. В электронном устройстве управления производится сравнение пилообразного напряжения с управляющим постоянным напряжением. В момент их равенства формируется импульс для включения силового ключа преобразователя-регулятора. Выключение тиристоров ключа ПРТП происходит в результате естественной коммутации при переходе тока сушки изоляции электрооборудования судов, портов, гидросооружений через нуль.

Импульсы управления, воздействия на управляющие электроды мощных силовых тиристоров VS1, VS2, открывают последние в положительные полупериоды приложенного напряжения сети. Силовой ток за один полупериод проходит по пути VS1-VD2, а за следующий полупериод напряжения сети – VS2-VD1. При увеличении угла открытия тиристоров VS1, VS2 (уменьшении угла проводимости) выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$  уменьшается и ток сушки (прогрева) изоляции берегового и судового электрооборудования также понижается. Наоборот, при увеличении угла проводимости мощных тиристоров VS1, VS2 напряжение повышается, что приводит к росту тока прогрева (сушки) изоляции силового электрооборудования. Величина регулируемого напряжения на выходе ПРТП контролируется вольтметром PV1 на 500 В. Значение регулируемого переменного тока сушки изоляции определяется на передней панели ПРТП по амперметру PA1, включенному через трансформатор тока ТА1 с коэффициентом трансформации 400/5. Серийный вентилятор (ВВФ-112) с силовым электродвигателем М напряжением 220 В, подачей  $10 \text{ м}^3/\text{с}$  осуществляет принудительное воздушное охлаждение силовых мощных полупроводниковых приборов штыревого типа VS1, VS2, VD1, VD2. Для защиты силовых тиристоров VS1, VS2 и диодов VD1, VD2 от перенапряжений установлены RC-цепочки: C2 R13 и C3 R14. Неоновой лампой HL1 предусмотрена сигнализация о подаче напряжения на ПРТП. Резистор R12 включен последо-

вательно с сигнальной лампой HL1. Переключатель SA1 обеспечивает использование регулируемого ПРТП в промышленных или судовых (корабельных) сетях напряжением 220 В и 380 В.

Источник управляющего напряжения содержит разделительный трансформатор TV1 напряжением 380/220/42 В мощностью 30 Вт с переключателем SA1, стабилитроны VD3, VD4, транзисторы VT1-VT3, маломощный тиристор, выпрямительный мост цепи управления VD5-VD8, разделительные диоды VD9, VD10, стабилизатор сигналов управления на стабилитронах VD11, VD12, конденсатор C1, резисторы R1-R11, контрольную лампу HL2. Схема управления состоит из легко вынимающейся одной печатной платы с электронными элементами и разъемом для внешних соединений. Плата электронной системы управления может быть подключена к ПРТП через удлинитель для производства профилактических и наладочных работ.

Управление в технологическом процессе экологически чистой управляемой токовой сушки, испытаний и диагностики изоляции берегового или судового (корабельного) электрооборудования осуществляется оператором с помощью одной регулируемой ручки «Регулировка тока» на передней панели ПРТП, механически соединенной с переменным резистором R1, можно изменять время заряда конденсатора C1 и, соответственно, момент открывания тиристора VS3. Вольтметр PV1 подключен в ПРТП через однофазную мостовую схему выпрямителя, реализованного на полупроводниковых диодах VD13-VD16.

Регулирование тока и низковольтного напряжения по новому экологически чистому энергосберегающему способу пожаробезопасной управляемой токовой сушки и восстановления изоляции электрооборудования в эксплуатационных условиях на судах, в портах и гидротехнических сооружениях производится ручкой, механически связанной с переменным резистором R1. Оптимальные величины необходимого тока и пониженного напряжения технологического процесса сушки изоляции увлажненных обмоток берегового, судового, корабельного электрооборудования устанавливаются по амперметру PA1 и вольтметру PV1 ПРТП с помощью переменного резистора R1.

Управление силовыми тиристорами VS1, VS2 производится с помощью маломощного тиристора VS3, включённого последовательно с мостовым выпрямителем VD5-VD6. Управляющее электронное устройство, схема которого приведена на рис. 1, позволяет расширить диапазон регулирования до  $180^\circ$ , а включение тиристора VS3 в диагональ выпрямительного моста VD5-VD6 – регулировать напряжение через управляющие переходы силовых тиристоров VS1, VS2 (на нагрузке) в течение обоих полупериодов напряжения береговой или судовой (корабельной) сети.

С целью повышения точности и стабильности момента открывания тиристора VS3 на его управляющий электрод подается импульс напряжения с крутым фронтом. В управляющем электронном устройстве ПРТП реализована одна из разновидностей фазоимпульсного способа управления тиристором VS3 – это интегральное управление, получившее в настоящее время наибольшее распространение. Оно заключается в том, что на входе генератора импульсов производится сравнение (рис. 2) постоянного напряжения (график 1) и напряжения, изменяющегося по величине (график 2). В момент равенства этих напряжений генерируется импульс (график 3) управления тиристором VS3. Переменное по величине напряжение имеет пилообразную (как показано на рис. 2) форму.

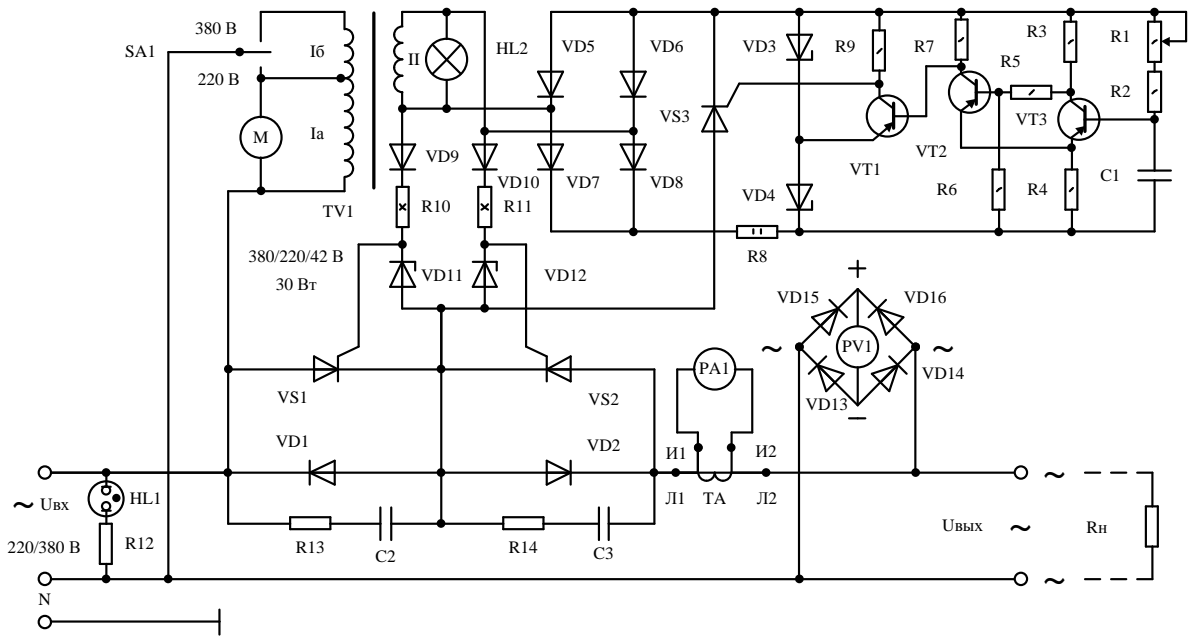


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема энергосберегающего переносного регулируемого тиристорного преобразователя

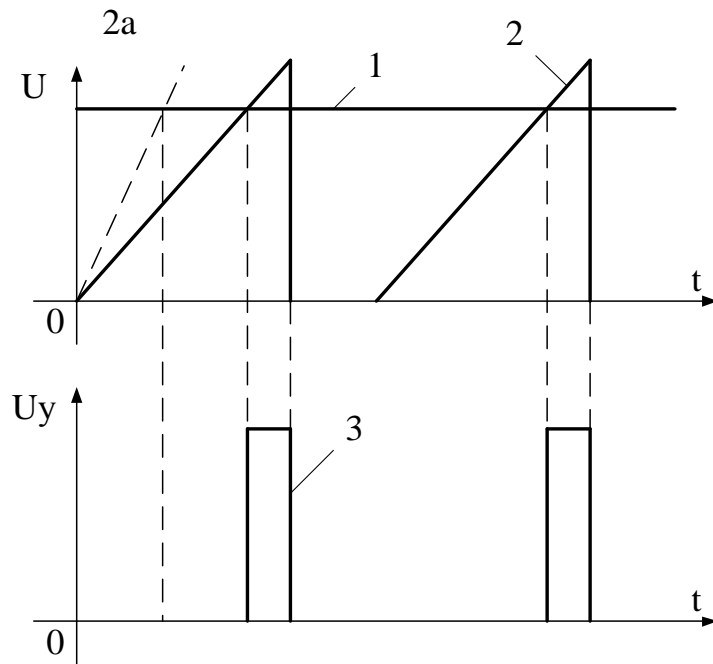


Рис. 2. График управляющего импульса при интегральном управлении переносным тиристорным преобразователем

Как видно из рис. 2, изменение момента возникновения управляющего импульса, то есть сдвиг его фазы, производится в управляющем электронном устройстве изменением скорости нарастания переменного напряжения (график 2а).

Управляющее электронное устройство (рис. 1) состоит из генератора пилообразного напряжения, триггера Шмитта (VT2, VT3) и выходного ключевого усилителя (VT1).

Под действием напряжения, снимаемого с синхронизирующей обмотки II трансформатора TV1, конденсатор C1 заряжается через резисторы R1, R2. Напряжение

на конденсаторе  $C1$  возрастает по экспоненциальной кривой, начальный участок которой с некоторым приближением можно считать прямолинейным (график 2, см. рис. 2). При этом транзистор  $VT3$  закрыт, а  $VT2$  открыт. Ток эмиттера транзистора  $VT2$  создает на резисторе  $R4$  падение напряжения, которое определяет уровень срабатывания триггера Шмитта (график 1 на рис. 2). Сумма напряжений на резисторе  $R4$  и открытом транзисторе  $VT2$  меньше, чем напряжение на стабилитроне  $VD4$ , поэтому транзистор  $VT1$  закрыт. Когда напряжение на конденсаторе  $C1$  достигает уровня срабатывания триггера Шмитта, транзистор  $VT3$  открывается, а  $VT2$  закрывается. Транзистор  $VT1$  при этом открывается и на резисторе  $R9$  появляется импульс напряжения, открывающий маломощный тиристор  $VS3$  (импульс 3 на рис. 2).

В конце каждого полупериода напряжения сети конденсатор  $C1$  разряжается практически до нуля и устройство управления возвращается в исходное состояние. Тиристор  $VS3$  закрывается в момент перехода амплитуды его анодного тока через нуль. С началом следующего полупериода цикл работы устройства повторяется. Варьируя величину сопротивления резистора  $R1$ , можно изменять ток заряда конденсатора  $C1$ , то есть скорость нарастания напряжения на нём, а значит, и момент появления открывающего тиристор  $VS3$  импульса. Заменяв резистор  $R1$  транзистором, можно автоматически регулировать напряжение на нагрузке. Таким образом, в этом электронном устройстве использован способ сдвига фазы управляющих импульсов изменением скорости нарастания переменного напряжения.

Выходной каскад на транзисторе  $VT1$  обеспечивает необходимое усилие по току. Используя в качестве нагрузки управляющие переходы силовых мощных тиристоров  $VS1$  или  $VS2$  ПРТП, в каждый полупериод приложенного напряжения  $U_{вх}$  управляем тиристорами  $VS1$ ,  $VS2$  тиристорно-диодного регулятора-преобразователя.

В рассматриваемом электронном устройстве управления к управляющему переходу тиристора  $VS3$  напряжение приложено в течение отрезка времени от момента равенства постоянного и пилообразного напряжений до окончания полупериода напряжения питающей сети  $U_{вх}$ , то есть до момента разряда конденсатора  $C1$ . При открытии тиристора  $VS3$  через стабилитроны  $VD11$ ,  $VD12$  протекает ток, создающий на этих стабилитронах падение напряжения, которое через разделительные полупроводниковые диоды  $VD9$ ,  $VD10$  и резисторы  $R10$ ,  $R11$  поочередно поступает на электроды управления мощных силовых тиристоров  $VS1$ ,  $VS2$ . Силовые мощные тиристоры ПРТП, открываясь поочередно в оба полупериода приложенного напряжения сети, проводят регулируемый в широких пределах плавно и бесконтактно переменный ток через объект сушки. ПРТП скомпонован блочно-узловым способом, что обеспечивает возможность параллельной независимой сборки, пооперационного контроля, наладки и ремонта переносного преобразователя регулятора.

Преобразователь изготовлен в виде переносного автономного устройства портативного типа на отечественных элементах энергетической электроники и выполнен в защищенном исполнении.

В отличие от аналогов ПРТП имеет малую массу, небольшие габариты, низкую стоимость, высокую надежность, прост в изготовлении и потребляет в рабочем режиме незначительную мощность. Годовой экономический эффект от использования одного экологически чистого портативного преобразователя составляет 100 тыс. руб.

Рассмотрим энергосберегающий метод экологически чистой пожаробезопасной сушки электрическим током и восстановление изоляции отсыревших обмоток асинхронных двигателей (АД) на судах без демонтажа и разборки с помощью ПРТП. Схема экологически чистой токовой сушки АД (М) с последовательно соединенными увлажненными обмотками его статора от ПРТП приведена на рис. 3.



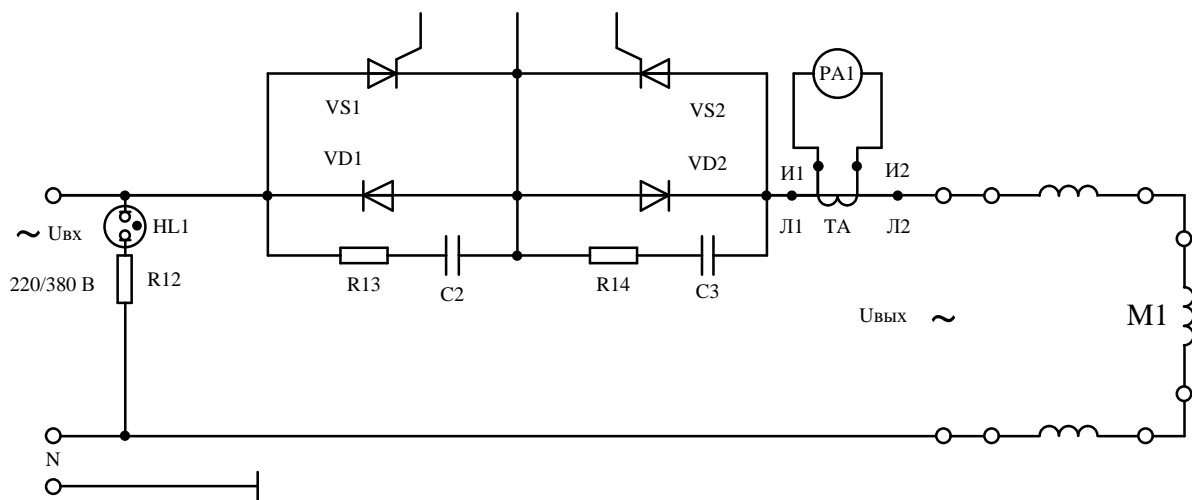


Рис. 3. Схема токовой сушки АД с последовательно соединенными обмотками статора на месте установки без демонтажа и разборки

На рис. 4 и 5 показаны схемы сушки переменным током изоляции отсыревший обмоток статора АД (М), соединенных звездой и треугольником. Энергосберегающий способ экологически чистой управляемой токовой сушки увлажнённых обмоток применяется для АД в эксплуатационных условиях на судах различного назначения, сопротивление изоляции обмоток которого стало ниже допустимого по Правилам Морского регистра судоходства РФ и Правилам Российского речного регистра значения.

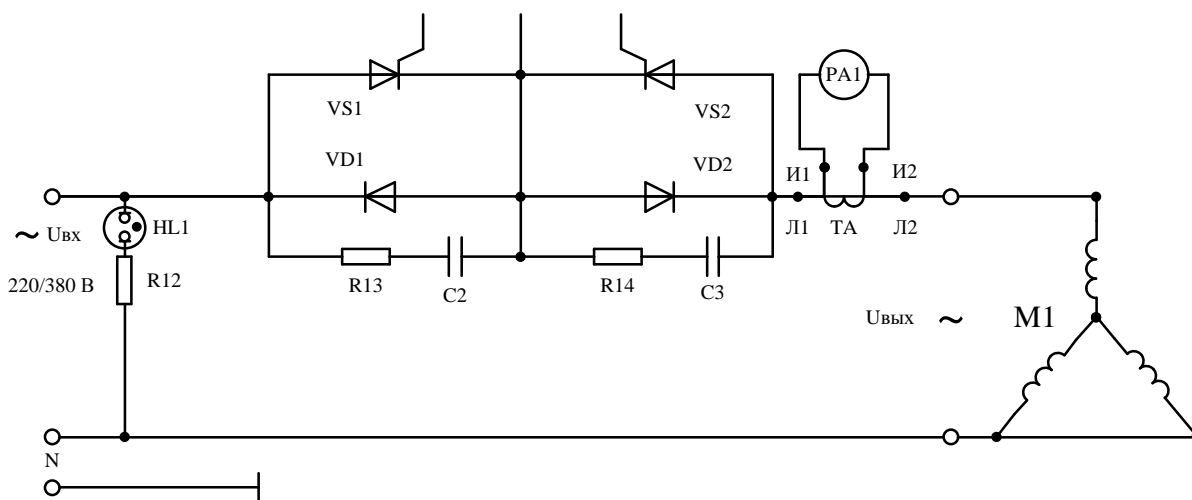


Рис. 4. Схема пожаробезопасной сушки переменным током изоляции обмоток статора АД, соединенных звездой

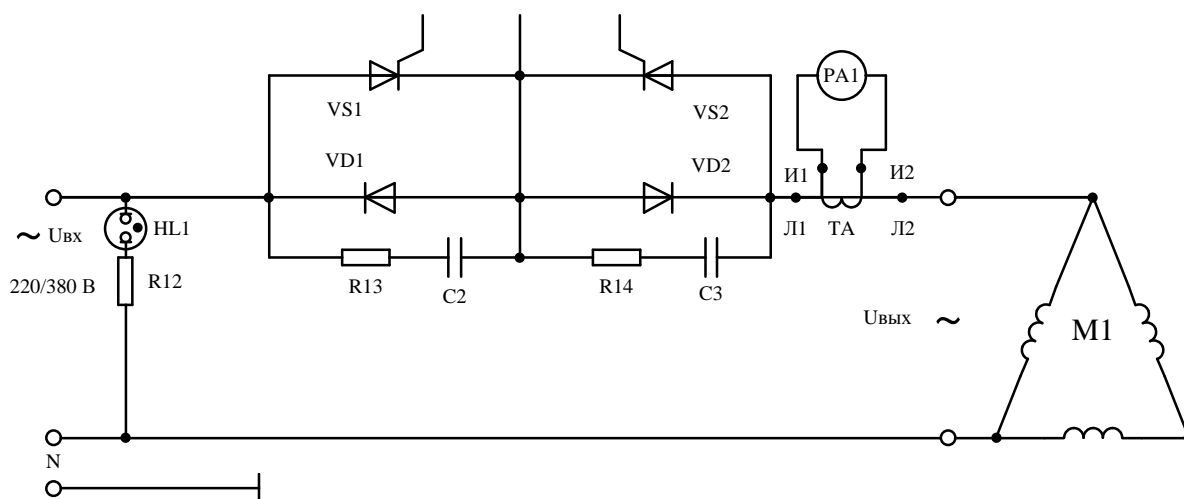


Рис. 5. Схема токовой сушки изоляции обмоток статора АД, соединенных треугольником, по энергосберегающему способу

Мегаомметром измеряют сопротивление изоляции каждой из увлажненных обмоток АД (М) и, если оно равно или более 0,1 МОм, то можно подавать в обмотки пониженное напряжение переменного тока с помощью ПРТП. Для обеспечения выхода влаги при нагреве по методу переменного тока, подаваемого непосредственно в отсыревшие обмотки неподвижного АД с помощью ПРТП, у электродвигателя закрытого исполнения снимают один из подшипниковых щитов.

Если выведены и доступны шесть концов обмоток статора, то все увлажненные обмотки соединяют последовательно (см. рис. 3) и подают к ним от ПРТП такое напряжение, чтобы в начальный период сушки (примерно два часа) ток прогрева в обмотках электродвигателя (М) не превышал  $0,3 I_{нф}$  номинального фазного значения. В процессе прогрева через два часа можно увеличить ток сушки до  $(0,5 - 0,6) I_{нф}$ , причём большие значения устанавливаются для АД меньшей мощности. Напряжение сушки при выходе ПРТП при последовательном включении всех отсыревших обмоток и токе  $0,6 I_{нф}$  равно  $(0,35 - 0,45) U_{нф}$  номинального фазного значения высушиваемого электродвигателя. Большие значения принимаются для АД малой мощности 10 кВт. По энергосберегающему способу можно проводить пожаробезопасную сушку и при меньших значениях тока прогрева, но в этом случае возрастает длительность технологического процесса [5].

В случае если выведены и доступны только три конца увлажненных обмоток АД (М), то будут два варианта подключения источника переменного тока ПРТП: рис. 4 – соединение статорных обмоток звездой и рис. 5 – соединение обмоток статора треугольником. Для рис. 4 – с соединением статорных обмоток звездой предельное значение тока сушки по амперметру допускается  $(0,85 - 0,95) I_{нф}$  от номинального фазного значения высушиваемого АД (М), а для схемы соединения обмоток рис. 5 – с соединением обмоток статора треугольником  $(1,1 - 1,2) I_{нф}$  от номинального фазного значения. Напряжение на выходе ПРТП для рис. 4 – с соединением обмоток звездой и рис. 5 – с соединением обмоток треугольником, находится соответственно в пределах  $(0,3 - 0,35)$  и  $(0,2 - 0,25) U_{нф}$  от номинального фазного значения напряжения высушиваемого электродвигателя. Большие значения напряжения сушки берутся для АД (М) малой мощности. Для практической реализации энергосберегающего способа экологической чистой пожаробезопасной управляемой токовой сушки твердой изоляции увлажненных обмоток АД на судах, в портах и на гидросооружениях на месте установки без демонтажа и

разборки с помощью ПРТП целесообразно использовать рассмотренные схемы его включения (см. рис. 3 – 5).

Во время технологического прогрева температура обмоток статора АД (М) и сопротивление изоляции в начале токовой сушки измеряют через каждые 30 минут, а по достижении установившейся температуры через час (для крупных электрических машин допускается измерять через два часа). Заканчивают технологический процесс экологически чистой пожаробезопасной управляемой токовой сушки не менее, чем через два часа после установления почти постоянным сопротивлением изоляции статорных обмоток и когда это значение превышает величины, указанные в Морском регистре судоходства РФ и Российском речном регистре.

Параметры силовых мощных тиристоров VS1, VS2 и диодов VD1, VD2 ПРТП обеспечивают реализацию на практике энергосберегающего метода экологически чистой пожаробезопасной управляемой токовой сушки твёрдой изоляции отсыревших обмоток нескольких одновременно параллельно включенных маломощных АД (M1 – Mn) на штатном месте установки без демонтажа и разборки с соединением их обмоток статора последовательно (рис. 6), звездой (рис. 7) и треугольником (рис. 8).

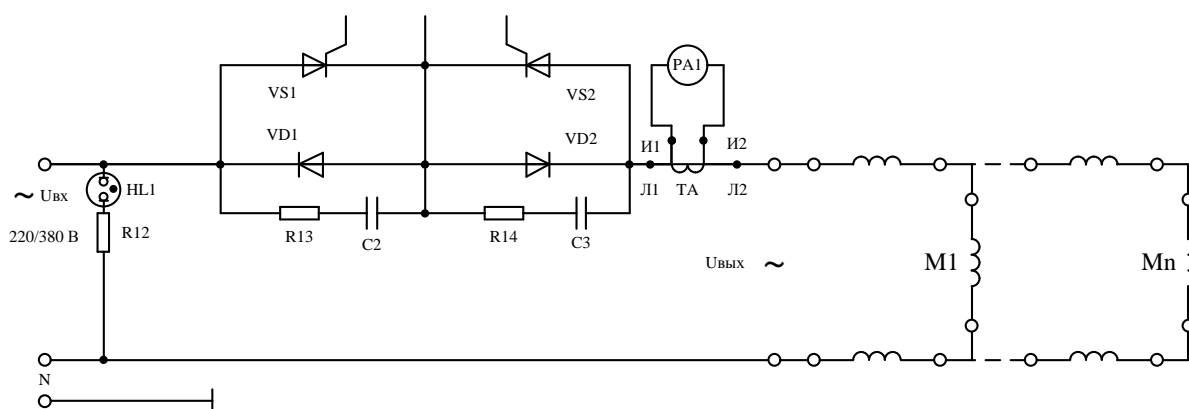


Рис. 6. Схема токовой сушки твёрдой изоляции нескольких параллельно включённых маломощных АД с соединением их обмоток статора последовательно

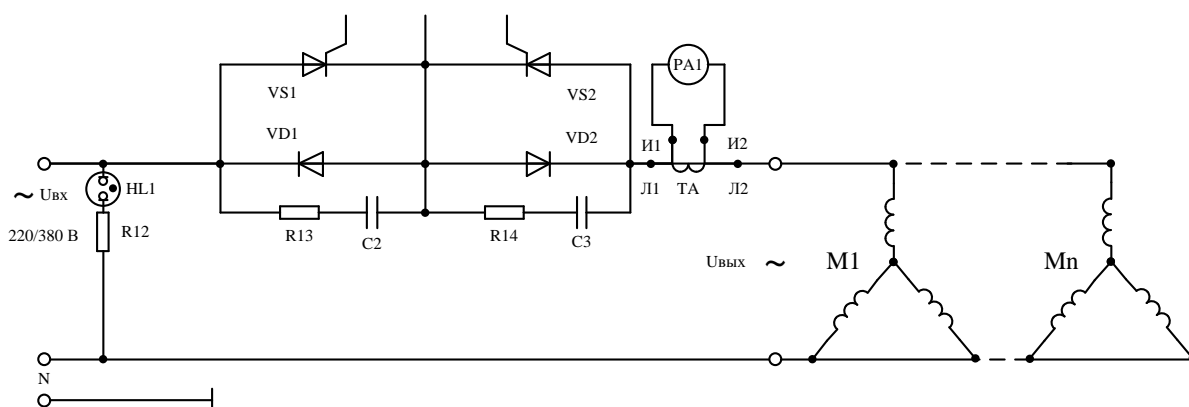


Рис. 7. Схема сушки несколько параллельно включённых маломощных АД с соединением их обмоток звездой

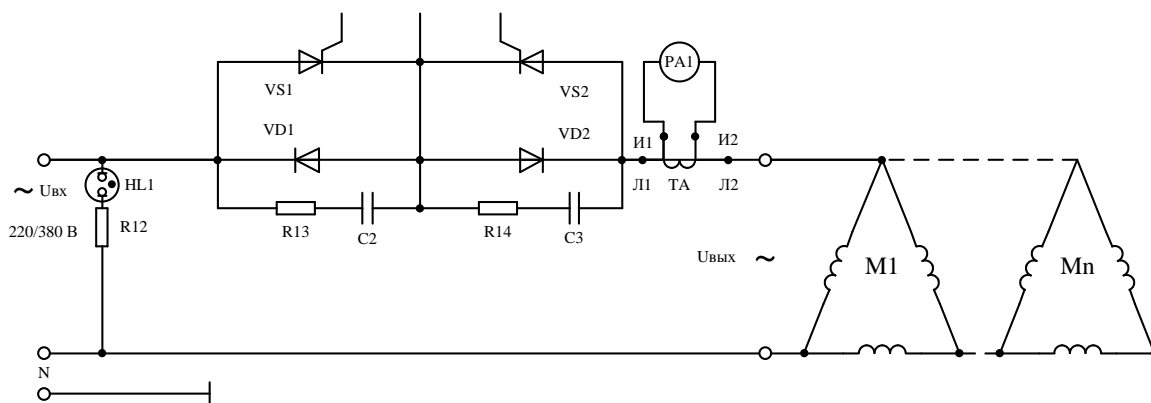


Рис. 8. Схема сушки несколько параллельно включённых маломощных АД с соединением их обмоток треугольником

Переносный регулируемый тиристорно-диодный преобразователь с электронной схемой управления исключает пожары, взрывы на судах, в портах, на гидросооружениях, не оказывает отрицательное влияние на обслуживающий персонал, экипажи судов, исключает загрязнение окружающей среды и соответствует современным экологическим требованиям по техническому оснащению технологического процесса сушки берегового, судового, корабельного электрооборудования [6, 7]. Портативный переносный регулируемый тиристорный преобразователь может применяться в различных отраслях промышленности, на судостроительно-судоремонтных предприятиях, морском и речном транспорте, а также в электротехнических комплексах «берег-судно» и «берег-док» [8].

Способ управляемой токовой сушки увлажнённых обмоток судовых асинхронных двигателей различной мощности на штатном месте установки без разборки и демонтажа с судов внедрён и прошёл всесторонние эффективные испытания, обеспечивая существенное энергосбережение (более 60%), в ООО «Невский судостроительно-судоремонтный завод», ООО «Форпик Стандарт Сервис», на ремонтно-эксплуатационной базе речного флота в ПАО «Северо-Западное пароходство».

Разработанные портативные тиристорные преобразователи внедрены и широко используются в учебном процессе кафедры «Судовые автоматизированные электроэнергетические системы» ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова» для специальности 26.05.07 «Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики» по следующим дисциплинам: «Судовая электроника и силовая преобразовательная техника», «Основы технической эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматизации», «Эксплуатация электрооборудования и автоматики судов», лабораторные работы по которым проводятся под руководством профессора В. М. Приходько.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приходько В. М. Проектирование судовых электроприводов переменного тока с преобразователями частоты / В. М. Приходько. – СПб.: ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2013. – 94 с.
2. Приходько В. М. Способы восстановления сопротивления изоляции судового электрооборудования / В. М. Приходько. – СПб.: СПГУВК, 2012. – 262 с.
3. Приходько В. М. Интенсификация комплексных испытаний судового электрооборудования по энергосберегающей технологии в судостроении и судоремонте: научная монография / В. М. Приходько. – СПб.: СПГУВК, 2013. – 244 с.

4. Приходько В.М. Методы и технические средства комплексных испытаний элементов судовых электроэнергетических систем в судостроении и судоремонте: научная монография / В.М. Приходько. – СПб.: ИПЦ СПГУВК, 2005. – 348 с.

5. Приходько В.М. Устройство на симисторах для сушки изоляции асинхронных двигателей / В.М. Приходько, И. В. Приходько // Силовая электроника. – 2017. – №3. – С. 68 – 71.

6. Приходько В.М. Математическая модель судовых асинхронных двигателей при сушке изоляционных систем по энергосберегающей технологии / В.М. Приходько, И. В. Приходько // Морской вестник. – 2015. – №2. – С. 67 – 69.

7. Приходько В.М. Математическое обеспечение для оптимальной сушки изоляции электрооборудования судов по энергосберегающей технологии / В.М. Приходько, И.В. Приходько // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. – 2016. – №42/43. – С. 121 – 125.

8. Приходько В.М. Повышение электропожаробезопасности при электроснабжении судов от береговых сетей / В.М. Приходько. – СПб.: СПГУВК, 2009. – 218 с.

### **PORTABLE THYRISTOR**

Prikhodko Valentin Makarovich, Cand. Techn. Sciences, associate Professor, Professor  
Prikhodko Irina Valentinovna, senior teacher  
Saladin Andrey Vladimirovich, postgraduate student

FSFEI HPE “Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping”,  
Saint-Petersburg, Russia, e-mail: prihodki-3@yandex.ru

*The developed and introduced energy-saving method of environmentally friendly waste fire-safe drying of the insulation of moistened windings of electrical equipment at the regular installation site without dismantling and disassembling by means of the proposed portable controlled thyristor Converter is presented.*

УДК 629.12.066

### **СРАВНЕНИЕ СПОСОБОВ АНАЛИТИЧЕСКОГО И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ СУШКИ СУДОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

Приходько Валентин Макарович, профессор, канд. техн. наук  
Приходько Ирина Валентиновна, ст. преподаватель  
Саладин Андрей Владимирович, аспирант

ФГБОУ ВО «ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова», Санкт-Петербург, Россия,  
e-mail: prihodki-3@yandex.ru

*Выявлено, что в отрасли водного транспорта нагрев, прогрев, подсушка и сушка изоляции трансформаторов относится к сложному и трудоемкому технологическому процессу, требующему существенных затрат времени и электроэнергии. Проведен обзор традиционных способов теоретического и экспериментального определения*

параметров нулевой последовательности при сушке трансформаторов и дана их оценка

В отрасли водного транспорта актуально исследование нового энергосберегающего способа контрольного прогрева, подсушки и сушки трехфазных силовых трансформаторов токами нулевой последовательности, по разработке методических рекомендаций для его использования на практике при эксплуатации на судах, гидросооружениях, в портах, электротехнических комплексах «берег-судно и «берег-док» [1 - 3].

Для расчета режимов прогрева и сушки по схеме тока нулевой последовательности (ТНП) используются параметры нулевой последовательности (ПНП) трансформаторов со схемой соединения обмоток «звезда-звезда с нулем». Под ПНП понимаются полное, индуктивное и активное сопротивление нулевой последовательности  $Z_0$ ,  $X_0$ ,  $R_0$ . ПНП необходимо также знать для расчета и исследования несимметричных режимов работы трансформаторов со схемой «звезда-звезда с нулем», поэтому в специальной литературе уделяется много внимания определению этих величин.

Многие авторы пренебрегают активным сопротивлением  $R_0$ , считая, что оно мало в сравнении с индуктивным  $X_0$   $R_0 \ll X_0$ . Такое мнение ошибочно, поскольку значение  $R_0$  соизмеримо с  $X_0$ . Индуктивное сопротивление  $X_0$  трансформатора без бака уменьшается, с чем также нельзя согласиться. Рассмотрим наиболее известные способы аналитического определения ПНП трансформаторов со схемой «звезда-звезда с нулем».

Большинство авторов занимались расчетом индуктивного сопротивления  $X_0$ . Аналитическому определению  $R_0$  уделялось гораздо меньше внимания при использовании схем рис. 1.

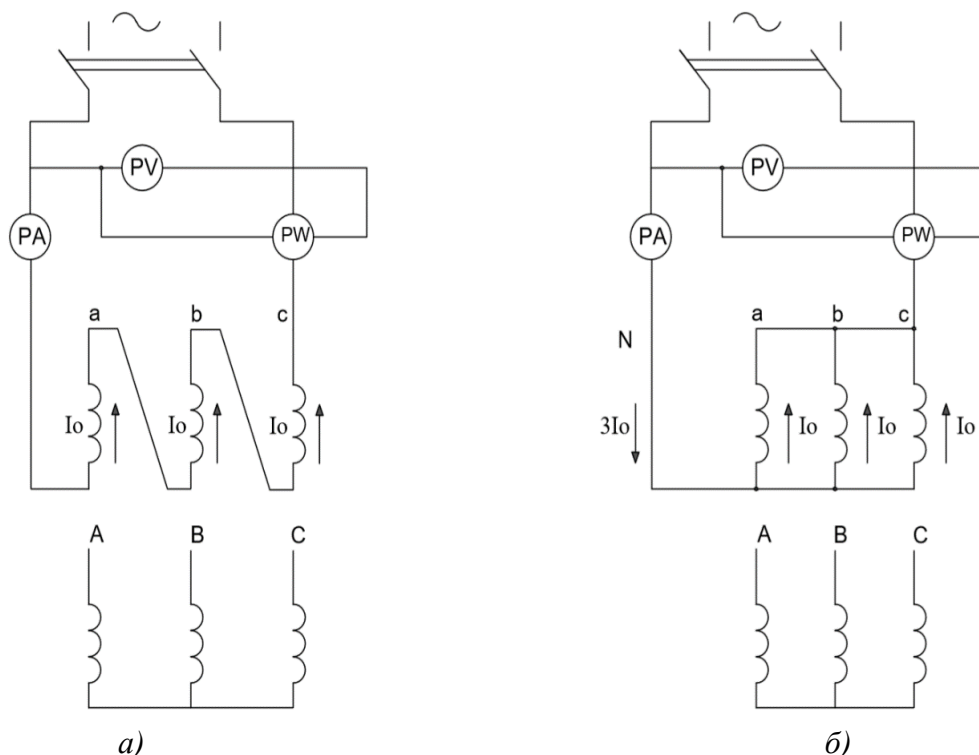


Рис. 1. Схемы нагрева мощных силовых трехфазных трансформаторов токами нулевой последовательности

Для расчета  $X_0$  используются формулы, предложенные Г.Н. Петровым, Ю.Л. Крупенью, Б.Б. Гельпериным, А.А. Пястоловым.

Значения  $X_0$ , рассчитанные по формуле Ю.Л. Крупень, получаются несколько большими, чем рассчитанные по формуле Г.Н. Петрова.

Наиболее близкими к действительным получаются значения  $X_0$ , определяемые по формуле Б.Б. Гельперина. При расчете  $X_0$  реальные обмотки трансформатора заменяются шиной бесконечной длины. Шина находится в тоннеле с двумя граничными поверхностями. Первая поверхность соприкасается с воздухом, имеющим магнитную проницаемость  $\mu = \text{const}$  и удельное объемное сопротивление  $\rho = 0$ . Вторая поверхность шины соприкасается с ферромагнитным телом с показателями среды  $\mu = \infty$ ,  $\rho = \infty$ .

В известной нам зарубежной литературе также приводятся аналитические выражения для расчета  $X_0$ . В этих формулах не учитывается влияние конструктивных размеров трансформатора на  $X_0$ , поэтому, как отмечают сами авторы, при расчетах получаются весьма приближенные результаты.

Для экспериментального определения ПНП существуют различные способы. Согласно ГОСТ 3484-77 ПНП измеряются между соединениями вместе с линейными зажимами обмотки, соединенной по схеме «звезда с нулем», и выведенным зажимом нейтрали, как это показано на рис. 1б. измеренное сопротивление выражается в Ом и приводится к одной фазе:

$$z_0 = 3 \frac{U}{I}, \quad (1)$$

где  $U$  – напряжение, подведенное к трансформатору, В;

$I$  – измеренный ток, А.

При измерениях значения тока  $I$  не должно превышать расчетного тока нейтрали, т.е.  $I \leq 0,25 I_{\text{ном}}$ .

При определении ПНП для расчета режимов прогрева и сушки по схеме ТНП нельзя согласиться с этим требованием ГОСТа, поскольку ПНП зависят от тока  $I_0$  и тока в нейтральном проводе, который при прогреве и сушке заметно больше, чем  $0,25 I_{\text{ном}}$ .

В различной научно - технической литературе для измерения ПНП приводится схема, изображенная на рис. 1а. По показаниям приборов, включенных в схему, рассчитываются полное, активное и индуктивное сопротивление нулевой последовательности

$$Z_0 = \frac{U}{3I}, \quad R_0 = \frac{P}{3I^2}, \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} \quad (2)$$

где  $U$ ,  $I$ ,  $P$  – показания приборов на рис. 1.

Сопротивления взаимной индукции нулевой последовательности определяются по формулам:

$$X_{00} \approx X_0 - X_k 0,5; \quad R_{00} \approx R_0 - 0,5R_k. \quad (3)$$

Оценивая способ измерения ПНП по схемам на рис.1, можно отметить следующие недостатки:

– при измерениях по схеме на рис. 1а возникает необходимость в изменении схемы соединения обмоток испытуемого трансформатора, что повышает трудоёмкость измерений;

– при измерениях по схеме на рис. 1б в нейтральном проводе протекает ток в 3 раза больший, чем в отдельных фазах, поэтому здесь нужен источник регулируемых однофазных напряжений, рассчитанный на большой ток.

## Выводы:

1. Обзор способов прогрева и сушки мощных силовых трехфазных трансформаторов в их собственных баках показал, что наиболее рациональным и оптимальным из них является прогрев и сушка по схеме тока нулевой последовательности (ТНП).

2. Нагрев по схеме ТНП происходит с неудовлетворительным балансом мощности, подводимой из судовой или береговой сети к мощному трансформатору, что приводит к увеличению времени нагрева и сушки, повышенному расходу электроэнергии.

3. При нагреве ТНП мощных силовых трехфазных трансформаторов со схемой соединения «звезда-звезда с нулем», широко используемых в береговых сетях морских и речных портов и гидросооружений, нужен источник однофазного регулируемого напряжения, рассчитанный на большой ток. Для уменьшения тока, потребляемого от источника питания, возникает необходимость в изменении схемы соединения нагреваемого трансформатора, а также в разработке универсального тиристорного преобразователя.

4. Существующие методики аналитического и экспериментального определения ПНП не учитывают зависимости  $R_0$  и  $X_0$  от тока нулевой последовательности.

5. Анализ нагрева по схеме тока нулевой последовательности (ТНП) показал необходимость разработки и практического применения нового более энергосберегающего экономичного способа. Новый энергосберегающий способ должен сохранить все достоинства нагрева ТНП и вместе с этим должен не иметь таких недостатков, как низкий уровень потерь мощности в обмотках, как необходимость пересоединения обмоток трансформатора. Применение нового способа не должно вызывать затруднений при прогреве и сушке трансформаторов со схемой соединения «звезда-звезда с нулем».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приходько В.М. Способы восстановления сопротивления изоляции судового электрооборудования: учебное пособие / В.М. Приходько. – СПб.: СПГУВК, 2012. – 262 с.

2. Приходько В.М. Повышение электропожаробезопасности при электроснабжении судов от береговых сетей: учебное пособие / В.М. Приходько. – СПб.: СПГУВК, 2009. – 218 с.

3. Приходько В.М. Резонансные явления в электроэнергетических системах с полупроводниковыми преобразователями при питании судов с берега / В.М. Приходько, М.Л. Ивлев, И.В. Приходько // Журнал университета водных коммуникаций. – СПб.: ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2013. – Вып. III (XIX). – С. 28-34.

## COMPARISON OF ANALYTICAL AND EXPERIMENTAL DETERMINATION OF PARAMETERS OF ZERO SEQUENCE IN THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF DRYING OF SHIP TRANSFORMERS

Prikhodko Valentin Makarovich, Cand. Techn. Sciences, associate Professor, Professor  
Prikhodko Irina Valentinovna, senior teacher  
Saladin Andrey Vladimirovich, postgraduate student

FSFEI HPE “Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping”,  
Saint-Petersburg, Russia, e-mail: prihodki-3@yandex.ru



*It is revealed that in the water transport industry heating, heating, drying and drying of transformer insulation refers to a complex and time-consuming process that requires significant time and energy. The review of traditional methods of theoretical and experimental determination of zero sequence parameters during drying of transformers is carried out and their estimation is given.*

УДК 621-313

## **ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА СУДАХ РЫБОПРОМЫСЛОВОГО ФЛОТА**

Шабалин Леонид Дмитриевич, доцент, канд. техн. наук  
Чушанков Дмитрий Юрьевич, инженер

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,  
Калининград, Россия, e-mail: shabalin@klgtu.ru

*Рассматриваются принцип построения, преимущества и недостатки судовой электроэнергетической сети постоянного тока на силовых полупроводниковых преобразователях с целью оценки применения данной системы при проектировании и строительстве новых судов рыбопромыслового флота различного типа*

Рыбопромысловые суда служат для добычи, переработки и транспортировки различных видов морской фауны. По назначению промысловые суда подразделяются на: добывающие, добывающе-перерабатывающие, перерабатывающие и обслуживающие. Общий тоннаж мирового рыболовного флота составляет около 10 процентов всего мирового тоннажа судов. Характеристики и особенности промысловых судов разного назначения определяются формой организации промысла.

С середины двадцатого века на большинстве судов рыбопромыслового флота используется сеть переменного тока с напряжением 380В и частотой 50 Гц генерируемая несколькими дизель-генераторами и в некоторых случаях валогенераторами для питания всех потребителей электроэнергии на судне. Важно отметить, что траулеры, наиболее распространённые промысловые суда, нередко конструируются с использованием валогенераторов постоянного тока вследствие применения тралового комплекса на электроприводах постоянного тока [1]. На рисунке 1 изображена типичная схема судовой электростанции среднего рыбного траулера.

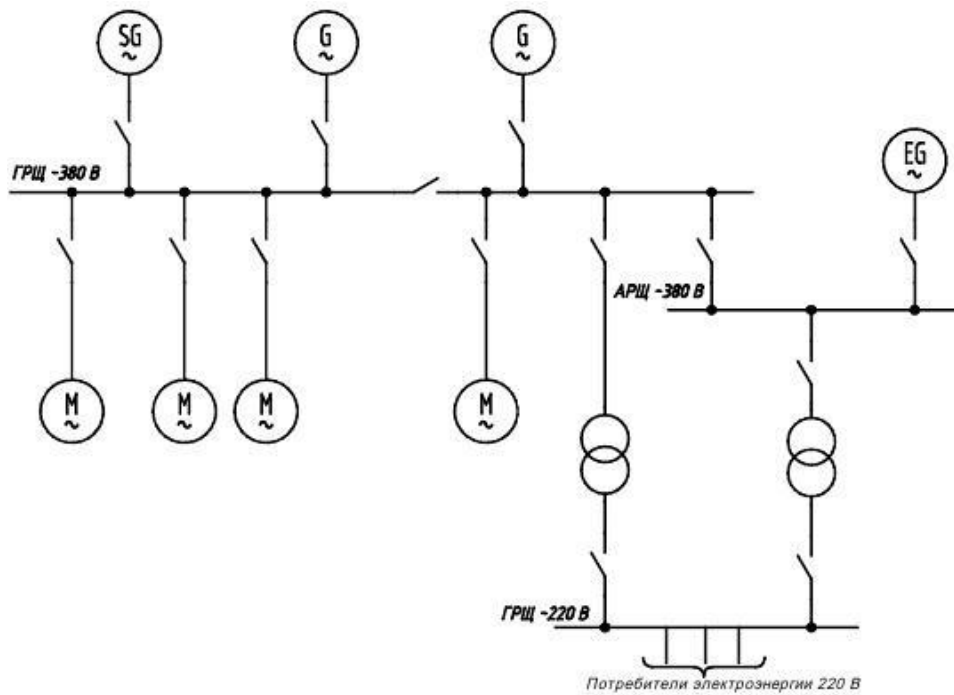


Рис. 1. Схема судовой электроэнергетической системы переменного тока

Сеть переменного тока хорошо зарекомендовала себя за десятилетия эксплуатации на судах рыбопромыслового флота, но имеет ряд существенных недостатков.

Во-первых, при синхронизации генераторов процесс введения на параллельную работу дизель-генераторов является относительно сложной операцией требующей при ручной синхронизации высококвалифицированного персонала, а при автоматической синхронизации специализированного оборудования. В случае ошибки или неисправности возможны тяжелые последствия для судна и экипажа, например, отключение электросети судна. Стоит отметить невозможность длительной работы валогенератора и судовых дизель-генераторов в связи с изменениями частоты вращения вала главного двигателя при наличии сильного волнения на море. Мощный валогенератор в зависимости от положения винта судна в воде будет иметь неприемлемые для дизель-генераторов изменения частоты сети, которые приводят к аварийному отключению сети по обратной мощности.

Во-вторых, судовая сеть переменного тока всегда имеет реактивную мощность (в основном индуктивного характера), так как основные потребители электроэнергии на судне это асинхронные электродвигатели, что приводит к потерям мощностей в сети и перепадам напряжения, что требует установки компенсаторов реактивной мощности или увеличения габаритной мощности генераторов, сечения кабелей, мощности силовых трансформаторов при проектировании.

В-третьих, наличие высших гармоник в напряжении судовой сети переменного тока, которое негативно сказывается на работе, как источников, так и потребителей электроэнергии. Высшие гармоники в электрических машинах приводят к дополнительным потерям, что ведет к повышению общей температуры и местным нагревам, а также к повышенной вибрации. В кабельных линиях высшие гармоники приводят к ускорению процесса старения изоляции и дополнительным потерям в линиях. Под действием высших гармоник может быть нарушена нормальная работа систем защиты и автоматики, возникают ложные срабатывания, сбои в работе систем

синхронизации и автоматического распределения нагрузок при параллельной работе генераторов и т. д.

В-четвертых, сети переменного тока необходимы силовые трансформаторы для повышения или понижения напряжения сети для различных потребителей, которые занимают много места и приводят к дополнительным потерям.

Также стоит отметить, что в настоящее время имеются квоты на строительство около 110 рыбопромысловых судов различного типа по всей России (около 30 в Северо-Западном регионе в основном средние траулера и ярусоловы) согласно поручению Президента РФ по итогам Госсовета 19.10.2015: «Разработать и утвердить сводный план размещения заказов на строительство судов рыбопромыслового флота на российских верфях». Это открывает возможности для проектирования судов с использованием современных и более эффективных технологий.

С учетом выше перечисленного представляет интерес новая архитектура судовой электроэнергетической сети на постоянном токе (рис. 2). Этот вариант судовой электроэнергетической системы строится с использованием мощных полупроводниковых преобразователей (IGBT, IGCT, MOSFET и т.д.), т.е. выпрямителей на стороне генераторов и инверторов для всех судовых потребителей, в то время как передача электроэнергии по судну осуществляется на постоянном токе.

В данной статье оценивается перспективность использования судовой электроэнергетической сети постоянного тока для судов рыбопромыслового флота. Такая система уже находит широкое применение для судов оффшорного и военного флотов, особенно для судов с наличием мощных потребителей с повторно-кратковременным режимом работы (например, электродвижение – azipod или орудийные системы). В нашем случае интересно применение сети постоянного тока, исходя из работы промышленного оборудования, для которого обычно используют электроприводы переменного тока с различными способами регулирования частоты вращения [2].

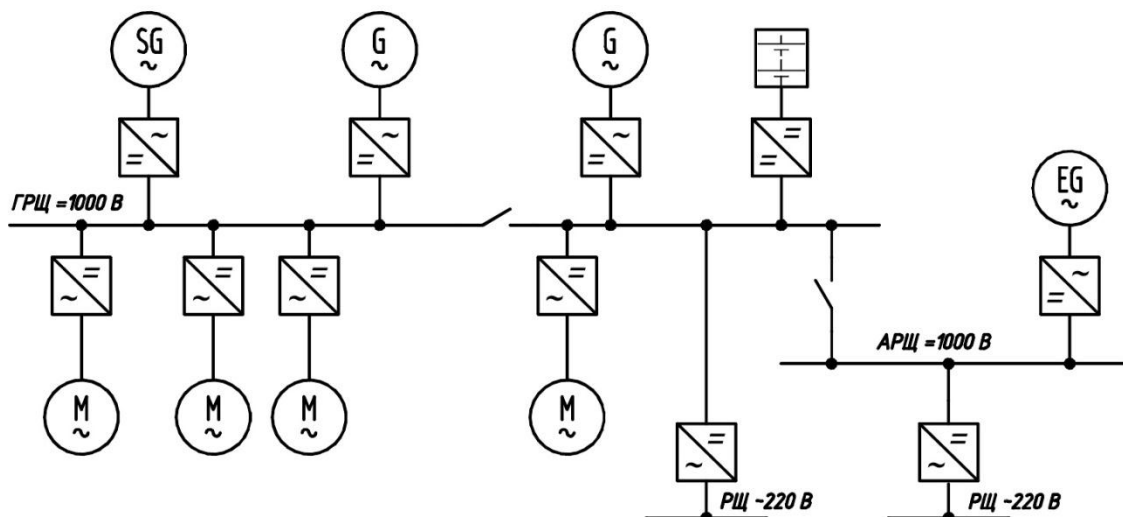


Рис. 2. Схема судовой электроэнергетической системы постоянного тока

На рисунке 2 изображена схема судовой электростанции среднего рыбного траулера с применением сети постоянного тока на полупроводниковых преобразователях. Видно, что электроэнергия от синхронных генераторов поступает шину (ГРЦ) постоянного тока через электронные преобразователи, которые конвертируют переменный ток в постоянный и регулируют напряжение сети.

Потребители получают электроэнергию через инвертор, преобразуя постоянный ток в переменный с необходимыми параметрами. В настоящее время в основе электронных преобразователей используют технологию биполярных или полевых транзисторов с изолированным затвором (IGBT, IGCT или MOSFET – транзисторы соответственно), которые способны работать на высоких значениях выходной мощности до 30 МВт.

В судовой электроэнергетической системе переменного тока выпрямительинверторы используются для изменения скорости вращения электродвигателей в широких пределах и применяются, как единые локальные устройства для преобразования частоты тока со вставкой постоянного тока между ними и мощным конденсатором. В сети постоянного тока для изменения скорости вращения привода необходим только инвертер, а выпрямители и конденсаторы устанавливаются после синхронных генераторов. Это приводит к экономии занимаемого места оборудованием и отсутствию нежелательного влияния элементов сети друг от друга (скачки тока, провалы напряжения и т.д.).

Для инверторов на стороне сети переменного тока, если потребитель требует высокое качество параметров сети (например, системы автоматизации, освещения и т.д.), применяются пассивные LC- или LCL-фильтры [2]. А для сети постоянного тока потребители электроэнергии на судне могут обходиться без улучшения качества напряжения, что значительно снижает затраты.

Сеть постоянного тока на рисунке 2 имеет автоматические выключатели, установленные между секциями сети, которые включены при нормальной работе системы. В случае короткого замыкания в одной части цепи автоматический выключатель отключится и изолирует остальную систему от поврежденного участка, при этом электронные преобразователи служат еще и изолятором для генераторов и потребителей от скачков тока и напряжения, как на стороне постоянного, так и переменного тока. Судовая сеть постоянного тока не нуждается в силовых трансформаторах, т.к. инверторы на выходе могут преобразовывать напряжение и частоту в любые требуемые значения.

Рассмотрим преимущества и недостатки судовой электроэнергетической системы постоянного тока. Одним из главных преимуществ этих систем является низкое потребление топлива судовыми дизель-генераторами. Судовая электроэнергетическая система постоянного тока позволяет каждому дизель-генератору работать на различных скоростях для достижения наилучшего расхода топлива при различных режимах нагрузки на сеть, из-за отсутствия ограничений по синхронной работе генераторов. По экспериментальным данным фирмы АВВ (рис. 3) экономия топлива должна достигать 20% [2].

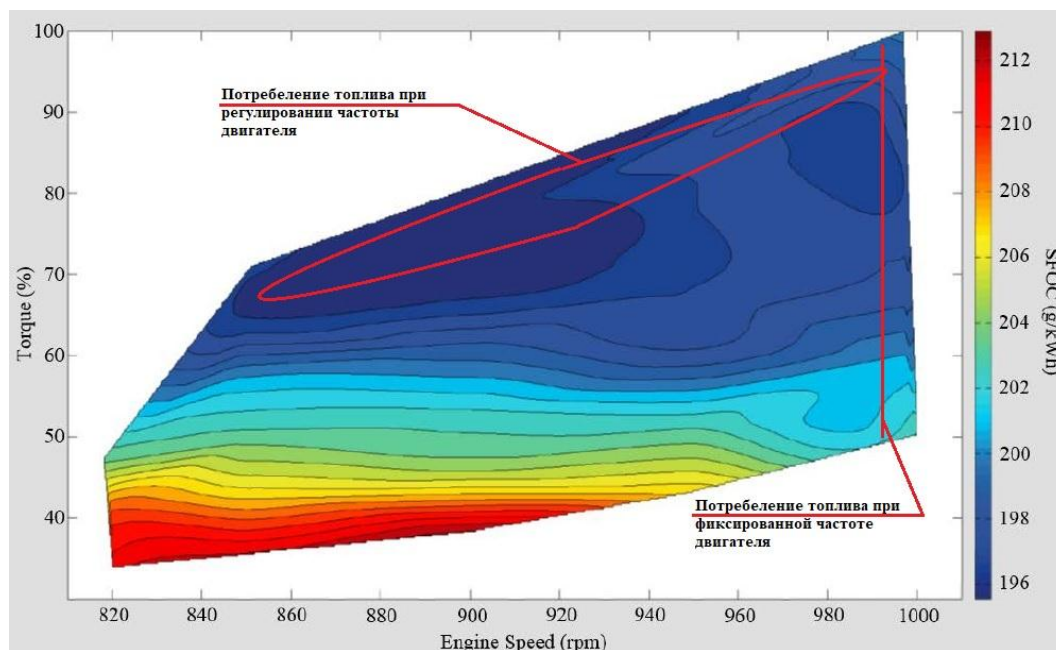


Рис. 3. График зависимости скорости вращения вала двигателя от нагрузки на валу

На рисунке 3 изображены экспериментальные результаты потребления топлива (SFOC – specific fuel oil consumption) исходя из всего допустимого диапазона работы типичного судового дизель-генератора. Из графика видно, что потребление топлива это нелинейная зависимость скорости вращения вала двигателя от нагрузки на валу и для каждого значения нагрузки имеется эффективная зона работы. Для сети постоянного тока система управления поддерживает дизель-генераторы в оптимальном соотношении оборотов двигателя и нагрузки на валу посредством прямого воздействия на регулятор подачи топлива (governor) дизеля. Более того такая система способна отключать ненагруженные двигатели генераторов и даже все при уменьшении нагрузки на сеть и переходить на работу от батарей.

Наибольший потенциал в экономии топлива потребляемого дизель-генераторами может быть достигнут путем использования в сети постоянного тока батарей с большой емкостью. Обычно их устанавливают в отдельном помещении, и они имеют достаточную емкость для питания всей сети или отдельных ее элементов при низких или пиковых нагрузках [3]. Для судов рыбопромыслового флота такая схема может быть использована при промысловом режиме работы суда. В этом случае энергия накапливается в батареях на подходе к месту лова и далее используется для питания электроприводов промысловых механизмов и других потребителей. Также батареи могут обеспечивать резервное питание судна при маневровом и аварийном режимах и в тоже время являются буфером для судовой электростанции при резких скачках нагрузки.

Преимуществом судовой электроэнергетической системы постоянного тока является также уменьшение веса и размеров занимаемого электрооборудованием и кабельными трассами до 30% по сравнению с современной системой переменного тока [2]. Основное уменьшение веса идет за счет замены силовых трансформаторов на компактные инверторы, т.е. появляется возможность полностью исключить их из схемы судовой сети. Дополнительная экономия в этом случае осуществляется за счет меньшего количества кабелей в кабельных трассах, меньшего количества коммутационного оборудования и более удобного расположения оборудования на

судне [3]. Освобожденное пространство можно использовать для увеличения размера трюмов при проектировании, и следовательно, получаем больше места для улова.

Важным преимуществом является принцип работы системы постоянного тока, который позволяет исключить влияние на судовую электростанцию реактивной мощности, т.к. значение коэффициента мощности благодаря силовым полупроводниковым преобразователям достигает 0,98 [3]. В этом случае устраняются высшие гармоники, наводимые нелинейными потребителями, а также скачкообразные перепады напряжения сети, как от мощных судовых потребителей (например, ваерные лебедки), так и валогенераторов, работающих на параллельной схеме с дизель-генераторами.

Таким образом, электроэнергетическая система постоянного тока позволяет значительно расширить параллельную работу валогенератора с дизель-генераторами при любых режимах работы рыбопромыслового судна. Выпрямитель, установленный после валогенератора, позволит избежать влияния колебаний частоты на выходе с валогенератора из-за непостоянства нагрузки прикладываемой на винт при волнении, путем быстрой отработки полупроводниковых преобразователей на изменение частоты на стороне переменного тока.

К недостатку судовой электроэнергетической системы постоянного тока следует отнести большие значения токов короткого замыкания по сравнению с сетью переменного тока [2].

Для сети постоянного тока могут быть предусмотрены специальные автоматические выключатели (Solid State Circuit Breakers – SSCB), основанные на работе силовых транзисторов (рис. 4), аналогично применяемым в силовых полупроводниковых преобразователях [4]. В этих автоматических выключателях используется только один или два IGBT или IGBT-транзистора в сочетании с системой микропроцессорного управления, которые обеспечивают быстрое (около 40 миллисекунд) размыкание поврежденного участка цепи при коротком замыкании.

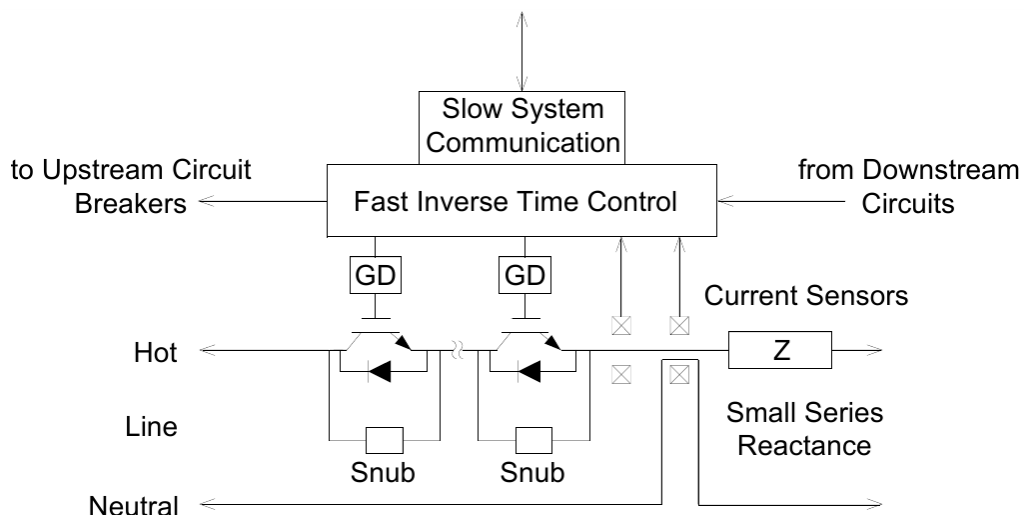


Рис. 4. Схема автоматического выключателя постоянного тока на силовых транзисторах (Solid State Circuit Breaker)

На данный момент предлагаются два варианта построения защиты от короткого замыкания сети постоянного тока [5]. Первый вариант называется «Breaker-based» основанный на использовании SSCB для каждой секции сети постоянного тока и обеспечивающий высокую надежность системы при увеличении ее стоимости. Второй вариант называется «Breaker-less» и основан на возможности выпрямителей и

инверторов выступать в виде изолирующих (коммутирующих) устройств, в случае короткого замыкания, вместе с использованием специальных плавких предохранителей для сети постоянного тока на входе и выходе инверторов. Данный вариант является более экономичным, но менее защищенным от аварийных ситуаций на судне. Фирмы, разработавшие данную систему, предлагают комбинацию данных вариантов, т.е. ГРЩ разделяется и на две-три секции с помощью SSCB, а защиту генераторов и потребителей осуществляют непосредственно преобразователи напряжения совместно с плавкими предохранителями.

Судовая электроэнергетическая система постоянного тока имеет более сложную архитектуру управления и автоматизации по сравнению с системами переменного тока. Если в судовой электростанции переменного тока система управления мощностью (Power Management System) контролирует распределение нагрузки между генераторами совместно с автоматическим регулятором напряжения и обеспечивает их автоматическое отключение и включение в параллель в зависимости от нагрузки. То система управления мощностью сети постоянного тока, помимо регулирования напряжения сети при динамическом изменении нагрузки, должна в реальном времени осуществлять оптимизацию потребления топлива и координировать работу полупроводниковых преобразователей с автоматическими выключателями постоянного тока SSCB. Поэтому для достижения высокой эффективности сети постоянного тока используют иерархическую пяти уровневую структуру компьютерного управления (рис. 5) [5].

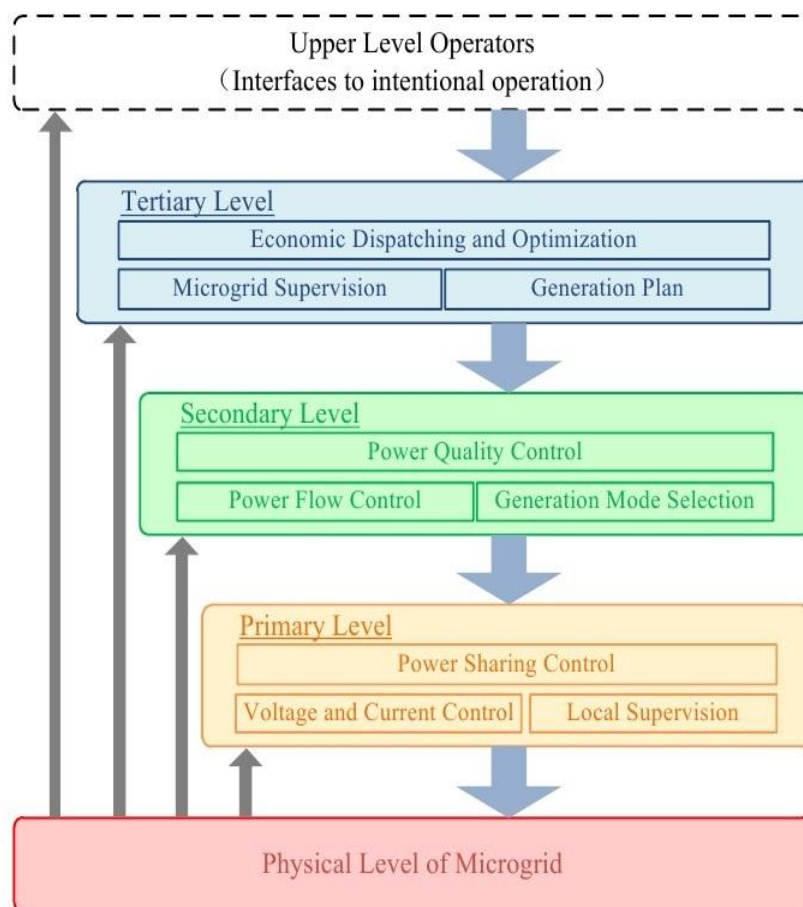


Рис. 4. Иерархическая пяти уровневая структура управления сетью постоянного тока

Нулевой уровень (physical level) отвечает за регулирование напряжения и тока на каждом из полупроводниковых преобразователей. Первый уровень (primary level) отвечает за имитацию (моделирование) физического поведения системы для ее стабилизации. Второй уровень (secondary level) обеспечивает, чтобы все переменные системы поддерживались в заданных диапазонах. Третий уровень (tertiary level) отвечает за распределение мощности по электроэнергетической системе и обеспечивает экономию электроэнергии и топлива. Верхним уровнем (upper level) является интерфейс для взаимодействия с обслуживающим персоналом. Все уровни иерархической структуры взаимодействуют между собой для достижения эффективной работы сети постоянного тока в реальном времени.

В результате проведенного анализа существующей информации по установкам с сетью постоянного тока можно сделать вывод, что электроэнергетическая система постоянного тока, с учетом значительной (до 20%) экономии топлива и большей вместимости груза (до 30%), является перспективным вариантом постройки судовой электроэнергетической системы на постоянном токе для новых судов рыбопромыслового флота.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранников В.К. Эксплуатация электрооборудования рыбопромысловых судов. Учебное пособие. М.: Моркнига, 2013. 496 с.
2. DC distribution system on offshore supply vessels // Электрон. дан. Режим доступа URL: <https://ru.scribd.com/document/142939358/Dc-Distribution-System> (дата обращения 14.09.2017)
3. Prenc R., Cuculic A., Baumgartner I. Advantages of using a DC power system // Pomorskizbornik. 2016. Т.52. С. 83-97.
4. Kempkes M., Roth I., Gaudreau M. Solid-State Circuit Breakers for medium voltage DC power // IEEE Electric Ship Technologies Symposium. 2011. С. 254-257.
5. Next-Generation Shipboard DC Power System / Z. Jin, G. Sulligoi, R. Cuzner, L. Meng // IEEE Electrification Magazine. 2016. Т.4. № 2. С. 45-57.

#### **PERSPECTIVE OF USE THE DC GRID ON SHIPS OF THE FISHERY FLEET**

Shabalin Leonid Dmitrievich, candidate of technical science, docent  
Chushankov Dmitrii Iuriivich, engineer

Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,  
e-mail: shabalin@klgtu.ru

*The article deals with an analysis of operational principle, advantages and disadvantages of maritime power system DC grid based on power electronics converters and assessment of usage DC power system for designing and building new vessels of fishery fleet of different type.*



## ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ РУЛЕВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА МОРСКОГО СУДНА В АВТОМАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

<sup>1</sup>Шабалин Леонид Дмитриевич, доцент, канд. техн. наук

<sup>2</sup>Савенко Александр Евгеньевич, канд. техн. наук

<sup>2</sup>Савенко Павел Станиславович, курсант

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,  
Калининград, Россия, e-mail: shabalin44@mail.ru

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический  
университет», Республика Крым, Керчь, Россия,  
e-mail: savenko-70@mail.ru

*Рассмотрены вопросы оптимизации автоматического управления рулевым электрическим приводом морского судна в различных режимах работы. Разработанный алгоритм работы адаптивной системы автоматического управления рулевым электрическим приводом имеет возможность его реализации для любого типа судов с использованием микропроцессора. Показано, что эффективная организация работы блока адаптации возможна с использованием метода по координатной коррекции Гаусса-Зайделя. Предложен критерий настройки системы в процессе поиска варьируемых параметров*

### Введение

Управление движением судна может осуществляться вручную и автоматически. При ручном управлении судном, особенно в сложных погодных условиях, происходит его существенное отклонение от заданного курса. За счет увеличения количества переключений руля уменьшается скорость судна, что приводит к увеличению расхода топлива и ходового времени.

Основные преимущества автоматического управления по сравнению с ручным состоят в уменьшении пропульсивных потерь, т. е. потерь скорости хода за счет сопротивления движению судна, вызванного действием руля. При постоянной скорости судна это способствует сокращению потерь топлива. Выигрыш в скорости при автоматическом управлении достигает 3...5%. Амплитуды выходов руля в среднем на 50% меньше, чем при ручном управлении. При плавании в открытом море рулевой освобождается от утомительной вахты на руле.

Автоматическое регулирование курса является частным случаем управления движением судна по заданной траектории. Системы автоматического регулирования (САР) курсом основаны на принципе управления объектом по отклонениям регулируемой величины (курса) от заданных значений. САР курсом включает регулятор (собственно авторулевой и рулевое устройство судна) и само судно как объект регулирования. Обратная связь в системе создается с помощью гирокомпаса, непрерывно измеряющего отклонение диаметральной плоскости судна от заданной линии курса. Регулятор САР курсом представляет электромеханическое устройство, преобразующее угловую величину отклонения курса в угловую величину переключения руля. Авторулевой как часть регулятора служит для выработки сигналов управления рулевой машиной.

Авторулевые выполняют две функции: удержание судна на заданном курсе (режим стабилизации); изменение курса на заданную величину (следящий режим). Основ-

ным режимом работы авторулевого является режим стабилизации. Современные авторулевые разных модификаций реализуют пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) закон регулирования. Во многих авторулевых, например АИСТ, настройка параметров закона регулирования осуществляется вручную в зависимости от погодных условий, загрузки судна и других факторов. Такой способ настройки занимает большой промежуток времени и не всегда эффективен. Необходимо рассмотреть возможность автоматической настройки параметров закона управления авторулевого морского судна.

Системы управления, обладающие свойством автоматической перестройки параметров, «приспособления» их к изменению внутренних и внешних условий работы, называются адаптивными или самоприспосабливающимися [1]. Адаптивные авторулевые — это такие системы, в которых производится автоматическая перестройка параметров регулятора в соответствии с заданным критерием оптимальности.

### Методы и Материалы

Работу блока адаптации будем реализовывать по методу покоординатной реализации Гаусса-Зайделя [2, 3]. Метод состоит в поочерёдном изменении варьируемых параметров  $m_1, m_2, \dots, m_n$ . Сначала варьируется один параметр  $m_1$  (остальные зафиксированы) и отыскивается частный экстремум по этому параметру, на основе условия  $dc/dm = 0$ . Затем параметр  $m_1$  фиксируется и начинается варьирование второго параметра  $m_2$  для отыскания другого частного экстремума. После этого фиксируется второй параметр и начинается варьирование третьего и т.д. В нашем случае поиск ведётся по двум параметрам: ошибке курса  $e$  и количеству переключений руля  $n$ .

После окончания цикла поиска по обоим параметрам результат фиксируется в виде критерия  $K = b_1 e + v_1 n$  (коэффициенты  $b_1$  и  $v_1$  дают возможность дать приоритет одному из параметров, в нашем случае приоритеты равны, т.е.  $b_1 = v_1 = 0,5$ ) и вновь производится изменение  $m_1$  и цикл повторяется. Процесс поиска заканчивается когда все компоненты  $dc/dm_i$  станут меньше определённых величин, зависящих от порога чувствительности измерительных элементов или меньше заданных величин. Для двух варьируемых параметров процесс поиска показан на рисунке 1.

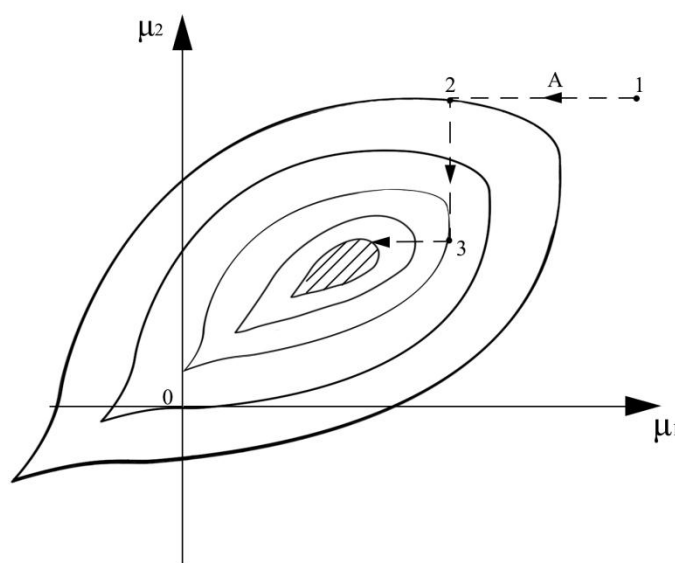


Рис. 1. Процесс поиска двух варьируемых параметров

Для реализации такого способа поиска в общем случае необходимо иметь  $n$  каналов одного поиска при  $n$  варьируемых параметрах, а также логическое устройство для переключений. Работу каждого из каналов можно построить по известным принципам. Поиск может быть зависимым и независимым. Имеется возможность использовать определённую часть аппаратуры одновременно для нескольких каналов.

Для организации работы блока коррекции (блока управления) необходимо сделать следующее: первоначально примем что блок коррекции на микроЭВМ непрерывный [4].

$$W_{\text{ПИД}} = K_y \cdot \left( T_d p + 1 + \frac{1}{T_I p} \right)$$

Далее ЭВМ представим как дискретное устройство с постоянным периодом  $T_0$  следования импульсов и поэтому её работа описывается дискретной передаточной функцией [5]:

$$\begin{aligned} W_{\text{ПИД}}(Z) &= K_y \cdot \frac{Z-1}{Z} \cdot \left( T_d + \frac{Z}{Z-1} + \frac{1/T_I \cdot T_0 Z}{(Z-1)^2} \right) = K_y \cdot \frac{Z-1}{Z} \cdot \frac{T_d \cdot (Z-1)^2 + Z \cdot (Z-1) + 1/T_I \cdot T_0 Z}{(Z-1)^2} = \\ &= \frac{K_y}{Z} \cdot \frac{T_d \cdot (Z^2 - 2Z + 1) + Z^2 - Z + T_0/T_I \cdot T_0 Z}{Z-1} = \frac{K_y}{Z} \cdot \frac{T_d Z^2 - 2T_d Z + T_d + Z^2 - Z + T_0/T_I \cdot T_0 Z}{Z-1} = \\ &= \frac{K_y [(T_d + 1) \cdot Z^2 + (T_0/T_I - 2T_d - 1) \cdot Z + T_d K_y]}{Z^2 - Z} = \\ &= \frac{(K_y \cdot T_d + K_y) + \left( \frac{T_0 K_y}{T_I} - 2T_d K_y - K_y \right) \cdot Z^{-1} + T_d K_y \cdot Z^{-2}}{1 - Z^{-1}} = \frac{U}{\varepsilon} \end{aligned}$$

Обозначим  $a_0 = K_y \cdot T_d + K_y$ ;  $a_1 = \frac{T_0 K_y}{T_I} - 2T_d K_y - K_y$ ;  $a_2 = T_d K_y$ ;

$T_0$  – период опроса

$K_y$  – коэффициент усиления

$T_I$  – постоянная времени интегрирования

$T_d$  – постоянная времени дифференцирования

$U$  – выходной сигнал ЭВМ

$e$  – входной сигнал ЭВМ

По передаточной функции составляем передаточное уравнение:

$$(a_0 + a_1 Z^{-1} + a_2 Z^{-2}) e = (1 - Z^{-1}) U$$

Из этого уравнения получаем разностное уравнение:

$$a_0 e(n) + a_1 e(n-1) + a_2 e(n-2) = U(n) - U(n-1)$$

Выражение по которому будет вычисляться выходной сигнал ПИД регулятора в зависимости от входных сигналов имеет вид:

$$U(n) = U(n-1) + a_0 e(n) + a_1 e(n-1) + a_2 e(n-2)$$

### Алгоритм работы блока адаптации

Включившись в работу разрабатываемая микроконтроллерная система прежде всего должна подготовить ячейки, используемые в дальнейшем под флаги, счётчики, константы и т.д. и настроить порты на ввод или на вывод. Так же необходимо произвести инициализацию, загрузку и настройку таймера счётчика  $T/C0$  и контроллера клави-

атуры/дисплея, распределить адресное пространство под различные переменные. Необходимо проверить в каком режиме в данный момент работает авторулевой и в соответствии с этим проделать некоторые специфические операции отдельно взятого режима. Причём в первоначальный момент запуска программы авторулевого устанавливается ручной режим управления.

Блок адаптации начинает работать (рис. 2), когда происходит прерывание по таймеру/счётчику Т/СО. Начав обрабатывать прерывание ТF0 система прежде всего произведёт считывание данных из АЦП в ОЗУ микропроцессора. После каждого входа

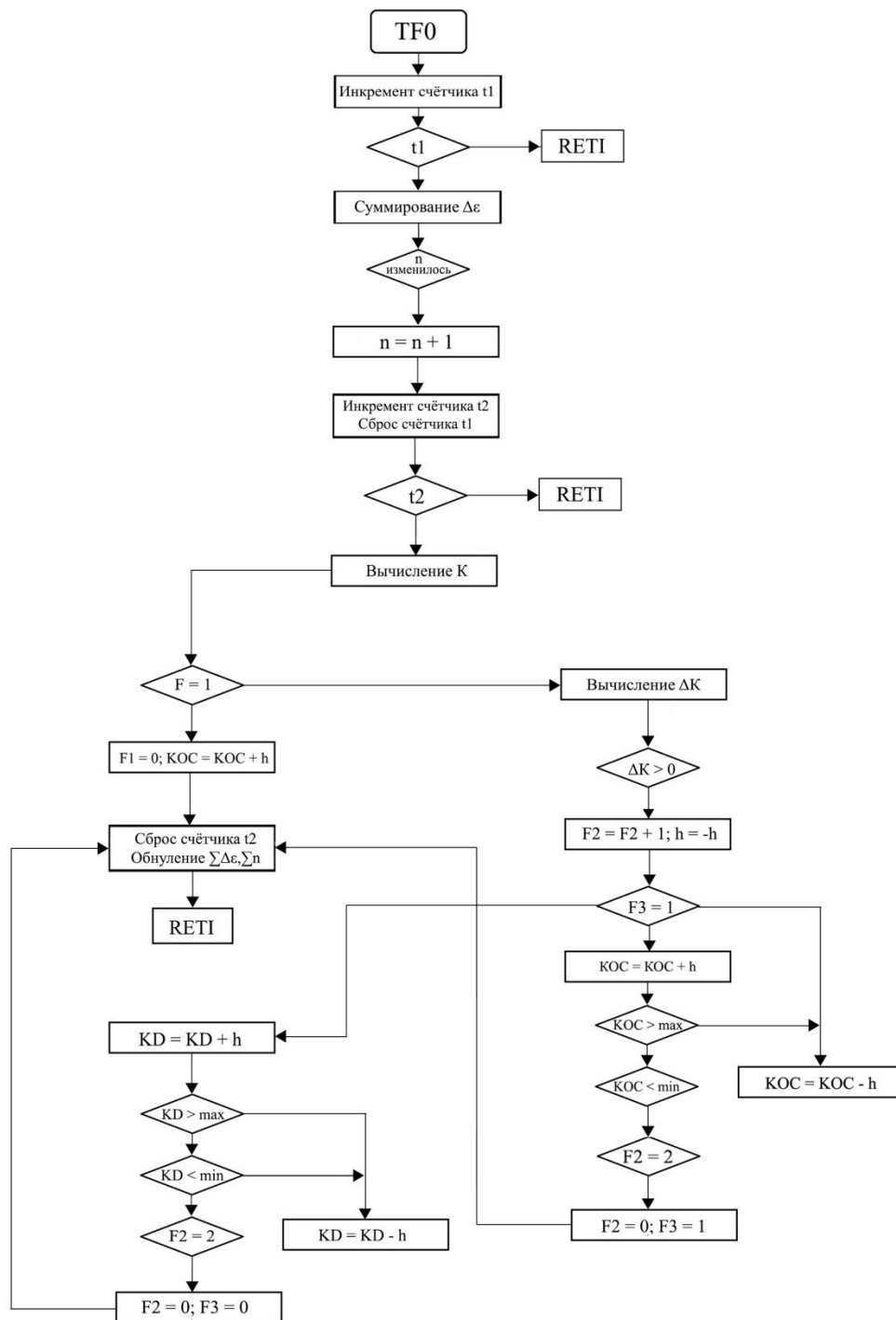


Рис. 2. Алгоритм работы блока адаптации

в прерывание счётчик времени накопления  $t_1$  увеличивает своё содержимое на единицу и по достижении значения, заданного на входе АЦП производится накопление ошибки курса  $e$  и количества переключений руля  $n$ , если таковые имеют место, после чего счётчик  $t_1$  обнуляется. Счётчик  $t_1$  времени оптимизации также ведёт своё заполнение после каждого прибавления в накопитель  $e$  и  $n$ , и после его заполнения производится вычисление критерия  $K = b_1 e + v_1 n$ . Затем начинается варьирование коэффициента обратной связи КОС и коэффициента дифференциальной части  $K_D$  по методу Гаусса-Зайделя. Если критерий  $K$  вычисляется впервые, что определяется по флагу F1, то производится увеличение КОС, обнуляется счётчик  $t_2$ , накопители  $e$  и  $n$ , и счётчик выходит из прерывания. Если вычисление  $K$  уже имело место, то вычисляется  $\Delta K$  по которому видно, в правильном ли направлении ведётся варьирование. При ложности направления оно меняется на противоположное и флаг F2, по которому определяется количество отказов, т.е. случаев ухудшения  $K$  при изменении КОС или  $K_D$ . При истинности направления, продолжается движение по КОС и  $K_D$ , о чём говорит флаг F3 (1 – по  $K_D$ , 0 – по КОС). После каждого продвижения необходимо контролировать не выходит ли варьируемый параметр за допустимые пределы, если таковое имеет место то данный параметр возвращается на шаг назад фиксируется и далее варьируется второй параметр, т.е. флаг F3 меняется на противоположный, флаг F2 обнуляется, сбрасывается счётчик  $t_2$ , накопители  $e$  и  $n$ , система выходит из прерывания. Если параметр не выходит за допустимые пределы, то контролируется количество отказов. Если оно достигло двух, то производится действие как после выхода его за пределы, но без шага назад. Если не достигло двух, то производятся такие же действия, но без обнуления F2 и смены на противоположный F3. Число отказов, ограничивающее продолжение варьирования параметра, принимается равным двум по следующим соображениям: если первоначально направление ложно, то обратное будет истинно и после прекращения измерения критерия наступает второй отказ, то прекратится варьирование данного параметра. Если первоначальное направление было истинным, то для унификации разработки программного обеспечения число отказов также может достигать двух после достижения оптимума, однако значение варьируемого параметра остаётся оптимальным [6].

На рисунке 3 видно, что если начать движение из точки 1 вправо (ложное

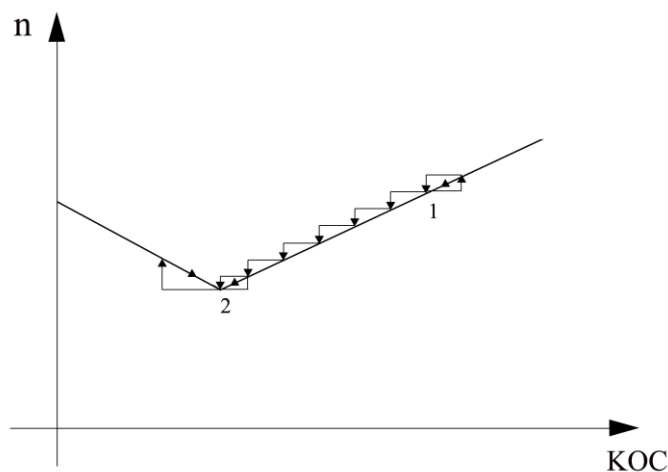


Рис. 3. Варьирование одного параметра по методу Гаусса-Зайделя

направление), то после первого шага фиксируется первый отказ и направление меняется на противоположное. По достижении точки 2 продолжив движение влево получим второй отказ и вернёмся в точку 2. Если начать движение из точки 1 влево (истинное направление) то по достижении точки 2 делается две попытки: одна влево – получаем

первый отказ, изменяется направление, возвращаемся в точку 2, делаем шаг вправо – получаем второй отказ, возвращаемся опять в точку 2, прекращаем варьирование этого параметра и переходим на другой.

### Заключение

Применение разработанного алгоритма работы системы автоматического управления позволяет повысить эффективность работы рулевой машины судна и значительно снизить количество переключений руля, тем самым уменьшить износ механизмов. Автоматизация процесса управления судном даёт гарантию надёжности управления судном и упрощает работу персонала ответственного за управление судном.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Туркин И.И., Мин Хейн Адаптивные многоцелевые системы управления судовыми техническими средствами // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: морская техника и технология. 2017. № 1 с.59–67
2. Панкратов В.В. Автоматическое управление электроприводами. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. 200 с.
3. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т.2 Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. М.: Физматлит, 2004. – 464 с.
4. Бабаев А.М., Ягодкин В.Я. Автоматизированные судовые электроприводы. М.: Транспорт, 1986.-448 с.
5. Молочков В.Я. Микропроцессорные системы управления техническими средствами рыбопромысловых судов: Учебное пособие / В.Я. Молочков – М.: Моркнига, 2013. –362 с.
6. Мещеряков В.Н., Левин П.Н., Синюкова Т.В. Повышение эффективности поискового алгоритма для оптимизации энергосбережения за счет формирования магнитного потока асинхронного двигателя. // Приборы и системы, управление, контроль, диагностика. 2014. №6, стр.25–30.

### OPTIMIZATION OF THE STEERING ELECTRIC DRIVE MARINE VESSEL IN AUTOMATIC MODE

<sup>1</sup>Shabalin Leonid Dmitrievich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor

<sup>2</sup>Savenko Aleksandr Evgenievich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor

<sup>2</sup>Savenko Pavel Stanislavovich, cadet

<sup>1</sup>Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,

e-mail: shabalin44@mail.ru

<sup>2</sup>Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Crimea Republic, Russia,

e-mail: savenko-70@mail.ru

*The problems of optimization of automatic steering of the electric power steering gear of a sea vessel in various modes of operation are considered. The developed algorithm of the adaptive automatic control system of the steering electric drive has the ability to realize it for any type of vessel using a microprocessor. It is shown that the effective organization of the adaptation unit is possible using the method of coordinate-wise Gauss-Seidel correction. A criterion for tuning the system in the process of searching for variable parameters is proposed.*

## СЕКЦИЯ «СУДОВЫЕ И СТАЦИОНАРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ»

### SECTION "SHIP AND STATIONARY POWER PLANTS"

УДК 621.431.74:621.435-4

#### ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВВЕДЕНИЯ ПРИСАДОК В СМАЗОЧНЫЕ МАСЛА

Атаманов Константин Аполлонович, инженер  
Толмачёв Александр Викторович, канд. техн. наук, доцент

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,  
Калининград, Россия, e-mail: avtol03071952@mail.ru

*Приведены сравнительные показатели смазочных масел, полученных по традиционной технологии блендирования с подогревом смешиваемых компонентов и новой технологии кавитационного воздействия на компоненты базовых масел и легирующих присадок. Новая технология позволяет воздействовать на трудносмешиваемые среды (базовые масла и легирующие присадки) с целью получения высококачественного товарного масла, сравнимого по цене с зарубежными аналогами*

Современные смазочные масла должны обладать комплексом специфических свойств, которых нет у исходных базовых масел, изготовленных вакуумной перегонкой нефти или синтезом легких углеводородов. Для улучшения эксплуатационных качеств товарных масел в базовые масла добавляют легирующие присадки, повышающие или усиливающие отдельные свойства в соответствии с его назначением. Эффективность действия присадок в базовом масле зависит не только от концентрации присадки, но и от тонкости смешения (растворения) присадок. Присадки, как правило, являются дорогостоящими высокомолекулярными соединениями, синтезируемыми с применением достаточно сложных и дорогостоящих каталитических технологий. Высокие концентрации присадок существенно повышают себестоимость производства масел. Естественно стремление снизить себестоимость производства масла без ухудшения его эксплуатационной эффективности. Наиболее успешно это может быть реализовано с применением новых физических способов воздействия в технологических процессах введения присадок в базовое масло.

На российский рынок поставляется множество отечественных и зарубежных марок смазочных масел, предназначенных для смазки поршневых двигателей внутреннего сгорания и других механизмов. Ведущие зарубежные мировые производители масел, несмотря на более высокие цены, существенно теснят российских производителей. В основном из-за фактически более высокого качества нефтепродуктов, а также из-за рекомендаций использовать в поставляемых в Россию агрегатах и ДВС смазочных масел конкретных проверенных брендов. Российские же товарные смазочные масла по причине их низкого продвижения на зарубежный рынок являются малоизвестными. В основном на зарубежный рынок из России поставляются базовые масла для дальнейшей переработки и введения присадок. Проблема производства высококачественного то-

варного масла, стоимость которого не превышала бы стоимости зарубежных аналогов, в настоящее время не решена.

Традиционное блендирование нашло широкое, можно сказать повсеместное, применение при производстве товарных масел. Основным преимуществом традиционного блендирования принято считать относительную технологическую простоту и стоимость. Однако, в условиях современного развития смазочных материалов (применение все более сложных, многокомпонентных, трудносмешиваемых структур), традиционное блендирование с поставленными задачами уже не справляется. Минусами традиционного блендирования является :

- недостаточное растворение, дробление мицелл присадок, а значит меньшая площадь взаимодействия со средой;
- нестабильное качество, при смешивании базовых масел различной природы с легирующими присадками, результатом чего является полное либо частичное расслоение полученного раствора;
- невозможность улучшения свойств базовых масел, влияющих на свойства конечного продукта;
- существенные энергозатраты при технологическом нагреве всей массы готовящегося продукта (нагрев от 70<sup>0</sup>С до 90<sup>0</sup>С);
- негативное экологическое воздействие на внешнюю среду горячих нефтепродуктов и присадок к ним.

При применении физических методов (кавитация, вибрация, ультразвук и т.п.) основную трудность вызывает растворение волокнистых полимеров, так как до растворения в масле полимеры имеют высокую склонность к механической деструкции и «жесткое» воздействие может привести к значительному изменению их структуры, что негативно сказывается на качестве товарного масла.

На основании многолетних практических исследований опытным путем разработана новая технология [1], использующая тонкие физические методы воздействия для смешения трудносмешиваемых сред (масел и легирующих присадок) и с целью получения высококачественного товарного масла, сравнимого по цене с зарубежными аналогами. Технология получения высококачественного товарного масла должна обеспечивать:

1. Смешение трудносмешиваемых сред, таких как:

- полиэфирные (пентаэритритовые, триметилпропановые и др.);
- синтетические жирные кислоты и производные: пентановая, гептановая, нонановая;
- эстеры, полиэстеры, полиальфаолефины, алкилированные нафталины продукты гидроизомеризации, нефтяные дистилляты, легирующие присадки для получения сложных, специализированных товарных масел.

2. «Бережное» растворение макромолекулярных загустителей и депрессоров, таких как сополимеры олефинов (этилен, пропилен), полиалкилметакрилата с молекулярной массой от 35000-50000 ед. по Штаудингеру.

3. Придание новых свойств базовым маслам и конечному продукту (товарному маслу) таких, как поляризация.

4. Улучшение свойств базовых масел и конечного продукта, таких как:

- понижение температуры застывания;
- повышение температуры вспышки;
- увеличение индекса вязкости;
- увеличение показателей стойкости к механической деструкции.

5. Исключение из процесса производства негативного с точки зрения экологии и энергозатратного этапа нагрева.

6. Значительное ускорение производственного процесса смешения и ввода легирующих присадок.



7. Получение сложного (многокомпонентного) товарного масла, представляющего собой стойкий коллоидный раствор с новыми и улучшенными показателями физических и химических свойств.

Исследование технологии и испытание физико-химических свойств, полученных товарных масел проводили на производственной базе ООО «Грейс-Лубрикантс» на опытной технологической установке, включающей кавитационную колонну, насосы, емкости и измерительную аппаратуру. В качестве объектов исследования использовались базовые масла российского производства с различными добавками и легирующими присадками. В процессе исследований применяли трехступенчатое воздействие на смесь, включающее мягкое, «бережное» растворение высокомолекулярных полимеров и жесткое (взрывное) кавитационное воздействие для получения стойкой коллоидной структуры конечного продукта.

Конструктивными элементами кавитационной колонны является камера высокого давления и калиброванные каналы, совокупная площадь сечения которых меньше площади сечения питающей трубы и значительно меньше камеры высокого давления. За счет падения давления в начале каждого канала возникает «мягкая» кавитация, интенсивность которой можно регулировать изменением давления насоса, подающего жидкость.

Конструкция кавитационной колонны, инициирует несколько факторов воздействия на структуру подаваемой смеси:

- создание устойчивого турбулентного потока и постоянное поддержание естественной и искусственной турбулизации ;
- получения вакуумных струй (эффект Вентури), для получения «мягкой» кавитации;
- получение автоматического сопутствующего акустического поля внутри струи и «жесткой» кавитации.

#### 1. Фактор турбулентности

Турбулентный поток сам по себе является эффективным смешивающим фактором, благодаря возникающим в потоке вихрям поперечного направления. Критическое число Рейнольдса ( $Re$ ), при котором начинается турбулизация потока, изменяется в очень широком диапазоне. Оно зависит не только от постоянных факторов, таких как скорость потока, вязкость и характерный размер, но и от дополнительных – технологических препятствий, искусственные завихрители потока, механическая вибрация, акустическое поле, технологической бифуркации, что позволяет создать условия для поддержания стабильной турбулентности потока. Степень турбулизации определяется числом Рейнольдса ( $Re$ ). Для вязких жидкостей часто применяют теоретическое число Рейнольдса ( $Re_T$ ), в котором скорость заменяется её эквивалентом по уравнению Бернулли.

$$Re = \frac{w \cdot d}{\nu} ; \quad Re_T = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}} \cdot \frac{d}{\nu} \quad (1)$$

где:  $w$  – скорость потока в канале, м/с;

$d$  – диаметр канала, м;

$\nu$  – коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/с;

$\Delta P$  – градиент давления по длине канала, Па;

$\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>.

Для эффективного перемешивания жидкости число Рейнольдса должно быть более критического  $Re > 2000$ . Для использованной технологической линии с искусственными турбулизаторами, число Рейнольдса должно быть не менее 1800. Снижение возможно потому, что в кавитационной колонне турбулизация поддерживается благодаря наличию острых кромок на входе в канал. Кроме того, при входе в канал формируется зона сжатия струи, в которой скорость существенно выше, что и определяет возникно-

вление пониженного давления способного вызвать разрывы сплошности потока, то есть явление кавитации.

Как известно, эффект Вентури заключается в падении давления, когда поток жидкости протекает через суженную часть канала и согласуется с уравнением Бернулли для вязкой жидкости, определяющим связь между скоростью жидкости, давления в ней и высотой, на которой находится рассматриваемый элемент жидкости:

$$\rho \cdot g \cdot z_1 + P_1 + \alpha_1 \cdot \rho \cdot \frac{w_1^2}{2} = \rho \cdot g \cdot z_2 + P_2 + \alpha_2 \cdot \rho \cdot \frac{w_2^2}{2} + \sum P_{\text{об}}, \quad (2)$$

где:  $z_1, z_2$  - высота сечения;

$P_1, P_2$  - давление в сечении;

$w_1, w_2$  - скорость жидкости в сечении;

$\alpha_1, \alpha_2$  - безразмерный коэффициент Кориолиса, учитывающий неравномерность распределения скоростей.

$\rho$  - плотность жидкости;

$g$  - ускорение свободного падения;

$\sum P_{\text{тр}}$  - суммарная потеря давления на участке 1 - 2.

Турбулентность – необходимый фактор предварительного распределения полимерных присадок по объему. Полимерные присадки, такие как сополимеры олефинов (загущающие), полиметилакрилатные (депрессоры) и другие полимеры, имеющие молекулярную массу более 55 000 ед. по Штаудингеру даже после предрстворения в базовом масле, имеют структуру в виде волокнистых сгустков, весьма склонную к механической деструкции. При жестком кавитационном воздействии возможен обрыв длинных разветвленных цепей молекул, что в свою очередь приводит к уменьшению загущающей способности присадки. При мягком, дозированном кавитационном воздействии на структуру потока, связанным с эффектом Вентури, макромолекулы полимеров под действием энергии схлопывающихся кавитационных каверн разделяются на отдельные волокна и равномерно распределяются по всему объему базового масла. Разделенные волокна имеют большую свободу перемещения и остаются целостными даже при дальнейшем энергичном кавитационном воздействии. Поэтому особенно важно для сохранения структуры волокон на первых двух ступенях растворения использовать мягкие кавитационные воздействия, что обеспечит эффективность тщательного растворения высокополимерных загущающих присадок для получения устойчивого коллоидного раствора.

Физические условия, которые должны «соблюдать» первые два фактора воздействия, следующие: энергии должно быть достаточно для выделения растворенного газа в газовую фазу, образуя микро- и нанопузырьки. Микропузырьки достаточно быстро будут растворяться либо коалесцировать. При этом нанопузырьки должны быть достаточно стабильны, так как энергия межфазных границ препятствует прохождению газа через эту границу в раствор: коалесценции пузырьков будет препятствовать одноименный электрический заряд межфазной границы. Энергетика процесса не должна захватывать ионизацию газа, чтобы он оставался в газовой фазе и не вступал с общей органической структурой ни в химическое, ни в межмолекулярное взаимодействие силами Ван-дер-Ваальса.

Этих условий достаточно для предрстворения полимеров в масле, не нарушая их структуры. Для остальных легирующих присадок данный этап является хорошей возможностью распределения присадок по объему масла (фазы в среде), для последующего более мощного воздействия и растворения.

3. Фактор жесткой «взрывной» кавитации

Третьей ступенью воздействия, является мощная «взрывная» кавитация в третьей ступени, где каждый канал заканчивается расширяющимся соплом для получения более мощного разрежения. Также мощное воздействие необходимо для растворения «тяжелых» легирующих присадок, таких как щелочные и нейтральные сульфаты кальция, алкилированные фосфорной кислотой салицилаты и феноляты, первичные, вторичные дитиофосфаты цинка, а также антизадирная группа, включающая в себя хлор-серо-фосфорные соединения. Помимо растворения присадок, такое воздействие необходимо для смешивания «тяжелых» базовых масел, таких как кремнийорганические базовые масла (полиметилсалицилаты и др.). Эти присадки являются устойчивыми к жесткому кавитационному воздействию и сохраняют свою структуру и свойства. Главная задача жесткого воздействия раздробить и растворить присадки по всему объему. Жесткое кавитационное воздействие после двух ступеней мягкого воздействия уже не повреждает длинные полимерные волокна, так как они разделены и не ограничены в свободном передвижении.

Процессы смешения масла организованы в кавитационной колонне, которая в соответствии с рассмотренными факторами имеет три секции, обеспечивающие последовательное воздействие кавитационного процесса на смешиваемые компоненты. Схема установки для ввода присадок и устройство кавитационной колонны приведены на рис. 1. Поток смешиваемой жидкости поступает в центральный канал снизу. В верхней части колонны поток попадает в распределительную камеру, где разворачивается и расширяется за счет радиального движения, происходит его стабилизация и равномерное распределения по кавитационным каналам.

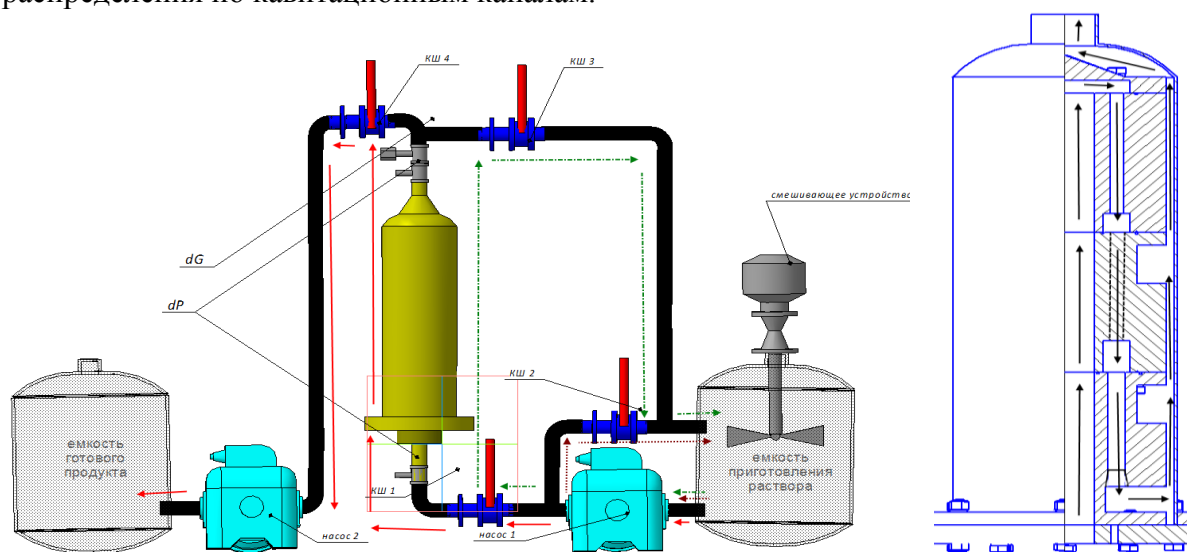


Рис. 1. Схема установки для кавитационного введения присадок в смазочные масла и устройство кавитационной колонны

При поступлении в калиброванные каналы на входных кромках происходит завихрение потока, образуется зона повышения скорости, при этом возникают условия образования зоны разрежения с образованием нанопузырьков внутри жидкости. Естественно в первую очередь происходит насыщение пузырьков растворенными газами и парами легких фракций масла. Образование пузырьков приводит к расклиниванию волокон полимеров, а их схлопывание позволяет интенсивно заполнить каверны маловязкой (высокотекучей) жидкостью, которой являются компоненты базового масла.

Кавитационные каналы с обоих концов имеют объемную камеру и в конечном виде представляют собой многорядный двухкамерный резонатор Гельмгольца. Естественно,

при падении давления, наличия завихрения потока и отражения возникает устойчивая акустическая волна. Скорость волны в упругой среде определяется модулем упругости и плотностью жидкости, а частота резонансных акустических колебаний может быть оценена по формуле Гельмгольца:

$$A = \sqrt{\frac{E_S}{\rho}}; \quad f_o = \frac{A}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \left[ \frac{q_1 + q_2}{V_1} + \frac{q_2 + q_3}{V_2} \pm \sqrt{\left( \frac{q_1 - q_2}{V_1} + \frac{q_2 - q_3}{V_2} \right)^2 + \frac{4 \cdot q_2^2}{V_1 \cdot V_2}} \right]} \quad (3)$$

Где  $E_S$  – адиабатный модуль упругости масла,  $E_S \approx 1,5 \times E_T$

$E_T$  - изотермический модуль упругости масла

$q = S/l$ ,  $S$  – площадь сечения канала,  $l$  – длина канала,

$V$  – объём резонансной камеры.

Кавитационная колонна гидравлически представляет собой сеть разветвляющихся и сходящихся каналов, основные размеры которых и характеристики течения приведены в таблице 1.

Частота резонансных автоколебаний составляет 5 – 6 кГц, что способствует эффективному распределению присадок разной физико-химической природы по всему объёму масла.

Таблица 1

Наименование канала	$d$ м	$L$ сумм м	$l$ м	$n$ шт.	$S$ м <sup>2</sup>	$w$ м/с	$Re$ -	$\Delta P$ бар	$Re_T$ -
Центральный	0,1	0,95	0,95	1	0,007854	0,2228	742	-	-
Верхняя распредел. камера	0,2	0,99	0,04	1	0,025133	0,0696	464	-	-
1-я кавитационная секция	0,013	1,29	0,3	5	0,000664	2,6368	1142	10	20427
1-й кольцевой коллектор	0,25	1,34	0,05	1	0,017671	0,0990	825	-	-
2-я кавитационная секция	0,012	1,64	0,3	6	0,000679	2,5788	1031	10	18856
2-й кольцевой коллектор	0,25	1,69	0,05	1	0,017671	0,0990	825	-	-
3-я кавитационная секция	0,0108	1,94	0,25	7	0,000641	2,7290	982	10	16970
Конфузор	0,015	1,99	0,05	7	0,001237	1,4147	707	3	12910
3-й кольцевой коллектор	0,25	2,04	0,05	1	0,017671	0,0990	825	-	-
Периферийный кольцевой канал	0,26	2,99	0,95	1	0,004006	0,4369	3786	-	-

Для выявления эффективности новой кавитационной технологии были проведены сравнительные испытания зарубежного товарного масла, полученного по традицион-

ной технологии (блендирование) и после обработки в кавитационной колонне. Опыт проведен при создании многокомпонентного товарного масла марки «Grace Absolute» 5W-40 состоящего из четырех базовых масел и комплекса присадок, приведенных в таблице 2.

Вся операция смешения и ввода присадок была осуществлена за 40 минут. Для сравнения при использовании традиционного блендирования на производство 1000 л. товарного масла затрачивается приблизительно 7,5 часов.

Таблица 2

№	Компоненты	Группа по API	Доля, %
1	Базовое масло (гидрокрекинг)	III	20,00
2	Базовое масло (полиальфаолефины)	IV	20,00
3	Базовое масло (алкилированные нафталины)	V	10,00
4	Базовое масло	II	26,48
5	Пакет легирующих присадок	НТЕС 9490	12,00
6	Модификатор трения (органомолибден)	НТЕС 9552	0,02
7	Депрессор полиметилакрилатного типа	НТЕС 5714	0,50
8	Загуститель (сополимер олефина)	(раствор в I гр.	11,00
		Сумма	100,00

Кроме того, надо отметить, что энергозатраты при использовании предлагаемой технологии несравненно более низкие, т.к. не требуется дополнительного нагрева смеси. Сравнение показателей качества товарного масла Grace Absolute 5w-40 приведено в таблице 3.

Таблица 3

Показатели качества товарного масла	Кавитационная технология	Традиционная технология (блендирование)
Длительность операции смешения, час	0,66 (40 мин)	7,5
Температура подогрева, °С	20 (без подогрева)	80 - 90
Индекс вязкости	174	173
Температура застывания, °С	-50	-48
Щелочное число, мг.КОН/г.	9,0	8,7
Деструкция загущающей присадки, %	6,0	6,8

Таким образом, приготовление масла по кавитационной технологии имеет неоспоримые преимущества, как в качестве получаемого продукта, так и в энергозатратах на его получение.

Товарное масло, полученное по кавитационной технологии, подвергалось центрифугированию и последующему длительному хранению (более года). При этом не было зафиксировано какого-либо расслоения и выпадения осадка, что подтверждает высокую степень гомогенизации смеси, её стабильность и стойкость. Данное масло сертифицировано.

Сравнительные испытания различных марок масел были проведены в независимой лаборатории ИСХН им. А.В. Топчиева [2]. Испытания подтвердили высокое качество масел полученных при применении кавитационной технологии введения легирующих присадок.

Таким образом, проведенные исследования подтверждают возможность применения технологии с использованием описанных физических методов воздействия для смешения трудносмешиваемых сред (масел) при получении высококачественных товарных масел. Экономические затраты на получение товарного масла при применении данной технологии существенно ниже, чем при применении блендирования, а качество товарных масел не уступает зарубежным образцам.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атаманов К.А. Кавитационная колонна. Полезная модель №2017 106474/04 270217
2. Отчет о НИР по договору №56-27-12 с ООО «Грейс-Лубрикантс» по теме: «Определение трибологических характеристик моторных масел различных производителей», Москва, Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук (ИНХС РАН) – 2015.- 9с.

### **EFFICIENCY OF INTRODUCTION OF ADDITIVES IN LUBRICATING OILS**

Atamanov Konstantin Apollonovich, engineer, entrepreneur  
Tolmachev Alexander Viktorovich, Ph.D., associate professor

Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,  
e-mail: avtol03071952@mail.ru

*In the paper, comparative figures of lubricating oils obtained by traditional blending technology with heating of miscible components and a new technology of cavitation effect on the components of base oils and leaching additives are presented. The new technology makes it possible to work on difficult-to-mix media (base oils and alloying additives) in order to obtain high-quality commercial oil, comparable in price to foreign counterparts. At the base of the process unit there is a cavitation column, which initiates three factors of influence on the structure of the feed mixture: the creation of a stable turbulent flow, the Venturi effect, for obtaining "soft" cavitation, obtaining "hard" cavitation and acoustic field.*

УДК 621.431

### **АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ЭКСПЛУАТАЦИИ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК СУДОВ ФЛОТА РЫБНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Бразновский Виктор Кришевич, доцент  
Томилко Владимир Тимофеевич, ст. преподаватель

Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО  
«КГТУ», Калининград, Россия, e-mail: seu@bga.gazinter.net; seu@bga.gazinter.net

*Проведен анализ процесса сгорания в котельных установках, установлено влияние изменения атмосферных параметров на процесс сгорания, приведены основные отказы судовых котельных установок, признаки отказов и причины их возникновения*

#### **Введение**

Судовые энергетические установки флота рыбной промышленности эксплуатируются в различных районах Мирового океана, отличающихся гидрометеорологическими условиями (барометрическое давление, температура и влажность окружающего воздуха, температура заборной воды, сила и направление ветра, глубина фарватера). При

этом изменяется техническое состояние основных узлов и деталей элементов СЭУ, что приводит к увеличению механических и термических напряжений, величина которых может превысить допустимое значение для длительной и безопасной работы.

Влияние эксплуатационных факторов на работу судовых котельных установок проявляется через барометрическое давление воздуха, температуру и относительную влажность атмосферного воздуха, качество бункеруемого топлива и «человеческий» фактор. Так, например, содержание паров воды в воздухе снижает его количество и, следовательно, уменьшает коэффициент избытка воздуха при сгорании. Повышение температуры воздуха и уменьшение его барометрического давления оказывает такое же влияние на величину коэффициента избытка воздуха при сгорании. Вместе с ухудшением технического состояния топочного устройства и неправильного его размещения, ещё больше нарушается процесс сгорания, увеличивается количество неполных продуктов сгорания, оседающих на поверхностях теплообмена, и при определенных толщинах отложений, являющихся источником возникновения пожаров.

Однако в настоящее время отсутствуют ограничительные характеристики, позволяющие эксплуатировать судовые котельные установки в безопасных условиях. То есть, выдерживать такие режимы их работы (нагрузки), при которых термические напряжения не превышают допустимых значений в условиях эксплуатации. При этом ограничительные характеристики должны быть разработаны как по показаниям штатных измерительных приборов, так и специальной электронной диагностической аппаратуры.

Поэтому при выполнении первого и второго этапов настоящей НИР были разработаны математические зависимости для расчета ограничительных характеристик и проведен подробный анализ основных отказов судовых котельных установок на примере судов калининградского региона и судов транспортного флота.

### *Анализ отказов в судовых паровых котельных установках*

Авария – это убытки судовладельца, опасность мореплавания, предельный стресс членов экипажа и даже возможность человеческих жертв. Поэтому для уменьшения количества аварий направлены усилия по повышению технического состояния судовых технических средств (в них входят и судовые котельные установки), повышению качества технической эксплуатации, повышению техники безопасности при эксплуатации судовых технических средств.

Суда флота рыбной промышленности работают в различных районах Мирового океана. Условия работы отличаются в зависимости от района плавания и времени года. Так, по наблюдениям, барометрическое давление изменяется в пределах 700-780 мм рт. ст., относительная влажность воздуха 60-100%, температура окружающего воздуха от +50 °С до отрицательных температур.

Для обеспечения тепловых напряжений в элементах судовой котельной установки необходимо выдержать соотношение топливо-воздух (коэффициент избытка воздуха при сгорании) и расход воздуха на построечном уровне. При ухудшении технического состояния это отношение следует уменьшить прямо пропорционально снижению барометрического давления и расхода воздуха через котельную установку. В утилизационной котельной установке безопасность работы зависит от качества процесса сгорания протекающего в двигателях. Так как отработавшие газы будут содержать несгоревшие соединения, которые откладываются на поверхности теплообмена. При работе на режимах, близких к номинальному, возможно возникновение пожаров.

В котельной установке, оборудованной топочным устройством, потери давления на режимах близких к номинальным нагрузкам гораздо меньше, чем в двигателях.

Так как требования к чистоте воздуха менее жесткие, из-за отсутствия трущихся поверхностей.

Относительная влажность воздуха представляет из себя отношение парциального давления водяного пара в атмосферном воздухе (соответствующего давлению и его температуре) к парциальному давлению насыщенного пара при этих же параметрах. Влагосодержанием (в качестве второго параметра) является отношение:

$$d = \frac{G_{\text{п}}}{G_{\text{свх}}}, \quad (1)$$

где  $G_{\text{п}}$  и  $G_{\text{свх}}$  -- массы водяного пара и сухого воздуха во влажном, соответственно.

Взаимосвязь между относительной влажностью, температурой воздуха и его влагосодержанием представлена на рисунке 1 [1].

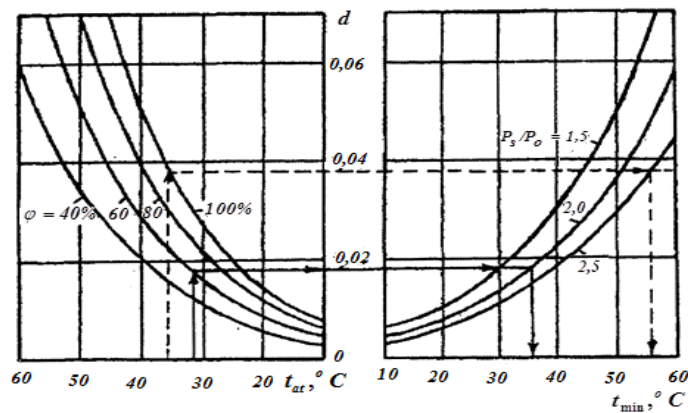


Рис. 1. Определение минимальной температуры наддувочного воздуха, при которой происходит конденсация водяного пара в охладителе воздуха [1]

В умеренных широтах влагосодержание воздуха не превышает 0,01. В то время как, в тропиках – 0,03-0,04 при относительной влажности 80-100%. О количестве воды, содержащейся в воздухе можно судить по рисунку 2 [1] на котором показано влияние давления наддува на количество влаги, конденсирующейся в воздухоохладителях судовых ДВС при работе в тропических условиях.

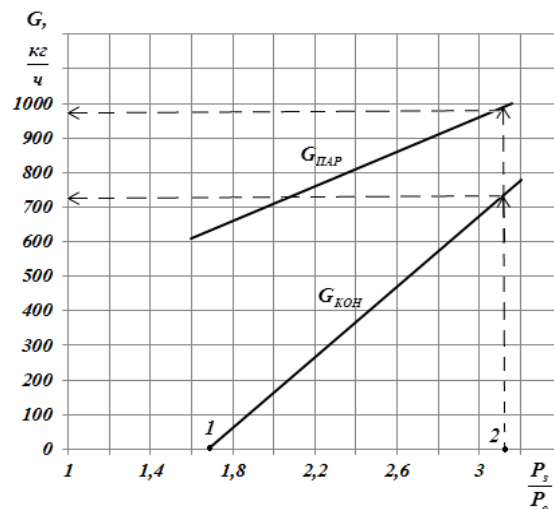


Рис. 2. Выпадение влаги из влажного воздуха при его охлаждении до критических температур



При отсутствии конденсации, воздух, поступающий в котельную установку, содержит меньшее количество кислорода вследствие замещения его части водяными парами. Это можно проследить по известному уравнению

$$G_B = G_B^1 \cdot \frac{(1+d) \cdot (1+\gamma_r)}{(1+1,61 \cdot d) \cdot (1+\gamma_r+d)}, \quad (2)$$

где  $G_B$  и  $G_B^1$  – количество влажного и сухого воздуха, поступающего в двигатель или котельную установку соответственно;

$\gamma_r$  – коэффициент остаточных газов в цилиндре двигателя.

В свою очередь, влияние температуры и давления подаваемого в котел воздуха можно оценить по уравнению состояния:

$$m = \frac{PV}{RT}, \quad (3)$$

где  $P$  – барометрическое давление;

$V$  – объёмная подача воздуха на двигатель;

$R=287$  Дж/(кг·К) – массовая газовая постоянная воздуха;

$T$  – абсолютная температура воздуха.

В котельной установке, в отличие от двигателей, поступающий в топку воздух, не охлаждается. Следовательно, уменьшение расхода сухого воздуха прямо пропорционально его влажности (влагосодержанию). При снижении расхода воздуха температура газов увеличивается с соответствующим ростом температуры тепловоспринимающих поверхностей.

Поэтому во избежание превышения температуры тепловоспринимающих поверхностей сверх допустимых значений необходимо снижать расход топлива пропорционально уменьшению количества кислорода в подаваемом воздухе и повышению его температуры при работе в тропических условиях. То есть:

$$G_T^x = G_T^H \frac{(1+d)(1+\gamma_r)}{(1+1,61 \cdot d)(1+d+\gamma_r)}, \quad (4)$$

где  $G_T^x$  и  $G_T^H$  – соответствующие расходы топлива.

Изменение температуры поступающего в топку воздуха приводит к увеличению его массы, если его температура ниже расчётной, принятой при проектировании котельной установки, или к уменьшению его массы, если температура выше расчётной. Влияние температуры можно проследить по уравнению состояния (3), а суммарное снижение расхода топлива с целью сохранения коэффициента избытка воздуха при сгорании пропорционально снижению массы воздуха поступающего в котел.

Контроль эксплуатации судовых котельных установок осуществляют:

- Российский Морской Регистр Судоходства контролирует техническое состояние котельной установки путём очередных освидетельствований на класс (1 раз в 5 лет) и с ежегодным подтверждением класса;

- внутренний аудитор, внешний аудитор и портовый надзор;

- инспекциями по охране труда и технике безопасности, осуществляющие проверку соблюдения требований по охране труда и технике безопасности при техническом использовании, технических осмотрах и ремонте судовой котельной установки.

Надежность работы судовой котельной установки должна обеспечивать все судовые потребители тепловой энергией в нужном количестве при заданных параметрах на всех режимах работы судна и судовой котельной установки в течении заданного времени.

Для анализа отказов и аварийных ситуаций за основу взяты морские рыболовные траулеры : БАТМ, проект 1288 (Пулковский меридиан) и РТМК-С, проект Атлантик 488 (Моонзунд), а также использованы анализы эксплуатации судовых котельных установок других морских судов флота рыбной промышленности.

Основными причинами аварий и отказов вспомогательных и утилизационных паровых котлов могут быть: нарушение правил технической эксплуатации, технологические дефекты, конструктивные недостатки, дефекты или несоответствие материала, несовершенство методов и организации эксплуатации котлов и всей паропроизводящей установки и другие.

Результаты анализа приведены ниже:

1. Вид отказа: *взрыв газа в топке парового котла (чаще всего при ручном розжиге горения в топке котла).*

Признаки: выброс пламени из топки, резкий хлопок, повреждение газовыпускного тракта или других элементов котла, проявление неплотности со стороны паровой части котла.

Причина: недостаточная вентиляция топки котла, отказ системы автоматического регулирования горения, отказ элементов топочного устройства и арматуры.

2. Вид отказа: *разрыв водогрейных или дымогарных труб.*

Признаки: выход пара из дымовой трубы, при большом разрыве падение давления пара и уровня воды в паровом котле.

Причина: нарушение циркуляции воды в котле, загрязнение нагревательной поверхности накипью, шламом, сажей, гудроном, коксом выше допустимой нормы, некачественное техническое обслуживание и эксплуатация котла и других элементов котельной установки.

3. Вид отказа: *разрыв водогрейных труб после продувания котла (при длительном продувании происходит опрокидывание циркуляции воды в котле).*

Признаки: выход пара из дымовой трубы, быстрое падение давления пара и снижение уровня воды в паровом котле.

Причина: нарушение циркуляции воды в котле вследствие удаления большого количества котловой воды, нарушая «Правила технической эксплуатации судовых вспомогательных паровых котлов», СПб.- Гипрорыбфлот, 1999/2016 год, пункты 4.11 а) и б). 4.11.

4. Вид отказа: *«вскипание» воды в котле.*

Признаки: резкое колебание воды в водомерных колонках.

Причина: образование пленки на «зеркале» котла, не соблюдение режима верхнего продувания.

5. Вид отказа: *«упуск» воды в котле.*

Признаки: в водомерных колонках отсутствует уровень воды и при их продувании уровень воды не появляется, при открытии пробного крана нижнего уровня воды в котле из него идет сухой пар и слышен свист.

Причина: отсутствие питательной воды в теплом ящике, отказ питательного насоса по механической части или электроприводе, неполадки в системе автоматического управления питания котла водой (САРП), перегрев питательной воды в теплом ящике, большая утечка питательной воды (разрыв трубопровода, выдавило прокладку между фланцами и т.д.), отказ невозвратного клапана на питательной системе котла.

6. Вид отказа: *касание пламенем задней стенки футеровки, пламя шарообразной формы, закоксовывание форсунки и топочного устройства.*

Признаки: касание пламенем задней стенки футеровки или других элементов котла, пламя вытянуто или шарообразно, пламя не прозрачно.

Причина: некачественно смонтировано топочное устройство.

7. Вид отказа: Пламя в топке искривлено.

Признаки: центр пламени отклонен от центральной оси, возможно касание элементов котла.

Причина: не качественная работа форсунки, засорение отверстия распылителя.

8. Вид отказа: *разрушение футеровки (кирпичной кладки) котла.*

Признаки: местного повышения температуры наружной изоляции корпуса котла, при осмотре футеровки обнаружение шлакоразъедания, растрескивания под действием температурных напряжений, расплавление, деформации, откалывание и местные выгорания.

Причина: температура газов в районе футеровки превышает 1700 °С или медленное разрушение кирпичной кладки при температуре газов более 1500 °С.

9. Вид отказа: *пожар в хвостовых поверхностях нагрева котла или горение в дымовой трубе.*

Признаки отказа: резкое увеличение температуры обшивки, выброс пламени и искр из дымовой трубы.

Причина: отложение сажи, гудрона и кокса при малых нагрузках и возгорание при повышении нагрузки на котел.

10. Вид отказа: *нарушение циркуляции воды в паровом котле.*

Признаки отказа: выход пара из дымовой трубы, при большом разрыве падение давления пара и уровня воды в паровом котле.

Причина: нарушение технологии проведения верхнего или нижнего продувания. В инструкции по продуванию котла сказано только о проведении верхнего и нижнего продувания, но не указана сама процедура. Паровые котлы имеются различные конструкции, различную производительность и различное давление пара, различные системы автоматизации питания котла водой.

11. Вид отказа: *выброс пламени из топки при ручном розжиге.*

Признаки отказа: выброс пламени из топки при ручном розжиге и возможен хлопок.

Причина: скопление топлива в топке или недостаточная вентиляция топки перед розжигом.

### ***Общие рекомендации по уменьшению отказов и аварийных ситуаций***

1. Российскому морскому регистру судоходства предлагается ввести требования (по предельному давлению пара в котле, по высокому и низкому уровню воды в котле, обрыву факела и низкому давлению подачи воздуха в топку) защиту от предельной температуры горения в топке (у футеровки не должна превышать 1500 °С).

2. В учебных заведениях восстановить технические лаборатории утраченные во время «перестройки».

3. Возобновить издательством ГИПРОРЫБФЛОТА или организовать другое издательство регулярных выпусков «Безопасности мореплавания и ведения промысла». В выпусках подробно анализировались отказы и аварийные ситуации и рекомендовались меры по их предупреждению. Оно необходимо морским специалистам, учебным заведениям, береговым морским службам и многим другим специалистам.

## Заключение

1. Проведен анализ условий эксплуатации и факторов, влияющих на качество процесса сгорания, от которого зависит эффективность теплообмена и надежность работы котельной установки.

2. Установлено, что с целью обеспечения качественного процесса сгорания и надежности элементов судовой котельной установки необходимо учесть снижение коэффициента избытка воздуха при сгорании соответственно повышению температуры, относительной влажности и барометрического давления атмосферного воздуха сравнительно с расчетными значениями при создании котельной установки, т.е. нагрузка котельной установки должна корректироваться.

3. Проведен анализ отказов вспомогательных котельных установок судов флота рыбной промышленности и транспортных судов.

4. Установлено, что отказы судовых вспомогательных котельных установок водотрубного типа можно классифицировать по следующим направлениям: качество процесса сгорания и водоподготовки, несоблюдение правил технической эксплуатации, конструктивные и технологические недостатки.

5. С целью уменьшения воздействия «человеческого фактора» на качество эксплуатации судовых котельных установок необходимо улучшить качество обучения экипажей судов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Возницкий, И.В. Судовые двигатели внутреннего сгорания / И.В. Возницкий, А.С. Пунда. – Т. 2. – М.: Моркнига, 2010.-264 с.

2. Денисенко, Н.И. Судовые котельные установки: учебник / Н.И. Денисенко, И.И. Костылев. – СПб.: ЭЛМОР, 2005. – 286 с.

## ANALYSIS OF THE QUALITY OF OPERATION OF AUXILIARY BOILERS VESSELS OF THE FISHING INDUSTRY FLEET

Braznovsky Victor Krishevich, Associate Professor  
Tomilko Vladimir Timofeevich, Senior Lecturer

Baltic fishing fleet state academy FSBEI HE "KSTU", Kaliningrad, Russia,  
e-mail: seu@bga.gazinter.net; seu@bga.gazinter.net

*The analysis of the combustion process in boiler plants has been carried out, the effect of changes in atmospheric parameters on the combustion process has been established, the main failures of ship boiler plants, the signs of failures and the causes of their occurrence are given.*

## ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ МОДЕЛЕЙ РАСЧЁТА ВЫБРОСОВ УГЛЕРОДА

Глазков Дмитрий Юрьевич, ст. преподаватель  
Исаева Марина Васильевна, ассистент кафедры

Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО  
«КГТУ», Калининград, Россия, e-mail: seu@bga.gazinter.net

*Рассмотрены виды погрешностей и их влияние на результаты эксперимента. Представлено выражение, в явном виде учитывающее влияние ряда эксплуатационных факторов на эмиссию углерода с отработавшими газами ДВС. На основании представленного выражения разработаны модели, позволяющие диагностировать техническое состояние двигателя по величине выбросов углерода с отработавшими газами*

Различаются погрешности систематические и случайные. Погрешности систематические обусловлены следующими факторами: неточностью передаточных функций от двигателя к прибору, неравномерностью отдельных рабочих циклов, неточностью регулировки топливной аппаратуры и фаз газораспределения по цилиндрам и их неравномерным нагружением, а также погрешностями изготовления измерительных приборов [1].

Неточная регулировка фаз газораспределения и топливной аппаратуры по цилиндрам приводит к неравномерному их нагружению и появлению продольных колебаний коленчатого вала. Такого рода колебания приводят к непостоянству частоты вращения коленчатого вала. А неравномерность частоты вращения, в свою очередь, - к неравномерности показаний контрольно-измерительных приборов [1,2].

Систематические погрешности также зависят и от того, в каком режиме проводятся измерения. В статическом (установившемся) режиме производятся измерения величин, значения которых со временем не меняются либо меняются незначительно. При испытаниях двигателей к статическим можно отнести измерения расходов топлива, воздуха, охлаждающей воды и смазочного масла, температур и давлений воды, масла и воздуха, концентрации компонентов отработавших газов [1,2]. Чтобы режим измерений был статическим необходимо, чтобы двигатель вышел на установившийся режим работы. Установившийся режим работы двигателя характеризуется неизменными во времени величинами следующих параметров: частоты вращения коленчатого вала (в зависимости от назначения двигателя могут наблюдаться её колебания в пределах до 0,5...1%) и температур: газов перед и после турбины, масла и воды на выходе из двигателя. Время выхода двигателя на режим зависит от массы его деталей и оговаривается в инструкции завода-изготовителя или в Правилах технической эксплуатации [3]. Оно обычно составляет от 2-3 минут для высокооборотных двигателей до нескольких часов для малооборотных.

Если при работе двигателя какая-либо измеряемая величина не имеет постоянного значения, то её измерение происходит в динамическом режиме, что вносит в результат измерения погрешность динамическую. К величинам, измеряемым в динамическом режиме, относятся, например, показатели рабочего процесса: максимальные давления сжатия и сгорания, температура рабочего тела в цилиндре, давление топливоподачи. Динамическая погрешность является результатом инерционности датчиков измерительных приборов, а также соответствия их чувствительности и быстроты изменения

измеряемой величины [1]. Под инерционностью датчика либо измерительного прибора следует понимать расхождение по времени между изменением измеряемой величины и откликом прибора на него. В результате измеренное значение величины и форма её зависимости от времени (угла поворота коленчатого вала) будут отклоняться от истинных.

Таким образом, зная закономерности протекания процессов в двигателе, а также характеристики и конструктивные особенности применяемых приборов, можно либо устранить систематическую погрешность из измерений, либо ограничить её влияние на них.

Если влияние систематических погрешностей на результат измерений можно учесть и ограничить либо устранить, то влияние погрешностей случайных такого рода учёту не поддаётся. Случайные погрешности [1,2] влияют на точность измерений значительно, поскольку неизвестно, с какой вероятностью и на какую величину будет погрешность и какое из измеренных значений величины следует принять за эталонное её значение.

По мере увеличения числа измерений влияние неустранённых систематических погрешностей начинает преобладать над погрешностями случайными. Поэтому в практике испытаний двигателей обычно ограничиваются 5-10 измерениями в серии, а при снятии и обработке индикаторных диаграмм – 30 измерениями [3].

Многие величины, определяемые при испытаниях и в эксплуатации двигателей, не поддаются непосредственному измерению либо их измерение затруднительно и требует специальной аппаратуры. Для определения таких величин выполняются косвенные измерения, то есть их значения вычисляются на основании результатов измерений других параметров. Так, значение среднemasсовой температуры газов в цилиндре в какой-либо момент рабочего процесса может быть оценено при помощи уравнения состояния и индикаторной диаграммы на основании значений давления и соответствующего объёма цилиндра.[1] Аналогичная картина наблюдается и в отношении величин, приводимых к единице мощности двигателя: удельных расходов масла, топлива и воздуха, а также выбросов каких-либо компонентов отработавших газов, в частности, углерода и оксидов азота.

Применяемые для замеров состава отработавших газов газоанализаторы и дымомеры, например ГИАМ и СМОГ-1, измеряют либо дымность отработавших газов (их показатель поглощения света в %), либо концентрацию веществ в отработавших газах (в мг/л или г/м<sup>3</sup>). Такие замеры требуют дополнительного определения расхода отработавших газов двигателем и приведения полученных значений к единице вырабатываемой двигателем мощности.

Для перехода от измеряемой дымности к объёмной концентрации углерода может быть рекомендовано выражение, предложенное британским научно-исследовательским центром MIRA [4]:

$$c = 10^{-6} \cdot N^3 - 2 \cdot 10^{-5} \cdot N^2 + 2.4 \cdot 10^{-3} \cdot N + 0.0041 \quad (1)$$

где  $c$  – концентрация углерода в отработавших газах, г/м<sup>3</sup>,  $N$  – показатель дымности, приведённый к измерительной базе дымомера 0,43 м.

Зная расход воздуха через двигатель, можно определить количество отработавших газов по выражению [5]:

$$V_{OG} = \beta V_{возд} \quad (2)$$

где  $V_{OG}$  и  $V_{возд}$  – объёмные расходы воздуха и отработавших газов,  $\beta = 1,03 \dots 1,04$  – коэффициент молекулярного изменения.

Таким образом, значение удельной эмиссии оксидов азота и углерода с отработавшими газами двигателя вычисляется по результатам двух измерений: концентрации этих веществ в отработавших газах и расхода воздуха через двигатель.

В общем виде такого рода зависимость можно представить выражением:

$$m(c, NOx) = f(c, V_{возд}) \quad (3)$$

где  $m(c, NOx)$  – удельная эмиссия углерода и оксидов азота, г/(кВт\*ч);  $c$  – концентрация данных компонентов в отработавших газах, г/нм<sup>3</sup>,  $V_{возд}$  – объёмный расход воздуха через двигатель, нм<sup>3</sup>/ч.

Каждый из аргументов, фигурирующих в выражении (3), определяется с некоторой погрешностью, но конкретный вклад каждой погрешности зависит от вида функции (3) [1].

Чтобы получить функцию вида (3), необходимо определить относительное изменение величины выбросов [6] согласно нижеприведённого выражения:

$$c_{п} = c_{э} \left(\frac{J_{сэ}}{J_{сн}}\right)^{0,4} \left(\frac{d_{сэ}}{d_{сн}}\right)^{0,8} \left(\frac{g_{цэ}}{g_{цн}}\right)^{-0,4} \left(\frac{p_{тэ}}{p_{тн}}\right)^{0,3} \left(\frac{c_{э}}{c_{н}}\right)^{0,08} \left(\frac{\tau_{зэ}}{\tau_{зн}}\right)^{-0,12} \left(\frac{n_{э}}{n_{н}}\right)^{-0,12} \left(\frac{z_{э}}{z_{н}}\right)^{0,12} \left(\frac{\alpha_{э}}{\alpha_{н}}\right)^{-0,08} \left(\frac{Q_{нэ}^p}{Q_{нн}^p}\right)^{-0,1} \quad (4)$$

где  $J_c$  и  $d_c$  – число и диаметр сопловых отверстий распылителя;  $g_{ц}$  – цикловая подача топлива;  $p_m$  – среднее давление топлива в процессе впрыска;  $\tau_z$  – продолжительность процесса сгорания;  $n$  – частота вращения коленчатого вала;  $z$  – тактность ДВС;  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха при сгорании;  $C$  – геометрический показатель рабочего процесса по методу профессора В.И. Одинцова [7];  $Q_{нэ}^p$  и  $Q_{нн}^p$  – теплотворные способности топлив.

Геометрический показатель рабочего процесса по методу В.И. Одинцова определяется по выражению:

$$C = \frac{tg \gamma_n (1 / \cos \gamma_n + tg \gamma_n)}{tg \gamma_э (1 / \cos \gamma_э + tg \gamma_э)} \quad (5)$$

где  $\gamma$  – угол раскрытия топливного факела.

При сравнении двигателей одного класса (двух– либо четырёхтактных), а также при использовании одного сорта топлива соответствующие множители в (4) принимаются равными единице:

$$\frac{c_{э}}{c_{н}} = const \cdot \left(\frac{g_{цэ}}{g_{цн}}\right)^{-0,4} \left(\frac{p_{тэ}}{p_{тн}}\right)^{0,3} \left(\frac{c_{э}}{c_{н}}\right)^{0,08} \left(\frac{\tau_{зэ}}{\tau_{зн}}\right)^{-0,12} \left(\frac{n_{э}}{n_{н}}\right)^{-0,12} \left(\frac{\alpha_{э}}{\alpha_{н}}\right)^{-0,08} \quad (6)$$

Таким образом, с помощью выражения (6) определяется поле возможного изменения значения выбросов углерода при цикловых подачах, соответствующих различным режимам нагружения двигателя по нагрузочной характеристике. Цикловая подача через расход топлива определяется следующим общеизвестным выражением [5]:

$$g_e = g_{цi} n z / N_e \quad (7)$$

где  $i$  – число цилиндров двигателя,  $N_e$  – его эффективная мощность,  $g_e$  – удельный эффективный расход топлива.

Выражения (4) и (6) могут быть применены:

- при проектировании и модернизации двигателей;
- для моделирования влияния на эмиссию углерода эксплуатационных факторов в судовых условиях;
- для диагностирования качества протекания рабочего процесса двигателя.

Чтобы проверить адекватность предложенной модели (6) была получена зависимость отношения выбросов углерода для двух двигателей их от цикловых подач, показанная на рисунке 1. При этом двигатель 1Ч 17,5/24 (1NVD24) принят за эталон (индекс «э»), а на рисунке 2 за эталон принят высокооборотный двигатель 8Ч12/12 (КамАз 740.10).

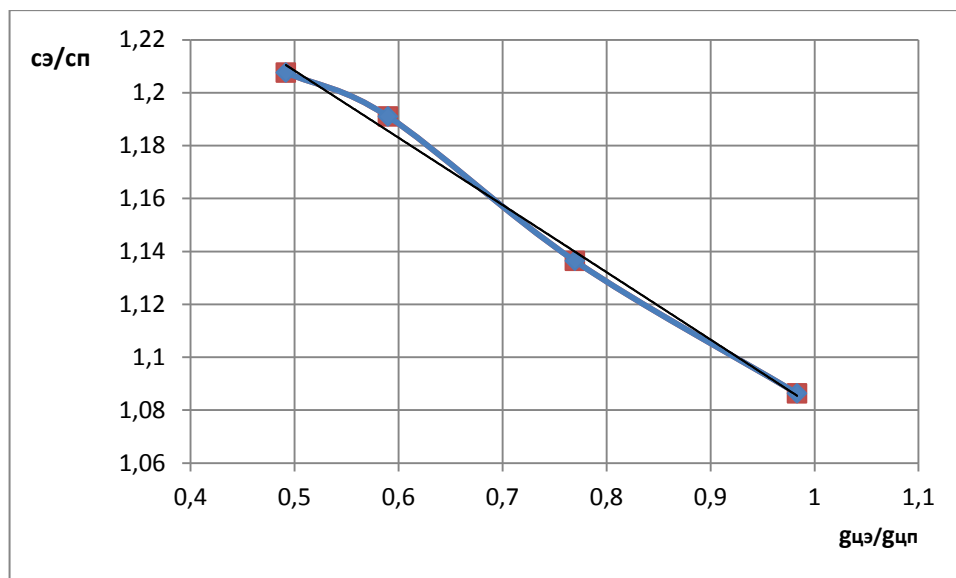


Рис. 1. Зависимость отношения выбросов углерода от отношения цикловых подач: индекс «э» - двигатель 1Ч 17,5/24 (1NVD24), индекс «п» - двигатель 6ЧН18/22 (Хабаровец)

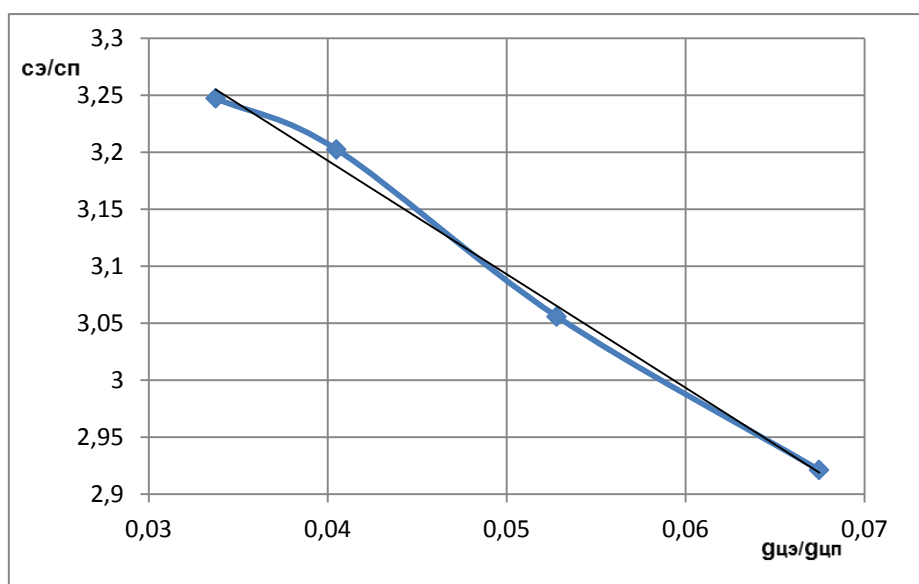


Рис. 2. Зависимость отношения выбросов углерода от отношения цикловых подач: индекс «э» - двигатель 8Ч12/12 (КамАз 740.10), индекс «п» - двигатель 6ЧН18/22 (Хабаровец)



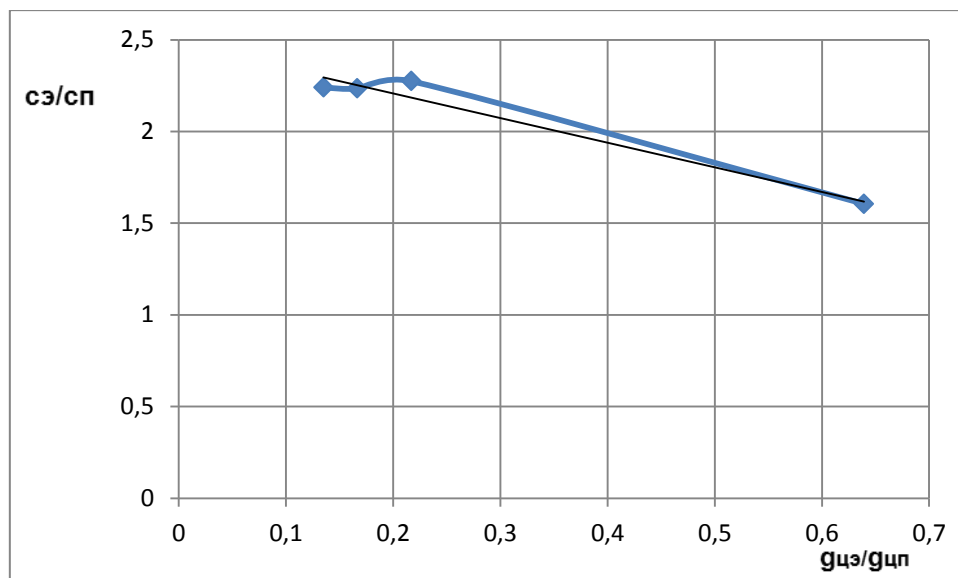


Рис. 3. Зависимость отношения выбросов углерода от отношения цикловых подач: индекс «э» - двигатель 8Ч12/12 (КамАЗ 740.10), индекс «п» - двигатель 6ЧН12,8/15,5 (MAN D 2866)

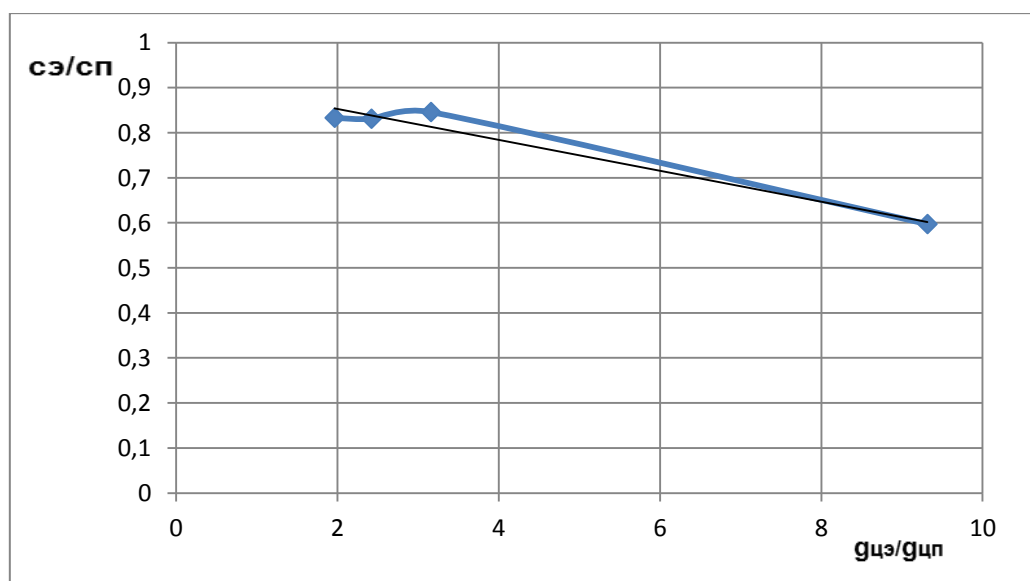


Рис. 4. Зависимость отношения выбросов углерода от отношения цикловых подач: индекс «э» - двигатель 1Ч 17,5/24 (INVD24), индекс «п» - двигатель 6ЧН12,8/15,5 (MAN D 2866)

Зависимость, показанная на рисунке 1, близка к линейной с достоверностью  $R^2=0,994$ :

$$c_{э}/c_{п} = -0,2543(g_{цэ}/g_{цп}) + 1,3355 \quad (8)$$

При выборе другой пары двигателей картина получается аналогичной. Величины коэффициентов в выражении (8) определяются параметрами рабочего процесса и конструктивными особенностями исследуемых двигателей. Коэффициент ранговой корреляции при разных эталонных двигателях не меняется.

Для пары двигателей 8Ч12/12 (КамАЗ 740.10) и 6ЧН12,8/15,5 (MAN D 2866) зависимость выбросов углерода от цикловой подачи показана на рисунке 3, а на рисунке 4 для пары двигателей 1Ч 17,5/24 (INVD24) и 6ЧН12,8/15,5 (MAN D 2866). На рисунке 3

параметры двигателя КамАз приведены с индексом «э», а двигателя MAN – с индексом «п».

Уравнение типа (8) для этой пары двигателей примет вид:

$$c_{э}/c_{п} = -1,3426(g_{цэ}/g_{цп}) + 2,4766 \quad (9)$$

В различных парах исследованных двигателей значение коэффициента ранговой корреляции изменялось в пределах от 0,963 до 0,994. Такие значения коэффициента ранговой корреляции говорят о том, что величина погрешности при расчёте по уравнениям (8) и (9) незначительна.

Модели, представленные уравнениями (8) и (9), разработанные на основании метода профессора В.И. Одинцова [7], могут быть применены для диагностики технического состояния двигателя. Для этого необходимо получить для диагностируемого двигателя функцию вида (8)-(9) в графической либо аналитической форме. Отклонение фактической величины выбросов углерода от вычисленной по полученным графику и уравнению, превышающее 5%, говорит о появлении неисправности в топливной аппаратуре или системе наддува двигателя.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пахомов, Ю.А. Основы научных исследований и испытаний тепловых двигателей / Ю.А. Пахомов. – М.: «Транслит», 2014. – 432 с.
2. Крутов, В.И. Основы научных исследований / В.И. Крутов. – М.: «Просвещение», 1989. – 400 с.
3. Правила технической эксплуатации дизелей. – СПб.: «Гипрорыбфлот», 1999. – 90 с.
4. Одинцов, В.И. Некоторые закономерности образования сажи в цилиндрах судовых дизелей / В.И. Одинцов, Д.Ю. Глазков // Вестник АГТУ. Сер. Морская техника и технология. – 2014. – № 3. – С. 83-87.
5. Ваншейдт, В.А. Судовые двигатели внутреннего сгорания / В.А. Ваншейдт. – Л.: Судостроение, 1977. – 392 с.
6. Одинцов, В.И. Алгоритм моделирования показателей, характеризующих условия безопасной эксплуатации дизелей рыбопромыслового флота / В.И. Одинцов, Д.Ю. Глазков, Н.В. Свиридюк // Сборник IAMU. – Варна, 2017. – С. 470-480.
7. Одинцов, В.И. Рабочий процесс судовых ДВС: монография / В.И. Одинцов. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2010. – 135 с.

### ESTIMATION OF ERRORS IN CARBON EMISSION CALCULATION MODELS

Glazkov Dmitry Yurievich, Senior lecturer  
Isaeva Marina Vasilievna, Assistant

Baltic fishing fleet state academy FSBEI HE "KSTU", Kaliningrad, Russia,  
e-maseu@bga.gazinter.net

*The article considers the types of errors and their influence on the results of the experiment. An expression that explicitly takes into account the influence of a number of operational factors on the emission of carbon with exhaust gases of ICE is presented. On the basis of the presented expression, models have been developed that allow to diagnose the technical state of the engine by the amount of carbon emissions with its exhaust gases.*

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УТИЛИЗАЦИИ ДВУОКСИ УГЛЕРОДА СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Иванов Роман Александрович, профессор, д-р техн. наук  
Арсеньев Юрий Николаевич, начальник отдела  
Копытов Юрий Васильевич, ведущий инженер

ФГУП «Крыловский государственный научный центр»,  
г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: krylov@ksrc.ru

*Представлено описание разработанной математической модели судовой системы утилизации двуокиси углерода, численный анализ которой позволит изучать нестационарные режимы её работы как в условиях нормальной эксплуатации, так и при анализе возможных аварийных ситуаций*

### Введение

Рассматриваемая система предназначена для утилизации двуокиси углерода, образующейся при работе судовых воздухонезависимых энергетических установок, использующих углеводородное топливо либо непосредственно в тепловых двигателях замкнутого цикла, либо при его конвертации для получения водорода, применяемого далее в электрохимических генераторах.

Под термином утилизация в настоящей работе условно понимается технологический процесс, обеспечивающий одну из следующих возможностей или их комбинацию:

- накопление и размещение в специальных системах на борту подводных объектов двуокиси углерода или продуктов ее взаимодействия с различными химическими реагентами;
- сжатие газообразной двуокиси углерода до значений, достаточных для удаления её в окружающее пространство.

Областью применения системы утилизации двуокиси углерода (СУДУ) являются объекты морской техники, к которым относятся, в первую очередь, неатомные подводные лодки (НАПЛ) и подводные аппараты (ПА) различного назначения.

Исторически предпринималось несколько попыток создания воздухонезависимой энергетической установки (ЭУ), оснащенной системой утилизации отходящих газов сгорания углеводородного топлива в среде кислорода, состоящих главным образом из двуокиси углерода [1].

В установке РЕДО (регенеративный единый двигатель особого назначения) дизель в надводном положении подводной лодки работает на атмосферном воздухе, а в подводном - по замкнутому циклу, в котором выхлопной газ проходит через газоохладитель, где происходит его охлаждение, после чего к газу добавляется чистый кислород и смесь подается в дизель. При этом удаление излишков двуокиси углерода в газообразной фазе из контура осуществляется компрессором, приводимым от коленчатого вала дизеля. С целью исключения газовой заметности подводного объекта предусматривается сжижать газ и хранить в баллонах высокого давления.

В цикле ЕД-ХПИ (единый двигатель с известковым химвсасывателем) двуокись углерода из выхлопного газа удаляется с помощью специальных поглотителей, вступая в химическую реакцию со щелочью.

В основу работ установки ЕД-ВВД (единый двигатель с выхлопом в воду дизельный) легли данные о том, что углекислый газ может хорошо растворяться не только в пресной, но и в соленой воде. После охлаждения выхлопного газа и добавки к нему кислорода газокислородная смесь возвращается непосредственно во всасывающий коллектор дизеля. Избыток выхлопного газа, не используемого в смеси, еще до присадки кислорода непрерывно откачивается из замкнутого газопровода компрессором высокого давления за борт через насадку в струю гребного винта.

В настоящей работе для утилизации продуктов сгорания углеводородного топлива в среде кислорода рассматривается схема, схожая с РЕДО. Накопление двуокиси углерода происходит в специальной емкости, при этом охлаждение углекислого газа осуществляется путем передачи его тепла кислороду, подающегося из криогенной системы хранения жидкого кислорода к потребителям. Таким образом, параллельно решаются две задачи: во-первых, это подогрев кислорода от уровня криогенных температур до требуемых рабочих значений, и, во-вторых, охлаждение углекислого газа до температур, при которых возможно его ожижение.

Перспективность данной системы подтверждена расчетными исследованиями, проведенными ранее, в результате которых была разработана принципиальная схема системы утилизации углекислого газа и выполнены стационарные расчеты основных параметров, позволившие определить технические характеристики необходимого комплектующего оборудования [2,3,4].

Вместе с тем процесс ожижения углекислого газа и накопления его в специальной емкости в жидком состоянии по своей природе нестационарен. Поэтому целью настоящей статьи является описание разработанной авторами математической модели СУДУ, численный анализ которой позволит изучать нестационарные режимы функционирования рассматриваемой системы, как в условиях нормальной эксплуатации, так и при анализе возможных аварийных ситуаций.

### **Описание принципиальной схемы системы утилизации двуокиси углерода**

На рисунке 1 представлена принципиальная схема системы утилизации двуокиси углерода, которая включает два основных контура: контур отходящих газов и кислородный. Схема содержит следующие основные элементы.

- Компрессор отходящих газов (КОГ), посредством которого осуществляется отбор отходящих газов от энергетической установки, прокачка его через контур охлаждения и конденсации двуокиси углерода и подачи в цистерну накопления  $\text{CO}_2$  (Ц $\text{CO}_2$ ). Предполагается, что состав отработавших газов, отбираемых от ЭУ состоит из двуокиси водорода, кислорода и паров воды.

- Газоводяной теплообменный аппарат охлаждения отходящих газов (ТОГ1), в котором реализуется первая ступень снижения температуры газовой смеси. Теплообменный аппарат выполнен в виде трубчатого поверхностного теплообменника: охлаждающая среда (вода) течет внутри трубок, а отходящие газы – в межтрубном пространстве.

- Осушитель (ОС) отходящих газов после теплообменника (ТОГ1), призванный обеспечить полную очистку отходящих газов от воды. Принимается, что за этим элементом отходящие газы включают только два компонента: ~ 98% - двуокись водорода в газовой фазе и ~ 2 % газообразного кислорода.

- Теплообменный аппарат второй ступени охлаждения отходящих газов (ТОГ2), конструктивно выполненный по схеме «труба в трубе». Во внутренней трубе движется отходящий газ, в кольцевом зазоре – газообразный кислород кислородного контура системы утилизации.

- Конденсатор двуокиси углерода (КУГ1), в котором осуществляется снижение параметров двуокиси углерода до параметров ожижения. Конструктивно теплообменник выполнен по схеме «труба в трубе». Во внутренней трубе движутся отходящие газы, в кольцевом зазоре – газообразный кислород основного кислородного контура.

- Сепаратор (СП1) обеспечивает разделение жидкой и газообразных сред отходящих газов. Газообразная фаза поступает в конденсатор двуокиси углерода (КУГ2), а жидкая двуокись углерода направляется в цистерну накопления (ЦСО<sub>2</sub>).

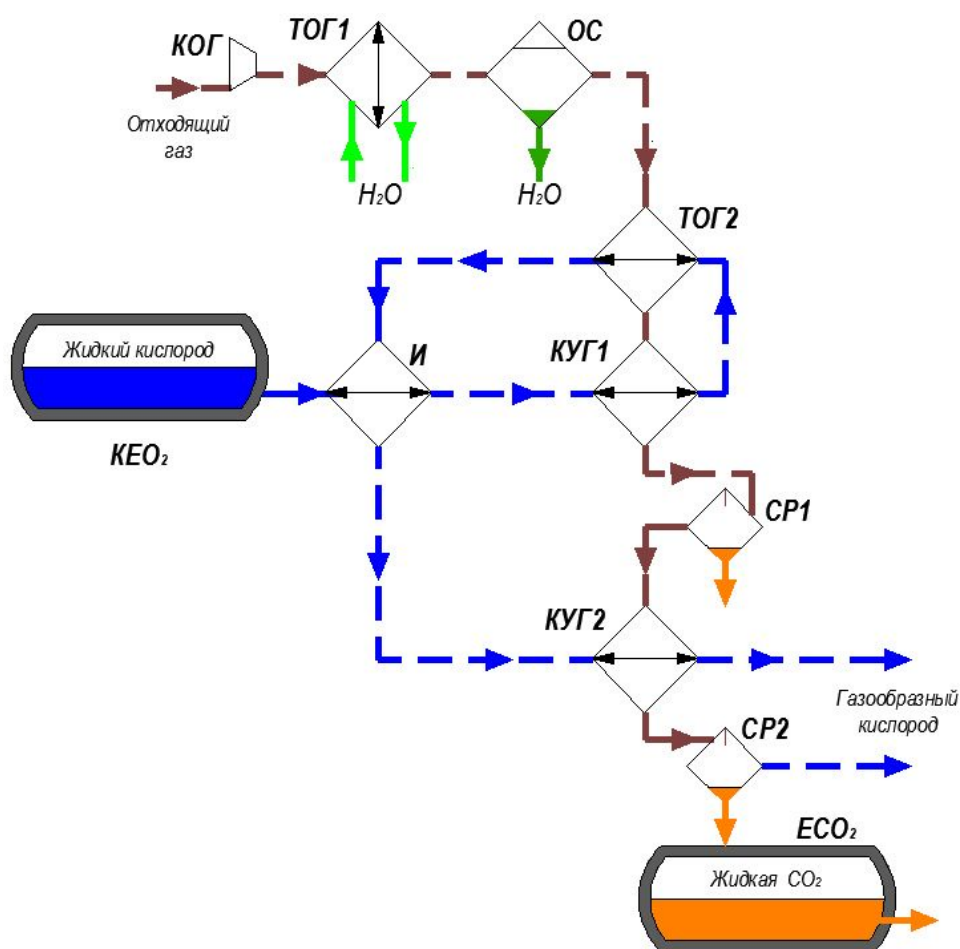


Рис. 1. Принципиальная схема системы утилизации двуокиси углерода

- Конденсатор двуокиси углерода (КУГ2), в котором осуществляется ожижение не сконденсировавшейся в конденсаторе (КУГ1) двуокиси углерода. По конструктивному исполнению (КУГ1) и (КУГ2) – идентичны.

- Из сепаратора (СП2) остатки не сконденсировавшейся двуокиси углерода и сопутствующего кислорода возвращаются в систему подачи кислорода энергетической установки, а сжиженная двуокись углерода направляется в цистерну накопления (ЕСО<sub>2</sub>).

- Накопительная емкость сжиженной двуокиси углерода (ЕСО<sub>2</sub>).

- Криогенная емкость жидкого кислорода (КЕО<sub>2</sub>).

- Испаритель (И) жидкого кислорода. Функционально предназначен для испарения жидкого кислорода. Конструктивно исполнен в виде теплообменного аппарата типа «труба в трубе». Во внутренней трубе движется газообразный кислород, поступающий из теплообменного аппарата второй ступени охлаждения отходящих газов (ТОГ2), в кольцевом зазоре - испаряющийся кислород, поступающий из цистерны запаса кислорода (КЕО<sub>2</sub>).

Движение рабочих сред (кислород и отходящий газ) осуществляется следующим образом.

#### ***Контур отходящего газа***

После газового компрессора и полной очистки в осушителе (ОС) от паров воды, отходящий газ с параметрами, контролируемые датчиками давления, температуры и расхода поступает в теплообменный аппарат второй ступени охлаждения отходящих газов (ТОГ2), в котором происходит предварительное охлаждение газа до температуры, близкой к температуре конденсации СО<sub>2</sub> при текущем давлении. Перед теплообменником стоит предохранительный клапан, который не допускает обратных выбросов двуокиси углерода. Охлаждение осуществляется газообразным кислородом кислородного контура, поступающим из конденсатора двуокиси углерода (КУГ1).

В конденсаторах двуокиси углерода (КУГ1) и (КУГ2), соединенных последовательно по контуру отходящего газа, происходит охлаждение двуокиси углерода до температуры ниже температуры конденсации СО<sub>2</sub>, в результате чего последняя выделяется в виде жидкой фракции. Охлаждение в конденсаторе (КУГ1) осуществляется газообразным кислородом, поступающим из кольцевого зазора испарителя (И), а в конденсаторе (КУГ2) – газообразным кислородом, поступающим из внутренних трубок испарителя (И).

Отсепарированная в сепараторе (СР1) жидкая фаза двуокиси углерода сливается в емкость хранения жидкой СО<sub>2</sub>, а оставшиеся отходящие газы поступают в конденсатор (КУГ2). На выходе из конденсатора отходящий газ поступает в сепаратор (СР2), из которого сжиженный углекислый газ направляется в емкость (ЕСО<sub>2</sub>).

На трубопроводах слива жидкой двуокиси углерода в накопительную емкость (ЕСО<sub>2</sub>) устанавливаются предохранительные клапаны для исключения обратного выброса СО<sub>2</sub> в контур отходящего газа.

Оставшиеся газовые компоненты отходящего газа, состоящие из кислорода и несконденсированной двуокиси углерода направляются в контур подачи кислорода к потребителям энергетической установки.

#### **Контур кислорода.**

Жидкий кислород подается из криогенной емкости (КЕО<sub>2</sub>) в испаритель кислорода (И). Расход кислорода контролируется расходомером, а параметры - датчиками температуры и давления. Перед расходомером расположен предохранительный клапан, исключаящий обратный выброс кислорода в цистерну.

В испарителе (И) кислород испаряется, получая необходимое для этого количество теплоты от уже испаренного и подогретого в конденсаторе (КУГ1) и теплообменнике (ТОГ2) газообразного кислорода. Далее испаренный кислород поступает в конденсатор (КУГ1), теплообменник (ТОГ2), в испаритель (И), в конденсатор (КУГ2) и на вход к потребителям энергетической установки.

Работоспособность системы ожижения двуокиси углерода посредством передачи тепла от смеси отходящих газов к газифицируемому и нагреваемому кислороду, который направляется из криогенной цистерны к потребителям ЭУ, подтвержденная соответствующими стационарными расчетами, достигается при соблюдении условий (1) и (2):

$$G \cdot (I^{BX} - I^{ВЫХ}) = D \cdot (i^{ВЫХ} - i^{BX}) \quad (1)$$

$$T > t \quad (2)$$

Где:

$G$  [кг/ч] – расход отходящего газа;

$I^{ВХ}, I^{ВЫХ}$  [кДж/кг] – теплосодержание отходящего газа соответственно на входе и выходе из зоны теплопередачи;

$D$  [кг/ч] – расход кислорода к потребителям ЭУ;

$i^{ВЫХ}, i^{ВХ}$  [кДж/кг] – теплосодержание кислорода на входе и выходе из зоны теплопередачи;

$T, t$  [К] – температура соответственно отходящего газа и кислорода.

Результаты одного из вариантов стационарного расчета представлены на рисунке 2.

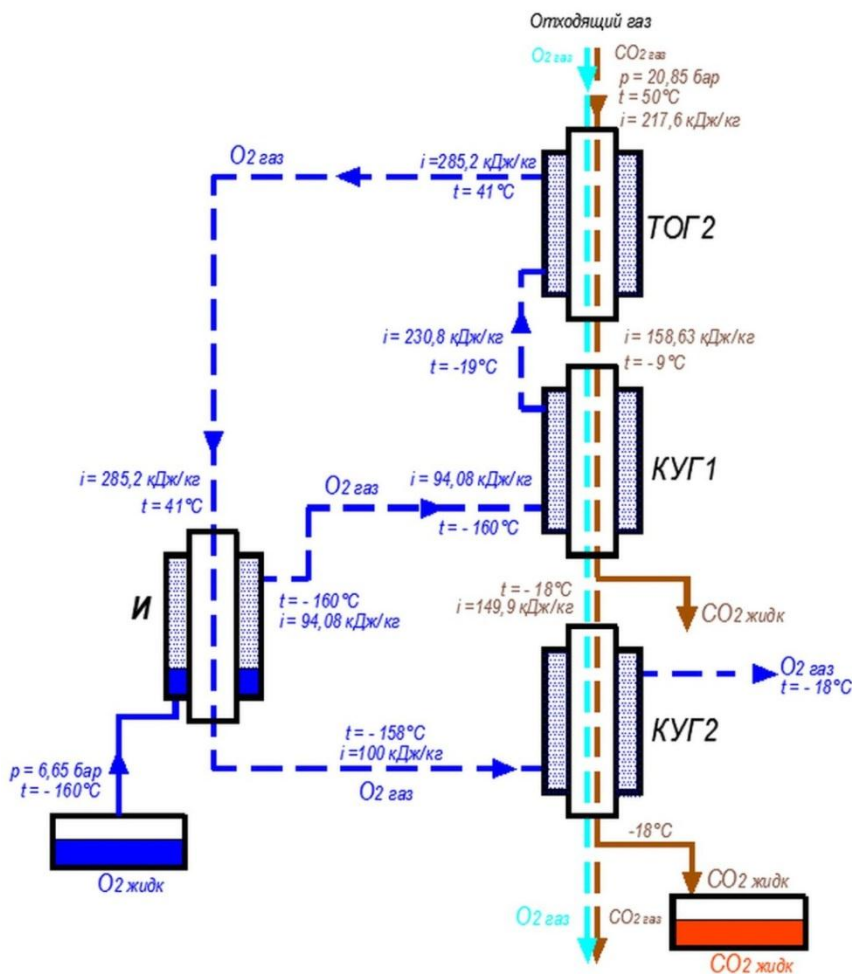


Рис. 2. Результаты расчета тепловых потоков и параметров элементов системы утилизации двуокиси углерода

### Особенности работы системы утилизации двуокиси углерода

Анализ результатов выполненных стационарных расчетов различных вариантов исходных параметров отходящего газа на входе (температура, давление, расход, массовое содержание двуокиси водорода и сопутствующего кислорода) и параметрам криогенного кислорода (температура, давление, суммарный запас) показывает, что необходимость соблюдения условий (1, 2) для системы в целом и для каждого теплообменного

аппарата в отдельности, должно соблюдаться и при любых эксплуатационных изменениях входных параметров отходящих газов.

Наиболее глубокие изменения этих параметров можно ожидать в следующих режимах: пуск, остановка, скачкообразное изменение нагрузки и др. При этом, с учетом реальной инерционности протекания рассматриваемых процессов, может происходить нарушение условий (1, 2) в отдельных элементах системы и, как следствие, изменение выходных параметров кислорода, подаваемого к потребителям энергетической установки в целом.

Другим следствием нарушения условий (1, 2) может быть и изменение текущих параметров двуокиси углерода, подаваемой в накопительную емкость ( $\text{CO}_2$ ) и последующего нарушения условий хранения и накопления жидкой двуокиси углерода в ней.

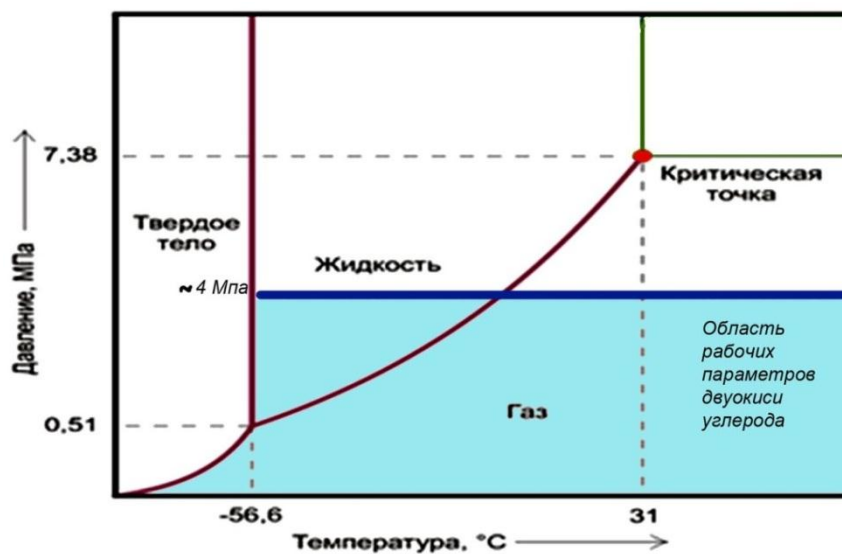


Рис. 3. Фазовая диаграмма двуокиси углерода

Действительно, если рассмотреть фазовую диаграмму двуокиси углерода, представленную на рисунке 3, то видим, что зона изменения температуры, в которой двуокись углерода может находиться в жидкой фазе, лежит выше кривой, начиная от температуры тройной точки, равной  $216,6\text{ К}$  ( $-56,6\text{ °C}$ ) и заканчивая температурой критической точки, равной  $304,1\text{ К}$  ( $+31\text{ °C}$ ). Диапазон изменения давления для жидкой фазы выше значения  $0,51\text{ МПа}$ . Ниже давления тройной точки двуокись углерода переходит в твердое состояние, минуя жидкую фазу. Слева от области, ограниченной кривыми твердое тело-жидкость и твердое тело-газ (от тройной точки и ниже) двуокись углерода находится в твердом состоянии. При параметрах выше критической точки ( $t > 31\text{ °C}$ ;  $p > 7,38\text{ МПа}$ ) двуокись углерода находится в сверхкритическом состоянии (сверхкритический флюид).

Исходя из предпосылки, что в рассматриваемых типах воздухонезависимых энергетических установок с тепловыми двигателями или с электрохимическими генераторами входные параметры отходящих газов не превысят давления  $4\text{ МПа}$ , можно определить рабочий диапазон температур и давлений в контуре отходящих газов. На диаграмме состояния этот диапазон не должен превышать  $4\text{ МПа}$ , а по температуре не будет выше температуры отходящих газов на выходе из компрессора (КОГ). Учитывая относительно небольшой «запас» холода в криогенном кислороде и низкую тепловую эффективность газо-газовых теплообменных аппаратов, основное охлаждение отходя-



шего газа целесообразно осуществлять в газовойодном охладителе (ТОГ1) до температур примерно равных 50-60 °С.

Для ожижения двуокиси углерода в конденсаторах (КУГ1) и (КУГ2) температурный уровень не должен быть выше ~ 30 °С при давлениях больше 0,51 МПа.

С позиции новизны описания нестационарных режимов работы СУДУ особое внимание вызывает процесс накопления жидкой двуокиси углерода в накопительной емкости (ЕСО<sub>2</sub>). Например, если предположить, что в начальном состоянии емкость заполнена газообразной двуокисью углерода при температуре 20 °С и давлении 0,1 МПа, то жидкая двуокись углерода, поступающая из конденсаторов (КУГ1) и (КУГ2) при давлении более 0,51 МПа, будет газифицироваться с понижением температуры из-за скачкообразного уменьшения давления. Текущее давление в цистерне в связи с появлением дополнительного количества газообразной двуокиси углерода начнет возрастать. Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока давление в емкости не достигнет величины 5,1 МПа. Дальнейшая подача жидкой углекислоты из контура отходящих газов приведет к накоплению уже жидкой фазы СО<sub>2</sub> и не только за счет внешнего поступления, но и за счет ожижения газообразной двуокиси углерода, поступившей в нее ранее. Т.е. следует констатировать, что процесс накопления СО<sub>2</sub> даже при работе ЭУ на стационарном режиме является нестационарным и требует применения методов изучения нестационарных динамических режимов работы установки.

### Математическая модель системы утилизации двуокиси углерода

Система утилизации двуокиси углерода представляют собой совокупность взаимосвязанных элементов, в которых протекают теплофизические и гидродинамические процессы. В общем случае они могут быть описаны уравнениями движения твердых тел, сплошности, движения и теплового состояния рабочих сред.

Эти системы уравнений, как правило, существенно нелинейны и их аналитическое решение возможно лишь в частных случаях. Поэтому, в зависимости от специфики задач, проводятся те или иные упрощения, направленные на исключение отдельных связей, определяемых уравнениями и краевыми условиями. При этом, безусловно, должны сохраняться главные черты процесса.

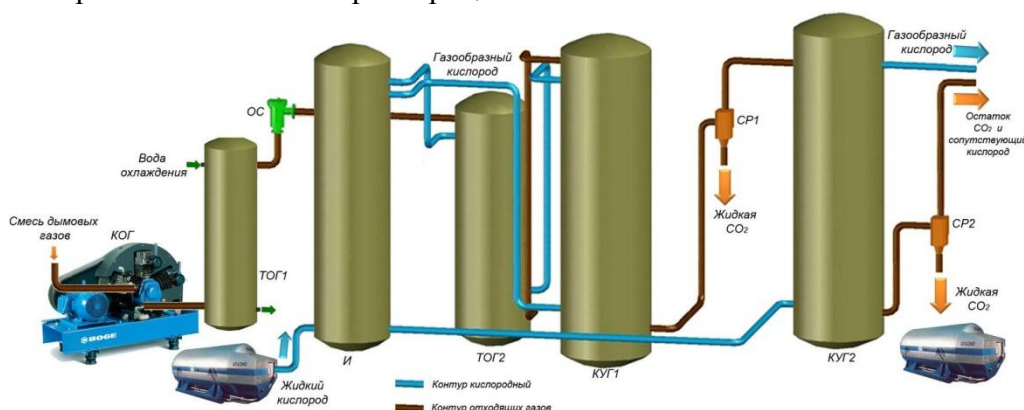


Рис. 4. Конструктивно-компоновочная схема системы утилизации двуокиси углерода

Представленная на рисунке 4 конструктивно-компоновочная схема СУДУ позволяет выделить следующие основные элементы, для которых составлялось математическое описание изменения их характеристик, идентичное по составу уравнений. Это соответственно:

- криогенная емкость жидкого кислорода ( $\text{KEO}_2$ ) и накопительная емкость сжиженной двуокиси углерода ( $\text{ЕСO}_2$ );
- 5 теплообменных аппаратов: газовой теплообменный аппарат охлаждения отходящих газов (ТОГ1), теплообменный аппарат второй ступени охлаждения отходящих газов (ТОГ2), конденсатор двуокиси углерода (КУГ1), конденсатор двуокиси углерода (КУГ2), испаритель жидкого кислорода (И);
- соединительные трубопроводы циркуляции по контуру отходящих газов и кислородному контуру;
- компрессор отходящих газов (КОГ);
- осушитель (ОС) отходящих газов;
- 2 сепаратора разделения жидкой и газообразных сред отходящих газов (СП1) и (СП2).

Нестационарные изменения давления, температуры, расходов одно- и двухфазных циркулирующих сред являются, как и в любой ЭУ, характеристиками динамических режимов. Их описание велось при следующих общих допущениях:

- рассматривается одномерная модель контуров циркуляции с осредненными по сечению параметрами;
- процессы во всех параллельных каналах теплообменных аппаратов и циркуляционных контуров протекают синхронно;
- передача тепла посредством теплопроводности вдоль контуров циркуляции отсутствует;
- коэффициенты теплопередачи и гидравлического сопротивления определяются статическими зависимостями при текущих значениях теплофизических параметров рабочих сред, входящих в эти зависимости;
- теплофизические свойства рабочих сред (кислород, двуокись углерода, вода) и конструкционных материалов элементов системы утилизации представляются либо в табличной форме в функции от текущих значений температуры и давления и расчетом приближенных значений посредством линейной аппроксимацией между базовыми точками, либо с использованием существующих аналитических зависимостей с достаточной для рассматриваемого режима погрешностью определения.

В этом классе допущений математическая модель каждого элемента СУДУ может быть скомпонована из следующих уравнений [5]:

- сохранения массы

$$\frac{\partial \gamma}{\partial \tau} + \frac{\partial(\gamma \cdot \omega)}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

- сохранения энергии

$$\frac{\partial(\gamma \cdot i)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\gamma \cdot \omega \cdot i)}{\partial x} = q_w + \alpha \cdot \Delta t \cdot \frac{1}{S} \quad (4)$$

- сохранения количества движения

$$\frac{\partial(\gamma \cdot \omega)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\gamma \cdot \omega^2)}{\partial x} = g \cdot \left[ \frac{\partial p}{\partial x} - \Psi(\omega) + \gamma \cdot \cos \nu \right] \quad (5)$$

- вращения твердого тела

$$I \cdot \frac{dn}{d\tau} = M_{\text{ДВ}} - M_{\text{С}} \quad (6)$$

- состояния газообразной среды

$$p = R \cdot \frac{t - 273}{V} \quad (7)$$

- теплофизических свойств рабочих сред и конструкционных материалов

$$i = i(p, t), \gamma = \gamma(p, t), c = c(p, t), \lambda = \lambda(p, t), \gamma_{\text{КМ}}, c_{\text{КМ}}, \lambda_{\text{КМ}} \quad (8)$$

Здесь:  $\tau$  - время,  $x$  - продольная координата,  $\gamma$  - удельный вес,  $\omega$  - скорость,  $i$  - энтальпия,  $q_w$  - внутреннее тепловыделение,  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи, приведен-

ный к единице длины поверхности,  $\Delta t$  – температурный напор между теплообменивающими средами,  $S$  - площадь поперечного сечения для прохода среды,  $g$  – ускорение силы тяжести,  $p$  - давление,  $\Psi(\omega)$  - потеря давления, обусловленная гидравлическим сопротивлением,  $\nu$  - угол между вектором силы тяжести и направлением движения среды,  $I$  - момент инерции масс вращающегося тела,  $n$  – угловая скорость,  $M_{\text{дв}}$  – движущий момент,  $M_c$  – момент сопротивления,  $R$  – газовая постоянная,  $V$  – объём,  $t$  - температура,  $c$  - теплоемкость,  $\lambda$  - теплопроводность,  $\gamma_{\text{км}}$ ,  $c_{\text{км}}$ ,  $\lambda_{\text{км}}$  - удельный вес, теплоемкость и теплопроводность конструкционных материалов.

Математическая модель установки формируется из математических моделей отдельных участков, т.е. из систем уравнений, подобных приведенной системе 3-7. Число участков и их границы устанавливаются в соответствии с конструктивными и компоновочными особенностями установки, а также характера протекающих процессов.

В соответствии с выделенными выше группами, идентичными по конструктивному исполнению и особенностям протекающих процессов, состав уравнений для них будет следующий.

Криогенная емкость жидкого кислорода (КЕО<sub>2</sub>) и накопительная емкость сжиженной двуокиси углерода (ЕСО<sub>2</sub>):

- уравнение сохранения энергии (4) жидкой фазы для определения изменения средней температуры жидкой фазы в емкости с учетом теплообмена с окружающей средой;

- уравнение сохранения энергии (4) газообразной фазы для определения изменения средней температуры газовой фазы с учетом теплообмена с окружающей средой;

- уравнение сохранения массы (3) для определения изменения положения границы между жидкой и газообразной фазами;

- уравнение состояния (7) для газообразной фазы для определения изменения давления газа.

5 теплообменных аппаратов:

- уравнение сохранения энергии (4) рабочих сред, текущих внутри труб и в межтрубном пространстве для определения изменения средних и выходных значений температур;

- уравнение сохранения количества движения (5) рабочих сред, текущих внутри труб и в межтрубном пространстве, для определения изменения давления в теплообменном аппарате;

- уравнение сохранения массы (3) рабочих сред, текущих внутри труб и в межтрубном пространстве, для определения текущих значений расходов.

Соединительные трубопроводы циркуляции по контуру отходящих газов и кислородному контуру:

- уравнение сохранения энергии (4) текущей среды для определения изменения средней и выходной температуры с учетом при необходимости теплообмена с окружающей средой;

- уравнение сохранения количества движения (5) текущей среды для определения изменения давления в трубопроводе;

- уравнение сохранения массы (3) текущей среды для определения значений расходов.

Компрессор отходящих газов (КОГ):

- уравнение вращения твердого тела (6) для определения угловой скорости привода компрессора, обеспечивающего движение рабочих сред в контуре отходящих газов;

- аналитические зависимости напорных и расходных характеристик компрессора в функции от угловой скорости вращения.

#### Осушитель (ОС) отходящих газов:

- уравнение сохранения массы (3) для определения расходов на выходе из осушителя двуокиси углерода и сопутствующего кислорода.

#### 2 сепаратора разделения жидкой и газообразных сред отходящих газов (СР1) и (СР2):

- уравнение сохранения массы (3) для определения уровня двуокиси водорода в конденсаторосборнике сепаратора;

- уравнение количества движения (5) для определения расхода жидкой двуокиси углерода подаваемого в накопительную емкость  $\text{CO}_2$ .

Кроме перечисленных выше уравнений математические модели всех выделенных групп содержат:

- аналитические зависимости или табличные значения теплофизических свойств рабочих средств и конструкционных материалов (8);

- алгебраические выражения для определения текущих значений коэффициентов теплоотдачи и гидравлических сопротивлений.

### 5. Заключение

Представленные системы дифференциальных уравнений в частных производных могут быть решены разнообразными численными методами. Применительно к задачам динамики судовых энергетических установок положительно зарекомендовали себя методы, сводящие исходные уравнения с частными производными к нестационарным системам обыкновенных дифференциальных уравнений, для которых имеется хорошо развитая и освоенная методология численного решения на современных быстродействующих вычислительных средствах, в том числе и с использованием компьютерных стандартных математических пакетов типа Матлаб и Маткад. Именно такой подход и был использован при разработке программы численного решения. Анализ вариантных расчетов конкретных судовых систем утилизации двуокиси углерода составит содержание дальнейших исследований по данному направлению.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чекалов Ю.Н. Тепловые энергетические установки на замкнутом цикле для неатомных подводных лодок и аппаратов // Судостроение. 1995. № 4. С. 15-19.
2. Вертикальный кожухотрубный конденсатор: пат. № 2437045 / Сосков В.А., Копытов Ю.В.; заявл. 25.03.2010; опубл. 20.12.2011, Бюл. № 35, Приоритет 25.03.2010.
3. Иванов Р.А., Сосков В.А. Проектная оценка возможности применения энерго модуля с двигателем внутреннего сгорания замкнутого цикла на подводных технических средствах. // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2005., Выпуск 22(306). Санкт-Петербург. С. 29-39.
4. Иванов Р.А., Сосков В.А. Типы и основные характеристики систем отвода продуктов реакции углеводородного горючего и кислорода из анаэробных энергоустановок для подводного применения. // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2005. Выпуск 22(306). Санкт-Петербург. С. 40-57.
5. Иванов Р.А. Математическое моделирование динамических режимов работы судовых энергетических установок с электрохимическими генераторами. Учебное пособие. // Санкт-Петербург. Изд-во СПбГМТУ, 2007. - 170 с.

## MATHEMATICAL MODEL OF CARBON DIOXIDE UTILIZATION SYSTEM OF SHIP POWER INSTALLATIONS

Ivanov Roman Aleksandrovich, professor, d.t.s.  
Arseniyev Yury Nikolaevich, chief of department  
Kopytov Jury Vasilyevich, leading engineer

Krylov State Research Centre: St. Petersburg, Russian Federation,  
e-mail: krylov@ksrc.ru

*The article contains a description of developed mathematical model of ship carbon dioxide utilization system, the numerical analysis of which will allow studying non-stationary modes of its operation, both under normal operation conditions and in the analysis of possible emergency situations.*

УДК 62-843.3

### ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ ДВУХТОПЛИВНЫХ ДИЗЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК СУДОВ ПРОЕКТА S1910

Иванченко Александр Андреевич, д-р техн. наук, профессор  
Ватолин Дмитрий Сергеевич, аспирант

ФГБОУ ВО «ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова», Санкт-Петербург, Россия,  
e-mail: prof\_ivanchenko@mail.ru

*Рассматривается актуальность проблемы, опыт создания и эксплуатации двухтопливных дизельных установок судов. Рассмотрены особенности конструкции двухтопливных двигателей компании MAN Diesel&Turbo 51/60 DF, используемых в качестве привода генераторов на судах проекта S1910. Высказывается мнение о необходимости дальнейшего совершенствования их конструкции и рабочего процесса*

#### Актуальность проблемы

В связи с усложнением и удорожанием добычи нефти в России, как во всем мире, применение СПГ в качестве топлива рассматривается, как серьезная альтернатива флотскому мазуту (HFO) и дизельному топливу (MDO). Об этом свидетельствует принятие Госпрограммы «Развитие транспортной системы», которая предусматривает создание условий для использования сжиженного природного газа для обеспечения работы судовых энергетических установок на морском и речном транспорте; развитие объектов газозаправочной инфраструктуры для хранения и бункеровки сжиженного природного газа в морских портах и на внутренних водных путях; стимулирование исследований по разработке и производству морских и речных судов, использующих сжиженный природный газ для обеспечения работы энергетических установок [1]. Программу планируется реализовать в один этап в период с 2018 по 2022 гг.

В развитие госпрограммы ПАО Газпром предполагает следующие сценарии спроса на бункер СПГ в Балтийском / Северном море в 2011-2030 гг. [ 3 ] (рис. 1).

- Случай 1: LNG \$ 15,73 / MMBtu - эквивалентная цена использования HFO с системой очистки скрубберами.
- Случай 2: СПГ \$ 20,25 / MMBtu - эквивалентная цена использования MDO. (Поставка СПГ слишком дорогостоящая, пределы серы принимаются только на основе регулирования)
- Случай 3: СПГ \$ 13,62 / MMBtu - эквивалентная цена использования HFO. (СПГ сильно стимулируется, топливный переключатель производится на основе лучшей экономики).
- Случай 4: СПГ \$ 15,73 / MMBtu - эквивалентная цена использования HFO из-за отстающей экономики и снижения спроса.

Все вышеприведенные фактора послужили сильным толчком к началу производства двухтопливных дизелей и их большому распространению на мировом рынке.

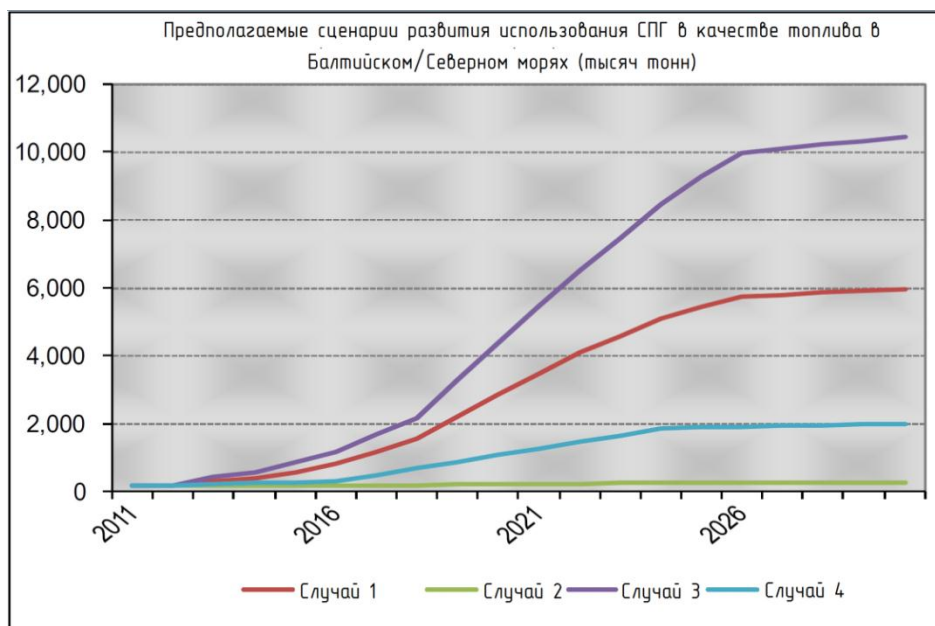


Рис. 1. Предполагаемые сценарии развития использования СПГ в качестве топлива в Балтийском/Северном морях

Причем этот процесс стимулирует Принятое в 2010 г. на 58 сессии ИМО пересмотренное Приложение VI к МАРПОЛ 73/78, вступившее в силу 01.01.2011, которым предусмотрено поэтапное снижение выбросов окислов азота (NOx) с отработавшими газами судовых энергетических установок. Начало ужесточению требований положено с 01.01.2016 в акваториях, прилегающих к Североамериканскому побережью Канады и США, где в областях контроля выбросов (NECA) действуют нормы выбросов NOx на уровне IMO Tier-3 (3,4 - 2,0 г/кВт ч). Т.е. нормы, предусматривающие снижение выбросов NOx на 80 % по отношению к дизелям, находящимся в эксплуатации [2]. Согласно планам ИМО с 2021 года ожидается распространение жестких требований и на акваторию Северного и Балтийского морей.

Таким образом, новый взгляд на природный газ как топливо для судовых двигательных установок, продиктован требованиями, как экономики, так и экологии. Исходя из этого, большинство производителей рассматривают природный газ, как экологически чистое топливо, способное обеспечить требования по выбросам:

- оксидов серы по причине отсутствия серы в природном газе;

– углекислого газа за счет малого содержания углерод-углеродных связей в топливе, при сгорании которого конечные продукты сгорания смещаются к образованию паров воды;

– несгоревших углеводородов и твердых частиц.

Наглядно преимущество двухтопливных двигательных установок перед традиционными дизельными по эмиссии вредных компонентов демонстрирует фирма YanmarCo. LT» [4] на примере двигателя EYG 26L (рис. 2).

Двухтопливные двигательные установки наиболее комплексно позволяют решать рассматриваемые проблемы: во-первых, позволяют обеспечивать вступающие в силу требований IMO Tier-III, и во-вторых, возможностью эксплуатации флота на топливе, отличающемся относительной дешевизной и перспективностью. В связи с изложенным, вопросы рассматриваемые в настоящем докладе представляются исключительно актуальными.

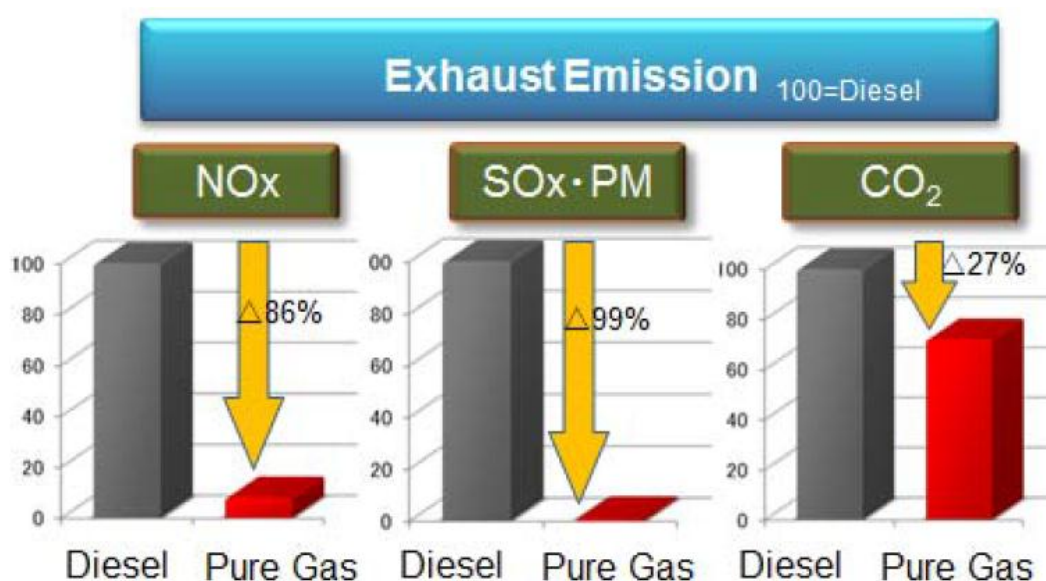


Рис. 2. Сокращение вредных веществ в отработавших газах газового двигателя EYG 26L по сравнению с дизельной модификацией:  
ExhaustEmission— выбросы вредных веществ; PM— твердые частицы;  
Pure Gas— только газ

### Особенности конструкции и принципа работы двухтопливных дизелей

В связи с рассмотренной ранее актуальностью, на современном рынке судового двигателестроения в последние годы внимание всех изготовителей сосредоточено на разработке двухтопливных дизельных двигателей, работающих по газодизельному циклу и способных работать, как на жидком, так и на газовом топливах.

Разработками в области использования газового топлива заняты как специализированные фирмы, занимающиеся конструированием, доводкой и производством топливной аппаратуры (L'Orange GmbH, RobertBoschDieselSystems и др.), так и ведущие производители двигателей. Значительный опыт в разработке газодизельных систем подачи топлива накоплен с 1989 г. специалистами фирмы L'Orange GmbH [5]. Успешное коммерческое внедрение получают как двухтопливные системы низкого давления газа (LP-Gas), реализующие гомогенный процесс сгорания топлива, так и системы газа высокого давления (HP-Gas) со сгоранием гетерогенной смеси. Разработкой двухтоплив-

ных модификаций линейки своих дизельных двигателей заняты практически все ведущие производители. Так, инженеры фирмы DaihatsuDieselMfg. Co., Ltd. создали двухтопливный двигатель DE28DF, который прошёл сертификацию и допущен к морскому применению [6]. Два типа газовых двигателей разработала фирма KawasakiHeavyIndustries, Ltd. [7], [8], демонстрируя возможности по снижению эмиссии вредных веществ и достижения более высокой энергетической эффективности по сравнению с дизельным двигателем на примере серии двигателей KG-V мощностью от 5 до 7,8 МВт в 12 и 18 цилиндровом исполнении. Фирма MANB&W дополнительно запустила в производство двигатель G90ME-C10.5, способный работать на сжатом природном газе [29] и т. д.

Остановившись на заявленных в докладе двухтопливных дизельных установках судов проекта S1910, отметим, что она спроектирована и создана по схеме электродвижения с двигателями компании MAN Diesel&Turbo типа 51/60 DF. Двигатели рассматриваемого типа эксплуатируются в составе судовой электроэнергетической установки, состоящей из четырех дизель - генераторов (2 x MAN 8L51/60DF; 2 x MAN 9L51/60DF) и турбогенератора. Двигатель приспособлен для работы на двух топливах: дизельном и газовом. Производство рассматриваемых двигателей компанией начато с 2011 года. Основные характеристики двигателей приведены в табл. 1 [ 10 ].

Таблица 1

#### Технические данные дизеля фирмы MAN Diesel&Turbo типа 51/60 DF

<b>Количество цилиндров, шт.</b>	<b>От 6 до 9</b>
Частота вращения, об/мин	514/500
Диаметр цилиндра, мм	510
Ход поршня, мм	600
Среднее эффективное давление, бар	20,0/20,6
Цилиндровая мощность, кВт	1050
Расход топлива/газа при нагрузке 85%, г/(кВт·ч)/кДж/(кВт·ч)	180,2 / 7,265

При использовании газового топлива, газ подается в рабочие цилиндры через газовый клапан (SolenoidGasAdmissionValve – SOGAV) вместе с продувочным воздухом. Для воспламенения газа используется система «MicroPilot», которая подает в цилиндры дизельное топливо (MDO) через запальные форсунки. В качестве жидкого топлива предусмотрено использование в основном топлива марки HFO, и MDO при заходе в зоны ЕСА и при обкатке двигателя после моточистки. При работе на жидком топливе топливо подается через основные форсунки, причем система «MicroPilot» остается в работе. Двигатель способен перейти на газовое топливо начиная с нагрузки 20% от номинальной и поддерживать работу при нагрузке не ниже 15%. Контроль сгорания газа в цилиндрах осуществляется с помощью пьезометрических датчиков улавливающих вибрации, образующиеся при неуправляемом сгорании газа. Выход из режима неуправляемого сгорания газа, осуществляется микропроцессорной системой управления и защиты SaCoSone, разработанной компанией MANDiesel&Turbo, которая опираясь на данные полученные с датчиков улавливающих шум, возникающие в цилиндре при неконтролируемом сгорании газа, с помощью программно-логического аппарата и органов управления дизелем выводит двигатель из этого опасного режима работы (рис. 3).



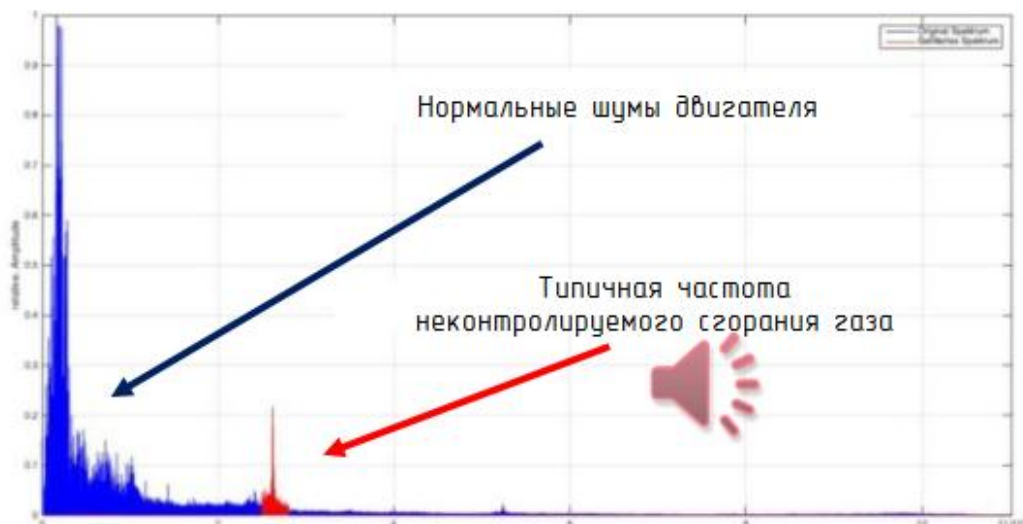


Рис. 3. Акустические сигналы, снятые с двигателя MAN Diesel & Turbo 51/60 DF

При этом система с помощью программно-логического аппарата, изменяет угол опережения воспламенения топлива и уменьшает подачу газа в цилиндр. В случае длительной работы двигателя в режиме неуправляемого сгорания газа, система SaCoSone начинает его автоматический перевод на жидкое топливо. Продолжительность перевода составляет ~5 мин., а в случае возникновения слишком сильной детонации при сгорании в цилиндре, инициирует быстрый переход на жидкое топливо (практически мгновенный).

Рабочий процесс в цилиндре дизеля на газовом топливе организован по принципу использования обедненной газозоудшной смеси. А именно, сгорание обедненной газозоудшной смеси в рабочих цилиндрах происходит при поддержании соотношения топливо/воздух  $\lambda \sim 2,2$  (рис. 4). Это соотношение воздух-топливо, является ключом к регулированию температуры горения, что обеспечивает высокую эффективность и минимальные выбросы NOx. Коэффициент обедненного соотношения топливо/воздух достигается за счет повышения давления воздуха в турбонагнетателе до 2,5-3 бар. Часть воздуха перепускается в атмосферу специальным клапаном ( $\lambda$ -valve), для поддержания соотношения топливо/воздух, после чего воздух охлаждается перед подачей в цилиндры.

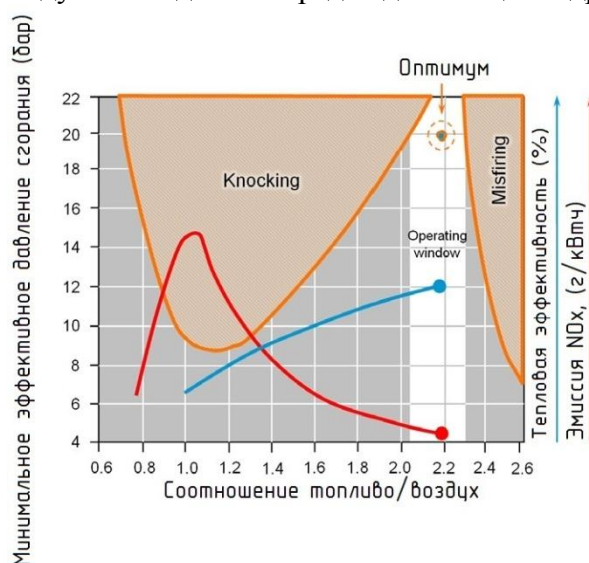
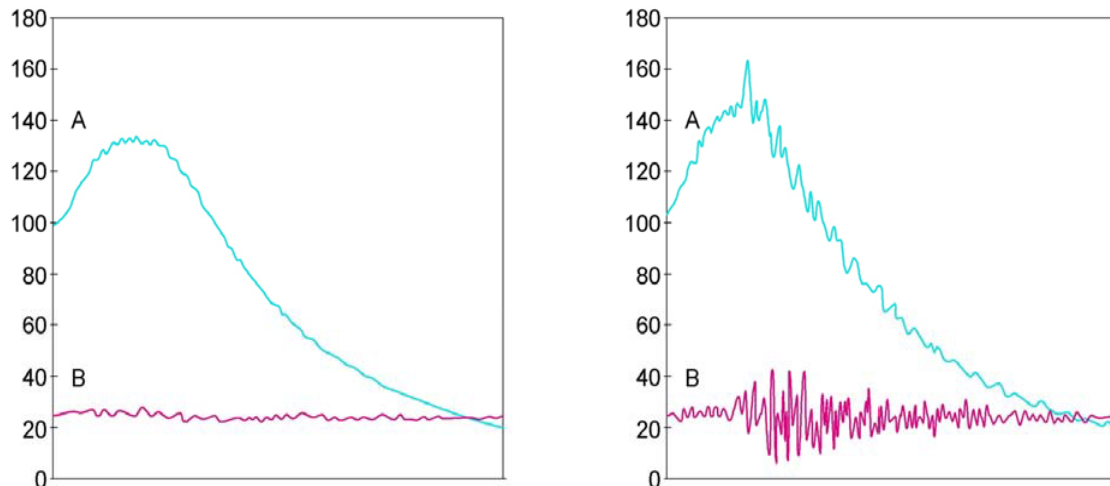


Рис. 4. Определение соотношения топливо/воздух при работе дизеля на газу

При уменьшении соотношения топливо/воздух, плохом качестве метана и т.д. начинается неконтролируемое сгорание газа в цилиндре. При его возникновении скачкообразно повышается максимальное давление сгорания в цилиндре и имеет пиковый характер (рис. 5).

Подобное горение повышает тепловую напряженность двигателя, а так же ведет к сильному эрозионному износу цилиндро-поршневой группы (рис. 6).



*Рис. 5 Сравнительные характеристики работы дизеля при нормальных условиях и при наличии неконтролируемого сгорания газа в цилиндре (А – кривая давления в цилиндре, В – кривая значений снятых пьезо-электрическим датчиком)*



*Рис. 6 Эрозионные повреждения поршня от неконтролируемого сгорания газа в цилиндре*

Для предотвращения попадания рабочих процессов дизеля в зону неконтролируемого сгорания газа, система управления двигателем использует клапан перепуска наддувочного воздуха с нагнетательной стороны компрессора в атмосферу (рис. 7).

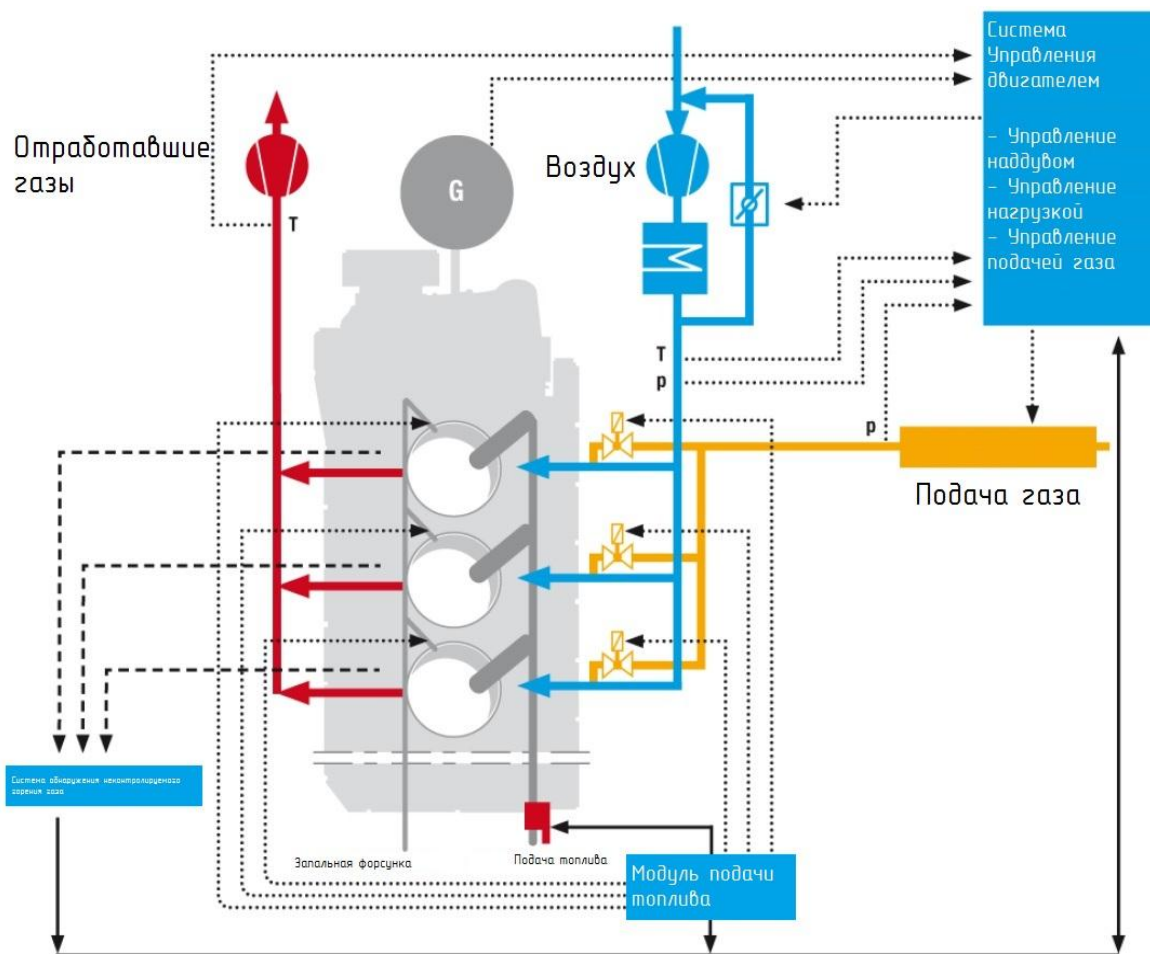


Рис. 7. Концептуальная схема системы управления дизелем

Для поддержания такого коэффициента избытка воздуха используется специальный перепускной клапан, который стравливает избыточный воздух с нагнетательной части турбокомпрессора в атмосферу. Указанный клапан приводится в действие только при работе дизеля на газовом топливе, при работе на жидком топливе он остается закрытым.

### Показатели рабочего процесса и проблемы эксплуатации

За время наблюдения, наработка двигателей составила около 18000 часов, что соответствует периоду с 2015 г. по 2018 г. В рассмотрение принимались особенности эксплуатации двухтопливных дизелей, вопросы их пуска, перевода с топлива на топливо, контролируемые показатели их рабочего процесса и отказы. Изменение основных контролируемых параметров рабочего процесса дизель-генератора №1 по нагрузочной характеристике при работе на газовом и тяжелом топливе представлены на рис. 8 и более полно в работе [12]. Данные по приведенным параметрам работы двигателей автоматически снимались ежедневно в 12:00 по местному времени в процессе работы каждого рассматриваемого двигателя.

Из представленных данных следует, что не все контролируемые параметры подчиняются строгим закономерностям во всем диапазоне рабочих режимов. Относительно кучно ложатся на графиках показания приборов, характеризующих давление

надувочного воздуха и частоты вращения ротора турбокомпрессора на всех двигателях при работе на газовом топливе. Это является следствием автоматического регулирования давления наддува при работе на газовом топливе. При работе на топливе НФО наблюдаются колебания и давления наддува и частоты вращения ротора турбокомпрессора. Причем особенно не стабильно агрегат наддува работает на долевых режимах. Это является следствием не стабильности и колебаний рабочего процесса, о чем свидетельствует разброс наблюдаемых данных по температуре отработавших газов перед турбиной и после турбины.

Причиной колебаний в рабочем процессе при работе на газовом топливе могут быть колебания в наполнении цилиндров зарядом воздуха в результате волновых процессов в ресивере. При работе на жидком топливе нестабильность рабочего процесса и соответственно температур до и после компрессора могут быть дополнительно вызваны различиями в гидроплотности топливной аппаратуры по цилиндрам, колебательными процессами во впускном коллекторе, заносом рабочих элементов турбины и компрессора, загрязнения теплообменных поверхностей ОНВ и другими факторами.

По мере роста нагрузки на двигатели увеличиваются расхождения основных рабочих параметров дизеля на жидком и газовом топливах. При работе на тяжелом топливе, двигатели оказываются более теплонапряженными, чем при работе на газовом топливе. Так же наглядно показано существенное различие в давлении наддува и частоте вращения турбокомпрессора.

Для исключения неоднозначности в оценке влияния различных факторов на показатели рабочего процесса дополнительно рассмотрено изменение основных контролируемых параметров рабочего процесса дизеля MAN 9L51/60 DF мощностью 8,8 МВт при его работе на газовом топливе (метан) и на жидком топливе IFO 380 соответственно на режимах приблизительно схожей нагрузки. Анализ данных позволяет отметить при работе на рассматриваемых топливах особенно сильные различия в давлении наддувочного воздуха ( $\sim 0,3-0,5$  бар) и частоте вращения ротора турбокомпрессора ( $\sim 1000$  об/мин). При этом большие значения рассматриваемые параметры имеют место при работе на жидком топливе. При работе на газовом топливе несколько увеличивается температура газов на выпуске из цилиндра.

Важными параметрами, характеризующими надежность двухтопливных двигателей, является безотказность его элементов. Во время эксплуатации рассматриваемых двигателей типа MANL51/60 DF зафиксирована относительно высокая частота заклинивания плунжеров топливных насосов высокого давления (ТНВД) во время пуска двигателя. В отдельных случаях имело место заклинивание 8 плунжеров ТНВД из 9. Причем рассматриваемые систематические отказы имели место на трех из четырех судов с главными двигателями MANL51/60 DF, находящихся в эксплуатации ПАО «Совкомфлот». Собранная по результатам отказов статистика по всей серии судов передана производителю двигателей для анализа и решения данной проблемы.

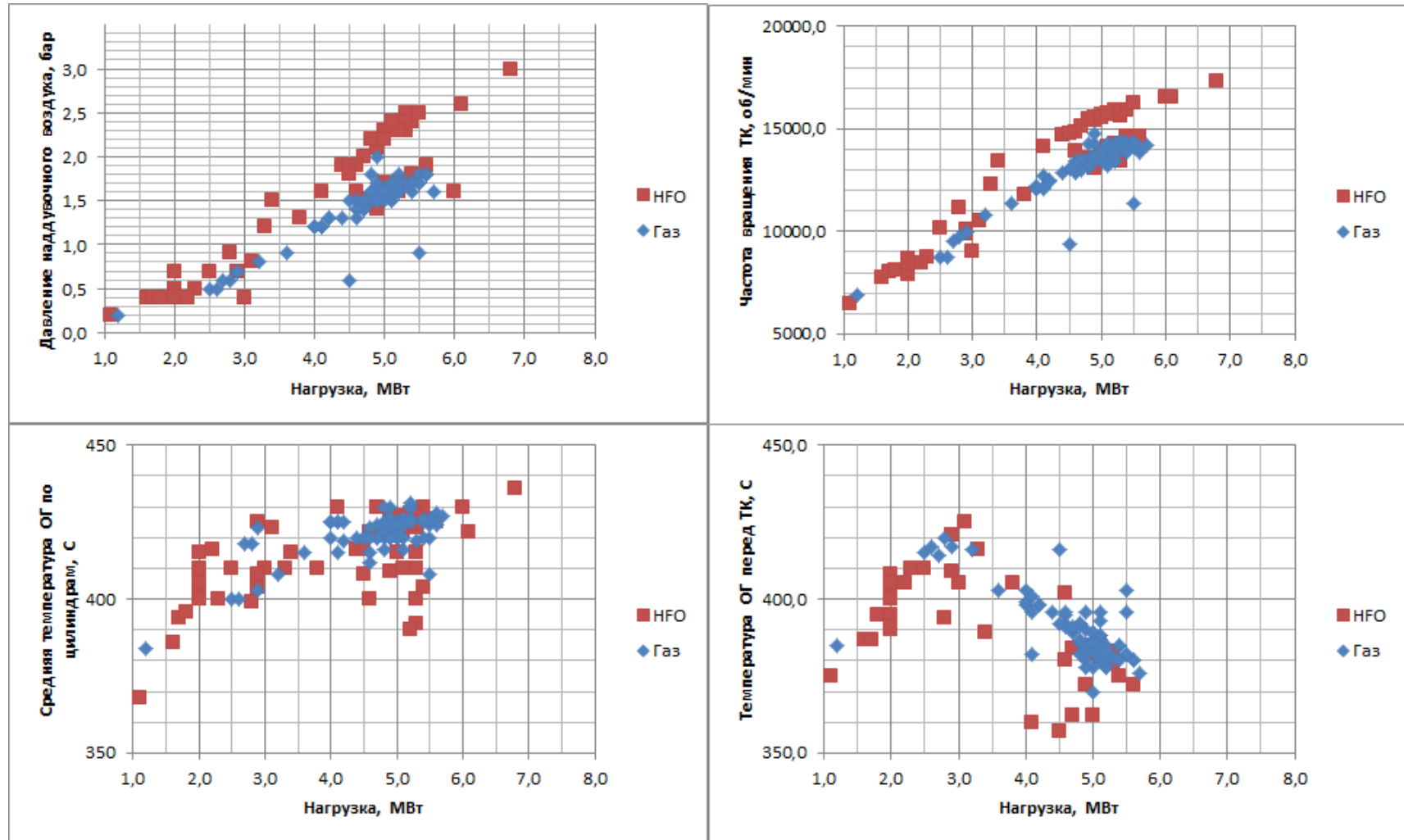


Рис. 8. Зависимость значений рабочих параметров от нагрузки главного двигателя №1

Отдельно стоит отметить случай отказа турбокомпрессора (ТК) двигателя MAN 9L51/60 DF марки TCA 66 [11]. Аварийная остановка главного дизель-генератора №3 при работе на топливе HFO во время морского перехода произошла по сигналу о низком давлении масла в системе смазки ТК (нормальное значение – 1,5 бар; аварийное значение – 0,9 бар). Сразу после аварийной остановки при внешнем осмотре были обнаружены повреждения изоляции турбинной части ТК и протечки охлаждающей воды. После вскрытия турбинной части были обнаружены 40 поврежденных турбинных лопаток, и одна лопатка была обнаружена оторвавшейся от хвостовика (рис. 9). Нарботка двигателя на момент аварии составляла всего 600 часов.

Три турбинных лопатки и некоторые другие поврежденные компоненты были отправлены в Аугсбург заводу-производителю для выяснения причин произошедшей аварии. В ходе расследования аварии был произведен анализ поврежденных поверхностей, проверено качество материала турбинных лопаток и произведено исследование условий эксплуатации (на основании данных машинного журнала).



Рис. 9. Повреждения турбинной части ТК

В результате анализ поврежденных поверхностей турбинных лопаток на поверхности разрушения лопатки №3 обнаружены следы развившейся трещины, приведшей к отрыву лопатки от хвостовика. На поврежденной поверхности турбинной лопатке №1 найдены следы ударных повреждений. На поврежденной поверхности турбинной лопатки №2 были обнаружены следы повреждения передней кромки (рис. 10).



Рис. 10. Повреждения турбинной лопатки №2

Произведенный анализ поврежденных поверхностей лопаток показал, что наиболее вероятной причиной произошедшей аварии было образование микротрещины в турбинной лопатке №3, которая развилась во время эксплуатации ТК, и спонтанный обрыв которой привел к повреждению всей турбинной части. Дефектов материала в месте обрыва обнаружено не было. Причиной разрушения турбинной лопатки №3 явилась усталостная микротрещина появившаяся в зоне наибольшей концентрации напряжений, соответствующих 4 - й частоте собственных автоколебаний.

Корень лопатки подвержен наибольшему влиянию усталостных напряжений вызываемых собственными автоколебаниями 4-й частоты. Резонанс 4-й собственной частоты автоколебаний соответствует 13400-14500 об/мин (рис. 11) (что соответствует работе дизеля на нагрузке 72-80% на HFO).

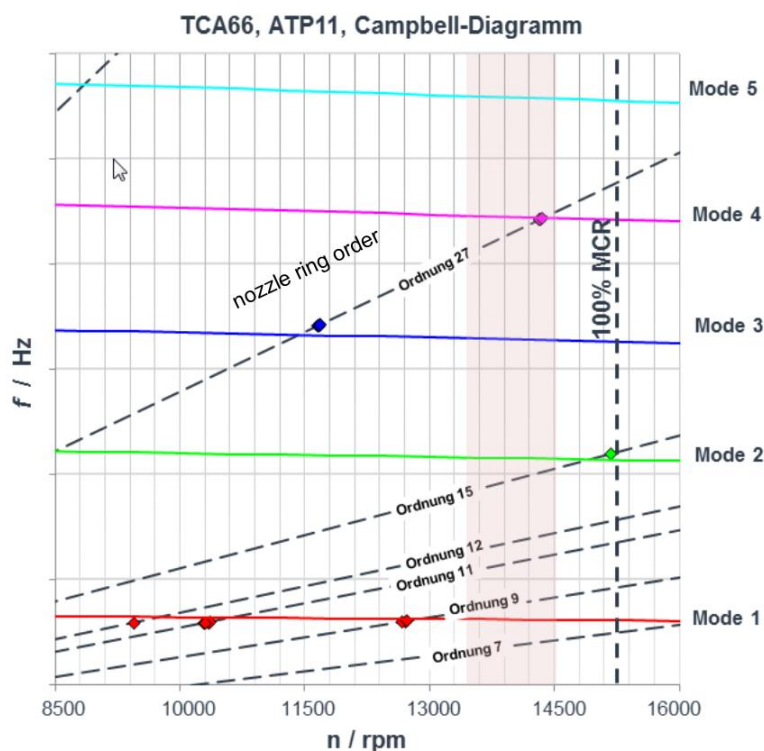


Рис. 11. Диаграмма Кемпбела для ТК TCA 66

Все другие собственные частоты автоколебаний лопаток, возбуждаемые в пределах рабочего диапазона, не приводили к появлению предельных напряжений в корне турбинных лопаток и могут быть исключены в качестве причины появления усталостной трещины.

По данным зафиксированным в машинном журнале были восстановлены условия работы ТК в течение последней недели предшествующей аварии. Анализ показал, что ТК работал без каких либо замечаний в основном в диапазоне скоростей ~13500 об/мин (рис. 12), соответствующем диапазону возбуждения 4-й частоты собственных автоколебаний.

С целью исключения рассматриваемых отказов компания MANDiesel&Turbo произвела замену соплового аппарата газовой турбины ТК на всех двигателях рассматриваемой серии, тем самым исправив ситуацию с наложением критических частот вращения на основной эксплуатационный режим.

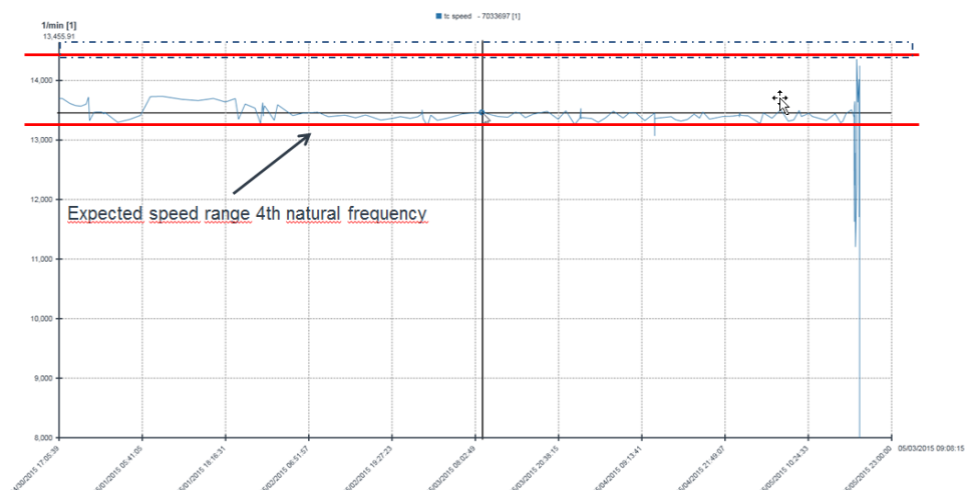


Рис. 12. Условия работы ТК в течение недели предшествующей аварии

Таким образом можно констатировать, что хотя фирмы-производители двухтопливных дизелей занимаются постоянным улучшением конструкции и решением проблем в эксплуатации, что специалистам в области проектирования двухтопливных двигателей и их элементов есть еще над чем поработать чтобы обеспечить их надежную и эффективную эксплуатацию на двух топливах: газовом и жидком. Заслуживают дополнительного внимания методы оценки качества и совершенствования их рабочего процесса.

## Выводы

Предложение рынку двухтопливных дизельных двигателей ведущими производителями судовых дизелей, стало ответом на ужесточение экологических требований к составу отработавших газов судовых дизелей, рост цен и ограниченность рынка традиционных жидких топлив.

Одними из первых в России с проблемами эксплуатации рассматриваемых двигателей столкнулись специалисты ПАО "Совкомфлот", в эксплуатации которого находятся суда проекта S1910 с системой электродвижения, на которых двухтопливные двигатели компании MAN Diesel&Turbo типа 51/60 DF используются в качестве привода генераторов. В связи со сжатыми сроками их создания на данный момент опыт безотказной эксплуатации данных дизелей еще слишком мал. Причиной этому является нестабильность в протекании рабочего процесса в зоне режимов, преобладающих в эксплуатации. И хотя фирмы-производители занимаются постоянным улучшением конструкции и решением проблем в эксплуатации в результате выполненных исследований можно констатировать, что специалистам в области проектирования двухтопливных двигателей и их элементов есть еще над чем поработать чтобы обеспечить их надежную и эффективную эксплуатацию на двух топливах: газовом и жидком.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Паспорт государственной программы Российской Федерации "Расширение использования природного газа в качестве моторного топлива на транспорте и техникой специального назначения" // <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=PNPA;n=26650#0>.



2. Международная конвенция по предотвращению загрязнения морской среды МАРПОЛ 73/78. – СПб.: ЦНИИМФ, 2012. – 762 с.
3. GAZPROM G4T. LNG bunker supply and infrastructure development by Gazprom // <http://slideplayer.com/slide/5801252/>.
4. Issei, O. New marine gas engine development in YANMAR / O. Issei, K. Nishida, K. Hirose // Ship & Offshore | Schiff&Hafen. – June 2016. – Special. – Pp. 36.
5. Senghaas, C. Simplified High Performance Injection Systems for Dual-fuel Engines / C. Senghaas, M. Willmann, H. J. Koch // MTZ industrial. – 2016. – Vol. 6. – Is. 3. – Pp. 32–39. DOI: 10.1007/s40353-016-0024-4.
6. Kawase, K. Development of the new DAIHATSU 2MW class dual-fuel engine for marine use / K. Kawase, T. Yamada, A. Okada // Ship & Offshore | Schiff&Hafen. – June 2016. – Special. – Pp. 36.
7. Sakai, Y. This Operational experience and new development for high performance of Ka-wasaki Green Gas Engine / Y. Sakai, T. Sugimoto, T. Horie, H. Iwasaki, M. Enomoto, K. Fujihara // Ship & Offshore | Schiff&Hafen. – June 2016. – Special. – Pp. 64.
8. Nonaka, Y. Development of Kawasaki Green Gas Engine for marine, L30KG series / Y. Nonaka, S. Fujihara, T. Hirayama // Ship & Offshore | Schiff&Hafen. – June 2016. – Special. – Pp. 71.
9. Kindt, S. MAN B&W two-stroke engines latest design development within engine types, Tier III and multiple gas fuels / S. Kindt // Ship & Offshore | Schiff&Hafen. – June 2016. – Special. – Pp. 26.
10. MAN L51/60 DF Propulsion // <http://marine.man.eu/docs/default-source/shopwaredocumentsarchive/man-l51-60df.pdf?sfvrsn=7>.
11. Investigation Report. Turbocharger breakdown TCA66 – 42289 // MAN | PrimeServ Augsburg. – 2015. – 9 с.
12. Иванченко, А.А. Опыт эксплуатации двухтопливных дизелей MAN 9L51/60 DF/ А.А. Иванченко, Д.С. Ватолин // Двигателестроение. – 2018. – №1. – С. 20-26.

## **EXPERIENCE OF OPERATION OF DOUBLE-FUEL DIESEL EQUIPMENT FOR SHIPS OF THE PROJECT S1910**

Ivanchenko Alexander Andreevich, Doctor of Technical Sciences, Professor  
Vatolin Dmitry Sergeevich, Post-graduate student

FSFEI HPE “Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping”,  
Saint-Petersburg, Russia, e-mail: prof\_ivanchenko@mail.ru

*The urgency of the issue, the experience in the creation and operation of bi-fuel diesel ship installations are considered. Features of the design of MAN Diesel & Turbo 51/60 DF dual-fuel engines used as a generator drive on the S1910 project vessels are considered. An opinion is expressed on the need to further improve their design and workflow.*

## ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПРАКТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ МНОГОФАКТОРНЫХ МОДЕЛЕЙ

Ковальчук Леонид Игнатьевич, д-р техн. наук, профессор  
Исаева Марина Васильевна, ассистент кафедры

Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота  
ФГБОУ ВО «КГТУ», Калининград, Россия, e-mail: bgarf1988@inbox.ru

*Применение известных зависимостей об отводе теплоты с отработавшими газами не связывает эти потери с параметрами двигателей, доступными для оперативного контроля в судовых условиях. Предложены косвенные зависимости для оценки относительных тепловых потерь с отработавшими газами современных двухтактных двигателей, в которых эти зависимости выражены в функции от температуры отработавших газов и частоты вращения коленчатого вала, обладающие значительной универсальностью и достаточной для решения практических задач точностью*

При решении задач в большинстве случаев определение параметров многофакторных моделей производится в условиях задания исходных данных с погрешностями, то есть результат вычислений будет найден приближенно. Суммарная погрешность результата расчета будет состоять из вычислительной и неустраняемой погрешности [6].

Вычислительная погрешность, погрешность от округлений, зависит в основном от выбранной схемы вычислений, т.е. от выбранного метода решения задачи. При одном методе решения эта погрешность будет меньше, при другом – больше. Именно в связи с этим обстоятельством возникает вопрос о качестве практических методов расчета параметров многофакторных моделей в тех случаях, когда решение одной и той же задачи может быть дано не одним, а несколькими методами.

В качестве примера рассмотрим процесс определения параметров моделей, описывающих тепловые потери с отработавшими газами в судовых двухтактных двигателях в зависимости от температуры отработавших газов за газовой турбиной и частоты вращения коленчатого вала двигателя. Предположительно взаимосвязь между названными параметрами зададим в виде:

$$1 - q_{\Gamma} = tg_2^{1 - q_{\Gamma}} \cdot n^{x_n} \quad (1)$$

где  $q_{\Gamma}$  - относительная величина потерь с отработавшими газами;

$tg_2$  - температура отработавших газов за газовой турбиной или в выпускном коллекторе для двигателей без наддува, °С;

$n$  - частота вращения коленчатого вала двигателя, мин<sup>-1</sup>.

Суть замысла сводится к тому, что если перечень определяющих параметров, стоящих в правой части, выбран правильно, то равенство левой и правой частей представления (1) должно достигаться посредством изменения показателей степени  $x_n$  по определенной закономерности в функции от  $tg_2$  или  $n$ .

Для определения этой закономерности, логарифмируем (1),

$$\ln(1 - q_{\Gamma}) = (1 - q_{\Gamma}) \cdot \ln tg_2 + x_n \cdot \ln n \quad (2)$$

откуда

$$x_n = \frac{\ln(1 - q_\Gamma) - (1 - q_\Gamma) \cdot \ln tg_2}{\ln n} . \quad (3)$$

Вычисления  $x_n$  произведены по опытным данным, заимствованным из [4]. Результаты вычислений приведены на рисунке 1 в координатной системе  $x_n = f(n)$ .

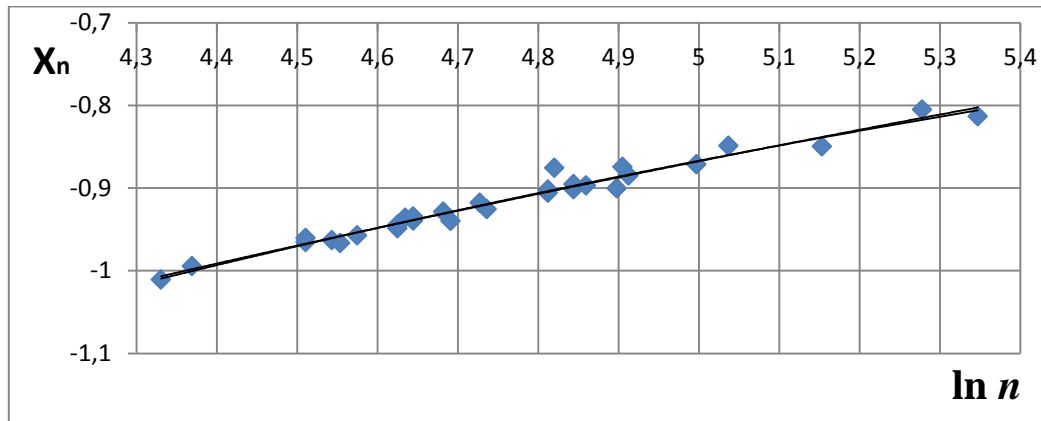


Рис. 1 – Зависимость  $x_n = f(n)$  по всему массиву исходных данных

Если учесть, что численные значения параметров  $q_\Gamma$  и  $tg_2$  заданы приближенно, то по расположению точек на рис.1 и величине разброса можно сделать заключение о том, что зависимость  $x_n = f(n)$  является не случайной. Уравнение, аппроксимирующее эту зависимость, имеет вид

$$x_n = -0,0367 \cdot (\ln n)^2 + 0,5555 \cdot (\ln n) - 2,7268 \quad (4)$$

и может быть использовано при решении уравнения (2).

При заданных значениях  $tg_2$  и  $n$  тепловые потери с отработавшими газами  $q_\Gamma$  по уравнению (2) можно определить только методом последовательных приближений.

Для сравнительной оценки влияния на достоверность определения  $q_\Gamma$  различными методами, разложим логарифмическую функцию левой части (2) в степенной ряд

$$\ln(1 - q_\Gamma) = -q_\Gamma - \frac{q_\Gamma^2}{2} - \frac{q_\Gamma^3}{3} - \frac{q_\Gamma^4}{4} - \dots . \quad (5)$$

Максимальное значение относительной величины потерь с отработавшими газами для современных судовых дизелей не превышают 0,40. При  $q_\Gamma = 0,40$  значение функции  $\ln(1 - 0,40) = -0,5108$ . Сумма первых трех слагаемых разложения (5) равна -0,5013, а четырех -0,5077. Следовательно, при удержании в разложении первых трех слагаемых погрешность равна около 2%, а четырех менее 1%.

С учетом изложенных соображений после замены  $\ln(1 - q_\Gamma)$  в левой части (2) по (5) и несложных преобразований получим:

$$q_\Gamma^4 + 1,3333 \cdot q_\Gamma^3 + 2 \cdot q_\Gamma^2 + 4 \cdot q_\Gamma \cdot (1 - tg_2) + 4 \cdot \ln tg_2 + 4 \cdot x_n \cdot \ln n = 0 . \quad (6)$$

Целесообразность перехода от (2) к (6) определяется тем, что уравнение (6) может быть решено относительно  $q_{\Gamma}$  двумя методами: методом последовательных приближений и аналитическим методом (например, методом Феррари).

Рассмотри далее последовательность формирования расчетной формулы для определения тепловых потерь с отработавшими газами в зависимости от температуры  $tg_2$  и частоты вращения коленчатого вала двигателя  $n$  на основе уравнения регрессии. Для решения задачи используем метод, подробно изложенный в работе [5].

В последующих вычислениях будем использовать безразмерные значения параметров

$$q_{\Gamma o} = \frac{q_{\Gamma}}{q_{\Gamma H}}; tg_{2o} = \frac{tg_2}{tg_{2H}}; n_o = \frac{n}{n_H}, \quad (7)$$

где индексом «о» обозначены безразмерные значения параметров, а индексом «н» - нормирующие значения параметров, которые в данном случае приняты следующими:  $q_{\Gamma H} = 0,309$ ;  $tg_{2H} = 285 \text{ } ^\circ C$ ;  $n_H = 154 \text{ мин}^{-1}$ .

Положим, что взаимосвязь между параметрами  $q_{\Gamma o}$ ,  $tg_{2o}$ ,  $n_o$  по всему массиву исходных данных может быть выражена уравнением регрессии вида:

$$x_o + x_1 \cdot n + x_2 \cdot tg_{2o} + x_3 \cdot n \cdot tg_{2o} + x_4 \cdot q_{\Gamma} = 0. \quad (8)$$

Для определения неизвестных  $x_i$  по (8) образуем систему условных однородных уравнений  $A \cdot x = 0$  и методом наименьших квадратов системами нормальных уравнений  $A^T A \cdot x = 0$ , где  $A$  - прямоугольная матрица порядка  $m \times k$  ( $m = 30$  - число уравнений;  $k = 5$  - число неизвестных);  $A^T A$  - квадратная симметричная матрица порядка  $k \times k$ ).

Из однородного характера системы  $A^T A \cdot x = 0$  следует, что искомый вектор  $x_i$  может быть определен лишь с точностью до произвольного постоянного множителя. Это обстоятельство используем для целесообразного нормирования вектора  $x_i$ .

Например, полагая  $x_4 = -1,0$ , запишем однородную систему в виде  $\bar{A} \cdot x = f$ , где  $\bar{A}$  - симметричная матрица порядка  $(k-1) \times (k-1)$ ;  $f$  - вектор - столбец свободных членов.

Если элементы матрицы  $A$  заданы точно и определитель матрицы  $A^T A$  равен нулю, то в результате решения системы  $\bar{A} \cdot x = f$  можно определить с любой наперед заданной точностью компоненты вектора  $x_i$ . В нашем случае найти точное решение уравнения  $\bar{A} \cdot x = f$  невозможно по следующим причинам:

- факторы, на основе которых составлено уравнение (8), отобраны приближенно;
- численные значения определяющих параметров  $tg_{2o}$  и  $n_o$  заданы с погрешностями.

В условиях приближенного задания исходных данных и приближенных вычислений над ними, возможность перенести в решение задачи информацию, содержащуюся в исходных данных, появляется только в том случае, если располагать количествен-

ными признаками, позволяющими контролировать ход вычислительного процесса от постановки задачи до конечных результатов.

Используем для этой цели аналитическое тождество:

$$\det(A^T A) = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdots \lambda_k. \quad (9)$$

Из (9) следует, что матрица  $A^T A$  по своим свойствам будет близка к просто вырожденной в том случае, если только собственное число  $\lambda_k$  существенно меньше предполагаемого уровня погрешности задания ее элементов, а собственные числа  $\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdots \lambda_{k-1}$  - больше этого уровня. Только при такой структуре собственных чисел может быть определено решение, соответствующее физическому смыслу задачи [5,6,7].

Здесь уместно отметить, что в силу построения матриц  $A^T A$  и  $\bar{A}$  их собственные числа всегда вещественные и положительные или равны нулю, а их значения определяются в результате решения уравнений:

$$\det(A^T A - E \cdot \lambda) = 0; \quad \det(\bar{A} - E \cdot \lambda) = 0. \quad (10)$$

С учетом изложенных теоретических предпосылок, для количественной оценки свойств матрицы  $A^T A$ , сформированной на основе уравнения (8), используем спектр ее собственных чисел:

$$\lambda_1 = 113,195; \lambda_2 = 1,509; \lambda_3 = 0,08; \lambda_4 = 0,19; \lambda_5 = 9,248 \cdot 10^{-4}. \quad (11)$$

В данном случае структура собственных чисел матрицы  $A^T A$  такова, что только число  $\lambda_5$  заведомо меньше предполагаемого уровня погрешности задания ее элементов, т.е. по своим свойствам матрица  $A^T A$  близка к просто вырожденной. Поэтому, положив  $x_4 = -1,0$ , в результате решения системы  $\bar{A} \cdot x = f$ , получены следующие численные значения неизвестных:

$$x_0 = 1,077; x_1 = -0,249; x_2 = 0,858; x_3 = 0,993. \quad (12)$$

С учетом решения (12) уравнение (8) для определения тепловых потерь с отработавшими газами двухтактных судовых дизелей принимает вид:

$$q_{Г0} = 1,077 - 0,249 \cdot n_o - 0,858 \cdot tg_{20} + 0,993 \cdot n_o \cdot tg_{20}. \quad (13)$$

Полученные решения одной и той же задачи тремя различными численными методами, используем для оценки качества этих методов.

Важнейшими из критериев оценки качества численного метода является его надежность, т.е. способность перенести в решение задачи почти всю информацию, содержащуюся в ее условии. Численный метод принято считать надежным, если при его применении решение воспроизводит исходные данные с погрешностью, не превышающей существенно неустранимую погрешность, обусловленную неопределенностью исходных данных [7].

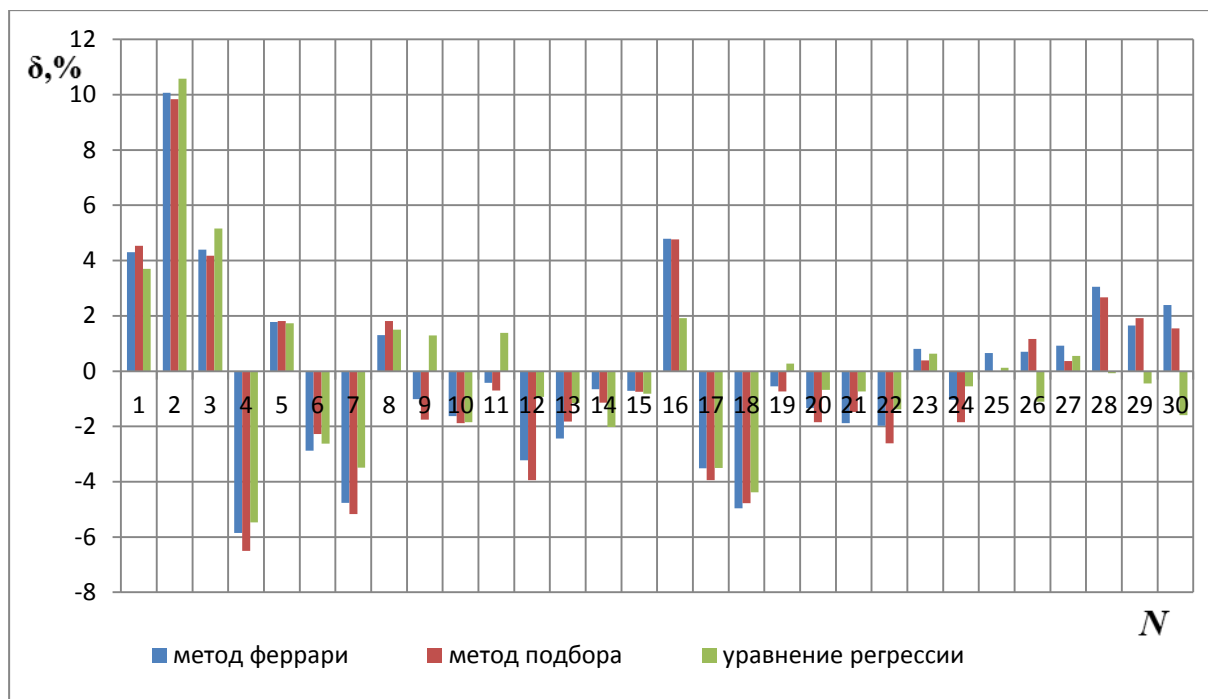


Рис. 2. Гистограммы распределения погрешностей расчета тепловых потерь с отработавшими газами двухтактных двигателей

На рисунке 2 приведены совмещенные гистограммы распределения погрешностей расчета тепловых потерь с отработавшими газами двухтактных двигателей по уравнениям (2),(6) и (13). Видно, что уравнения (2),(6) и (13) воспроизводят исходные данные примерно с одинаковой погрешностью. Только в четырех случаях суммарная погрешность расчета больше  $\pm 5\%$ .

Другими словами надежность трех используемых методов для решения одной и той же задачи примерно одинакова.

Примерно одинаковая трудоемкость, количество вычислительных операций этих методов. Из трех методов для решения практических задач наиболее удобным является уравнение регрессии.

### Выводы

1. Показана возможность формирования расчетных зависимостей для определения тепловых потерь с отработавшими газами двухтактных судовых дизелей на основе параметров доступных для оперативного контроля в судовых условиях тремя численными методами.

2. Трансцендентная зависимость, уравнение четвертой степени относительно  $q_{ГО}$  и уравнение регрессии воспроизводят опытные данные примерно с одинаковой погрешностью, однако процесс определения  $q_{ГО}$  по уравнению регрессии существенно проще.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гухман А. А. Введение в теорию подобия. — 2-е изд. — М.: Высшая школа, 1973. — 296 с.
2. Костин, А.К. Теплонапряженность двигателей внутреннего сгорания: Справ.пособие / Костин, А.К., Ларионов, В.В., Михайлов, Л.И. - Л.: Машиностроение, 1979. - 222с.
3. Ковальчук Л. И. Трансцендентные зависимости для оценки тепловых потерь в охлаждающую воду / И. Л. Алексеев, Л. И. Ковальчук // Двигателестроение. - 2009. - N 1. - С. 18-20.
4. Бехрендт Ц. Математические модели функционального судового энергетического комплекса с глубокой утилизацией теплоты// Дисс. ...докт. техн. наук. — Калининград.2004.-374 с.
5. Ланцош, К. Практические методы прикладного анализа: справ. руководство / К. Ланцош; пер. с англ. М. З. Кайнера; под ред. А. М. Лопшица. - М.: ГИФМЛ, 1961. — 524 с.
6. Кублановская, В. Н. Численные методы алгебры / В. Н. Кублановская. - Л.: ЛКИ, 1978. - 112 с.
7. Фадеев, Д. К. Вычислительные методы линейной алгебры / Д. К. Фадеев, В. Н. Фадеева.4-е изд. Стер. — СПб.: Лань, 2009. - 736 с.

### **ESTIMATION OF PRACTICAL METHODS QUALITY OF CALCULATING PARAMETERS OF MULTIFACTOR MODELS**

Kovalchuk Leonid Ignatievich, Dr. hab., Professor  
Isaeva Marina Vasilievna, Assistant

Baltic fishing fleet state academy FSBEI HE "KSTU", Kaliningrad, Russia,  
e-mail: bgarf1988@inbox.ru

*The use of known dependencies on the removal of heat from exhaust gases does not connect these losses with the parameters of the engines available for operational control in ship conditions. Indirect dependences are proposed for estimating the relative heat losses with the exhaust gases of modern two-stroke engines in which these dependences are expressed as a function of the temperature of the exhaust gases and the speed of the crankshaft, which have great versatility and are sufficient for solving practical problems in accuracy.*

## О ТЕПЛОВОМ РАСЧЁТЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ ТЭС

Кункевич Сергей Владимирович, канд. техн. наук, доцент

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,  
Калининград, Россия, e-mail: SKunkevich@mail.ru

*Рассмотрены алгоритмы теплового расчёта теплообменных аппаратов ТЭС, применение современных программных средств, упрощающих проведение расчётов, а также применение собственных разработок в учебном процессе*

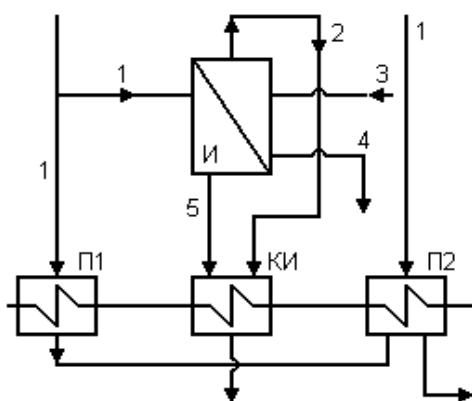
Тепловой поверочный расчёт теплообменных аппаратов является довольно трудоёмкой задачей в образовательном процессе, поскольку алгоритм расчёта предусматривает решение нелинейных уравнений и их систем, производство итерационных вычислений различных параметров. Причём объем вычислений получается весьма внушительным, если необходимо обеспечить приемлемую точность вычислений (порядка 2-5%), положение усугубляет также наличие вложенных циклов.

### 1. Тепловой расчёт испарителя

#### 1.1. Алгоритм расчёта испарителя

В качестве примера рассмотрим укрупнённый алгоритм теплового поверочного расчёта поверхностного испарителя, который представлен на рис. 2.

За основу взята конструкция испарителя [1], схема включения которого предполагает подачу вторичного пара на собственный конденсатор испарителя, т.е. схему «без потери потенциала», рис. 1.



- И – испаритель;
- КИ – конденсатор испарителя;
- П1, П2 – подогреватели низкого давления;
- 1 – подвод греющего пара;
- 2 – отвод вторичного пара;
- 3 – подвод питательной воды;
- 4 – продувка;
- 5 – отвод конденсата греющего пара.

*Рис. 1 Схема включения испарителя в систему регенеративного подогрева основного конденсата турбины;*

Основной целью расчёта является определение коэффициента теплопередачи испарителя, его производительности, величины давления вторичного пара при соответствующих параметрах конденсатора испарителя, температурного напора.

Коэффициент теплопередачи является ключевым фактором, определяющим остальные параметры, поэтому в самом начале расчёта задаётся начальным значением



этого коэффициента, исходя из известного априори диапазона значений для поверхностных испарителей.

Производительность испарителя  $D_{и}$  находится из совместного решения уравнений баланса собственно испарителя (1) и конденсатора испарителя (2) в соответствии с [2].

$$D_{и} \cdot (h''_{вт} - h_{пв.и}) + p \cdot (h'_{ки} - h_{пв.и}) = k_{и} \cdot F_{и} \cdot \Delta t_{и} \quad (1)$$

$$D_{и} \cdot (h''_{вт} - h'_{вт}) \cdot \eta_{ки} = G_{ок} \cdot \Delta h_{ок.ки} \quad (2)$$

Где  $h''_{вт}$  и  $h'_{вт}$  – энтальпии пара и его конденсата при давлении вторичного пара, кДж/кг;  $\Delta h_{ок.ки}$ ,  $h_{пв.и}$  – перепад энтальпий основного конденсата в конденсаторе испарителя и энтальпия питательной воды испарителя, кДж/кг;  $G_{ок}$  – расход основного конденсата через конденсатор испарителя, кг/с.

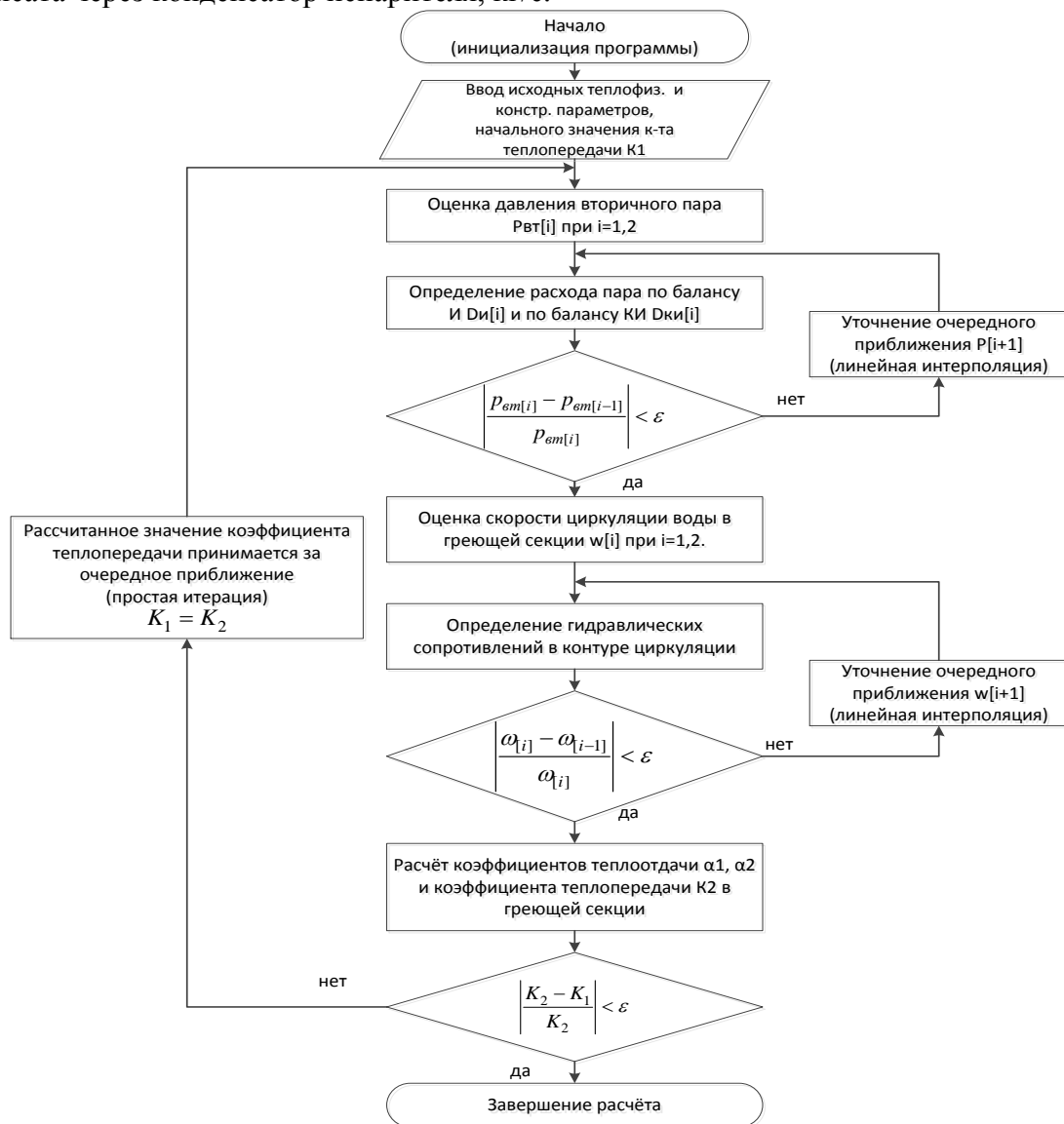


Рис. 2 Укрупнённая блок-схема теплового поверочного расчёта поверхностного испарителя.

Последующее приближение давления вторичного пара  $p_{i+1}$  находится методом линейной интерполяции по двум предыдущим итерациям давления  $p_{i-1}$ ,  $p_i$  и соответствующим им расходам пара испарителя и конденсатора испарителя по формуле (3):

$$p_{i+1} = p_i + (p_i - p_{i-1}) \cdot \frac{D_{и_i} - D_{ки_i}}{(D_{и_{i-1}} - D_{ки_{i-1}}) - (D_{и_i} - D_{ки_i})}, \quad (3)$$

Аналогичным образом вычисляется скорость циркуляции в греющей секции по формуле (4):

$$\omega_{i+1} = \omega_i + (\omega_i - \omega_{i-1}) \cdot \frac{\Delta p_{п.i} - \Delta p_{пдв.i}}{(\Delta p_{п.i-1} - \Delta p_{пдв.i-1}) - (\Delta p_{п.i} - \Delta p_{пдв.i})}, \quad (4)$$

Где  $\omega$  – скорость циркуляции воды в греющей секции, м/с;  $\Delta p_{п}$ ,  $\Delta p_{пдв}$  – соответственно полезный напор и потери давления в подводящих линиях греющей секции, Па.

Если найденное значение коэффициента теплопередачи отличается от ранее принятого значения на величину, превышающую допускаемую погрешность, то производится его перерасчёт методом простой итерации, рис.2.

### 1.2. Автоматизация расчёта испарителя

С целью контроля процесса расчёта испарителей в образовательном процессе разработана компьютерная программа (рис. 3), позволяющая полностью автоматизировать расчёт, получить промежуточные результаты расчёта в виде чисел и графиков.

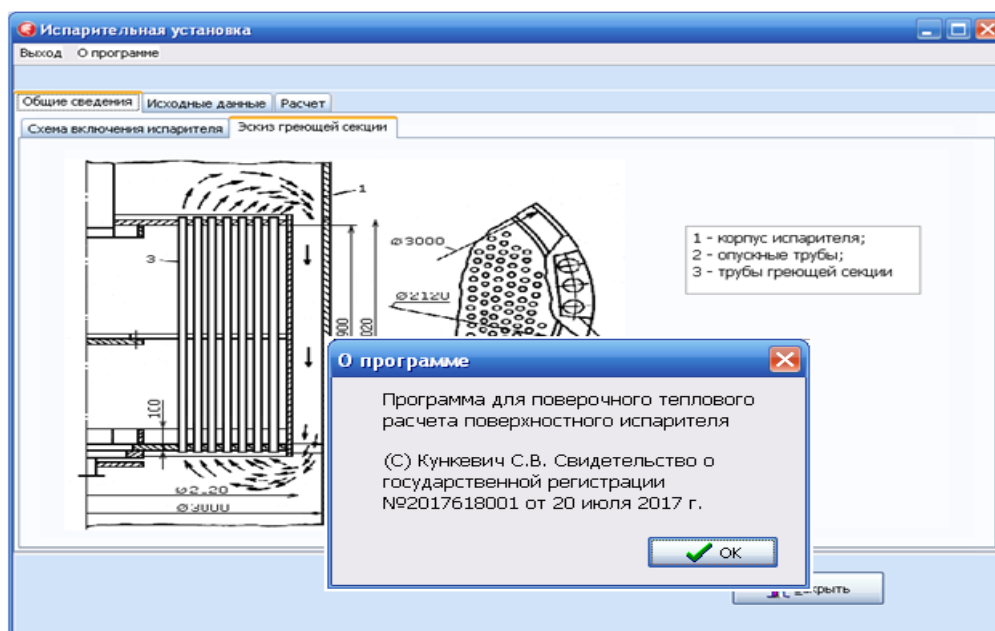


Рис. 3 Общий вид программы расчёта испарителя

Графическое представление результатов расчёта позволяет упростить понимание технологии расчётов, а также процессов, происходящих в изучаемом оборудовании. На рис. 4 представлена графическая интерпретация процесса решения системы

уравнений для нахождения производительности и давления вторичного пара испарителя.

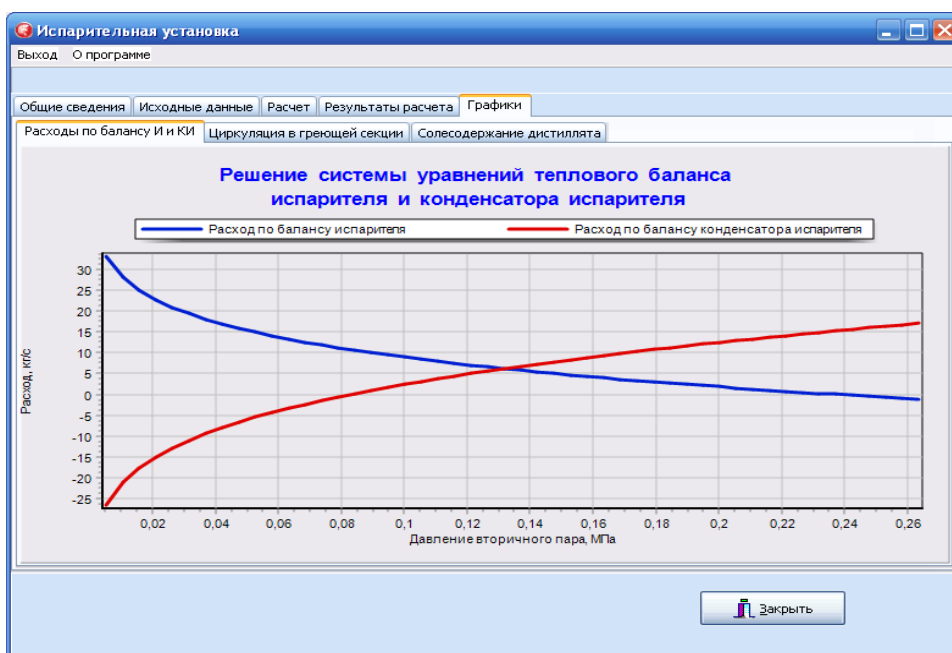


Рис. 4 Графическое представление решения системы уравнений по формулам (1, 2) для испарителя

Программу можно использовать в учебных целях, например:

- для исследования зависимости производительности испарителя от различных параметров (например, давления первичного пара, расхода основного конденсата через конденсатор испарителя);
- для определения границы применимости питательной воды испарителя в отношении её солености и величины непрерывной продувки для различных типов котлов, применяя одно- и двухступенчатую промывку вторичного пара (рис. 5) и др.

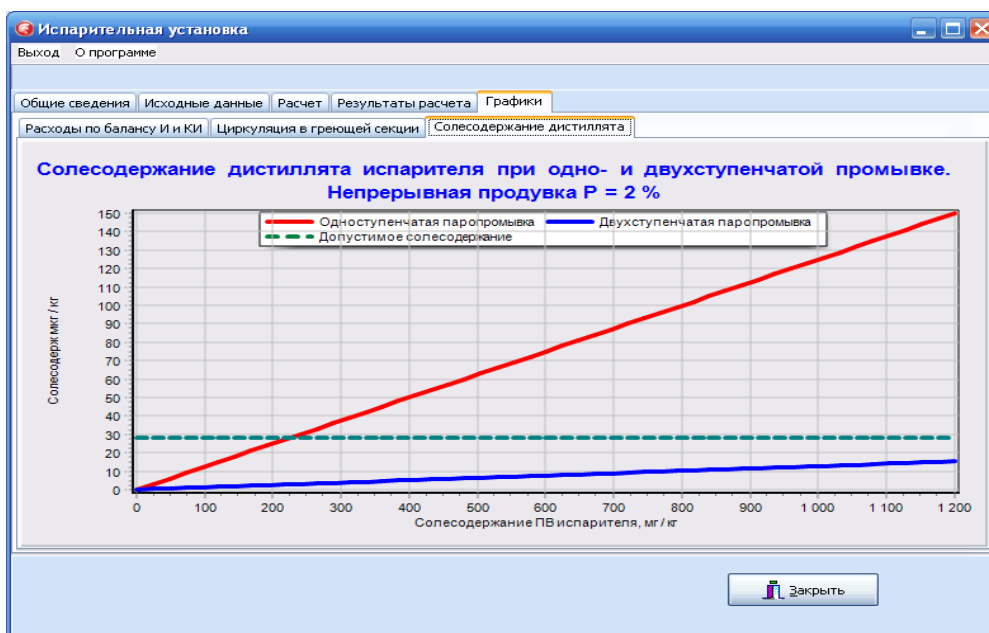


Рис. 5 Соленость дистиллята испарителя при одно- и двухступенчатой промывке пара

## 2. Тепловой расчёт ПВД

### 2.1. Алгоритм расчёта ПВД

В качестве ещё одного примера рассмотрим алгоритм расчёта подогревателя высокого давления, укрупнённая блок-схема которого изображена на рис. 6.

В основе расчёта подогревателей высокого давления, как и других теплообменников, лежат уравнения теплового баланса и теплопередачи. Целью расчёта является определение количества теплоты, передаваемой в охладителе пара (ОП), собственно подогревателе (СП) и охладителе конденсата (ОК) по балансовым уравнениям. По уравнениям теплопередачи определяются также коэффициенты теплопередачи, средне-логарифмические температурные напоры и площади поверхностей нагрева ОП, СП и ОК.

Для ПВД системы регенерации турбоустановки уравнение теплового баланса имеет вид [2]:

$$Q = D_{\text{п}} \cdot (h_{\text{п}} - h_{\text{др}}) \cdot \eta_{\text{то}} = G_{\text{пв}} \cdot (h''_{\text{в}} - h'_{\text{в}}) \quad (5)$$

Для подогревателя, в котором предусмотрены охладитель пара и охладитель конденсата греющего пара, поток теплоты будет складываться из:

$$Q = Q_{\text{оп}} + Q_{\text{сп}} + Q_{\text{ок}} \quad (6)$$

Количество теплоты, передаваемое в отдельной поверхности нагрева:

– в охладителе конденсата

$$Q_{\text{ок}} = D_{\text{п}} \cdot (h'_{\text{п}} - h_{\text{др}}) \cdot \eta_{\text{то}} = G_{\text{ок}} \cdot (h''_{\text{в.ок}} - h'_{\text{в.ок}}) \quad (7)$$

– в собственно подогревателе

$$Q_{\text{сп}} = D_{\text{п}} \cdot (h_{\text{сп}} - h'_{\text{п}}) \cdot \eta_{\text{то}} = G \cdot (h''_{\text{в.сп}} - h'_{\text{в.сп}}) \quad (8)$$

– в охладителе пара

$$Q_{\text{оп}} = D_{\text{п}} \cdot (h_{\text{п}} - h_{\text{оп}}) \cdot \eta_{\text{то}} = G_{\text{оп}} \cdot (h''_{\text{в.оп}} - h'_{\text{в.оп}}) \quad (9)$$

В формулах (5–9)  $h_{\text{оп}}$  – удельная энтальпия пара на выходе ОП;  $h'_{\text{п}}$  – удельная энтальпия конденсата при температуре насыщения;  $G_{\text{ок}}$ ,  $G_{\text{оп}}$ ,  $G$  – расходы воды через ОК, ОП и подогреватель в целом;  $D_{\text{п}}$  – расход греющего пара;  $\eta_{\text{то}}$  – КПД теплообменника; индексы ок, сп, оп относятся, соответственно, к параметрам охладителя конденсата, собственно подогревателя и охладителя пара.

При расчёте ПВД по уравнениям теплопередачи наибольшую трудность представляет собой расчёт теплообмена при фазовом переходе, т.е. при конденсации пара в собственно подогревателе, т.к. в данном случае необходимо найти температуру стенки, которая рассчитывается методом итераций.

Начальную температуру стенки можно принять как среднеарифметическую между температурой насыщения пара  $t_{\text{н}}$  и средней температурой воды в СП  $t_{\text{в.сп}}$ :

$$t_{CT} = \frac{t_H + t_{B.CP}}{2} \quad (10)$$

Далее рассчитывается комплекс теплофизических параметров  $b$ , который, в свою очередь, также зависит от температуры стенки  $b = f(t_{CT})$ , т.к. теплофизические параметры в формуле являются функциями температуры стенки [2]:

$$b = 0,904 \cdot \left( \frac{r_K}{d_{нар}} \right)^{0,25} \times \left( \frac{\lambda_K^3 \cdot \rho_K \cdot (\rho_K - \rho_{II}) \cdot g}{\mu_K} \right)^{0,25}, \quad (11)$$

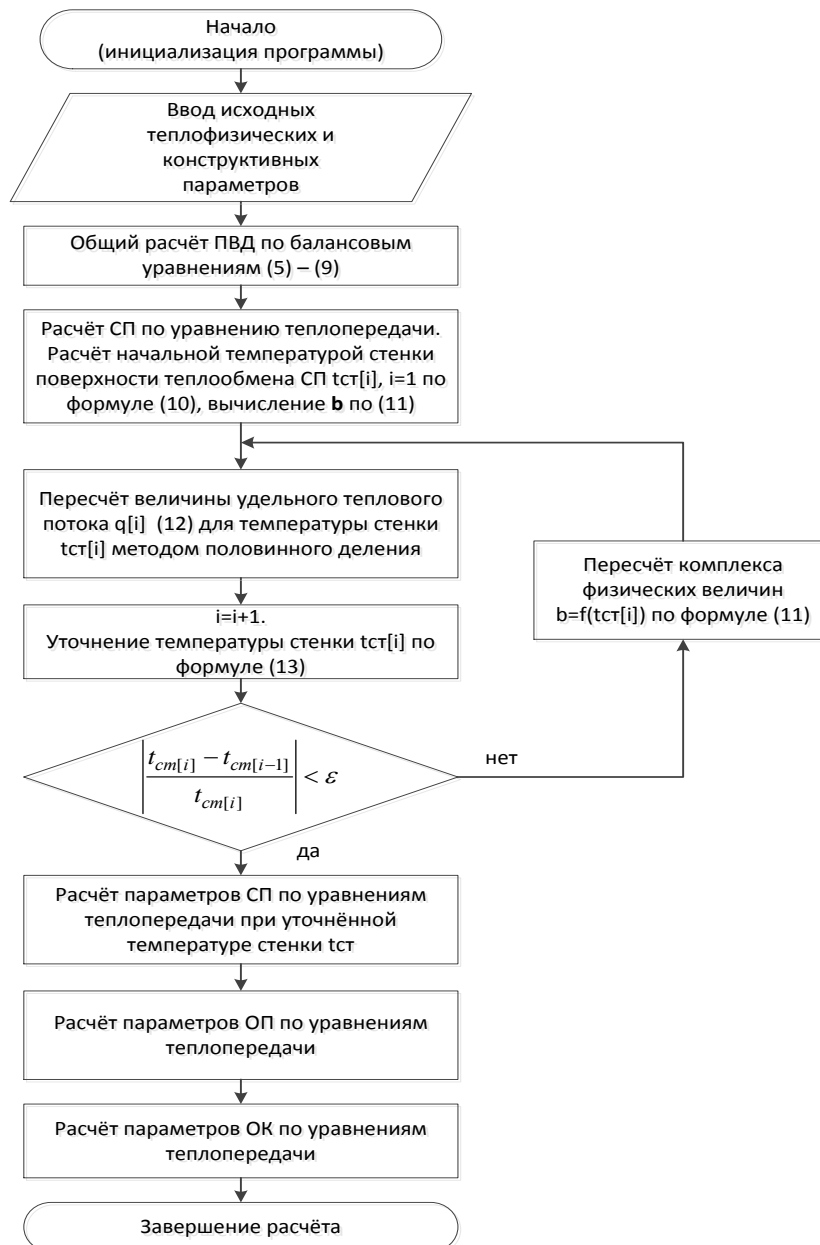


Рис. 6 Укрупнённая блок-схема теплового поверочного расчёта подогревателя высокого давления системы регенерации турбины

где  $r_K$  – скрытая теплота конденсации, кДж/кг;  $\lambda_K$  – удельная теплопроводность плёнки конденсата, Вт/(м·К);  $\rho_K$ ,  $\rho_P$  – плотность конденсата и пара, м<sup>3</sup>/кг;  $\mu_K$  – удельная динамическая вязкость конденсата, Па·с;  $d_{нар}$  – наружный диаметр трубок, м.

Расчёт удельного теплового потока  $q_{СП}$  для принятой предварительно температуры стенки СП рассчитывается методом половинного деления, исходя из формулы:

$$\Delta t_{cp,сп} - \left( \frac{q_{сп}}{b} \right)^{\frac{4}{3}} - q_{сп} \cdot \left( R_{сп} + \frac{1}{\alpha_{2,сп}} \right) = 0, \quad (12)$$

Где  $\Delta t_{cp,сп}$  – среднелогарифмический температурный напор, рассчитанный для СП при вычислениях по балансовым уравнениям;  $R_{сп}$  – термическое сопротивление стенки трубы, (м<sup>2</sup>·К)/Вт;  $\alpha_{2,сп}$  – коэффициент теплоотдачи от стенки к воде СП, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

И, наконец, производится уточнение температуры стенки по найденному значению удельного теплового потока  $q_{сп}$  по формуле:

$$t_{ст} = t_H - \left( \frac{q_{сп}}{b} \right)^{\frac{4}{3}} \quad (13)$$

Далее, если величина  $t_{ст}$  не отличается от ранее принятого значения более величины допускаемой погрешности, то расчёт считается законченным. В противном случае расчёт повторяется с формулы (11) и за начальное значение температуры принимается уточнённое значение  $t_{ст}$ , определённое по формуле (13).

## 2.2. Автоматизация расчёта ПВД

Аналогично принципам, заложенным в программу расчёта испарителя, разработана программа теплового расчёта подогревателя высокого давления системы регенеративного подогрева питательной воды, рис. 7.

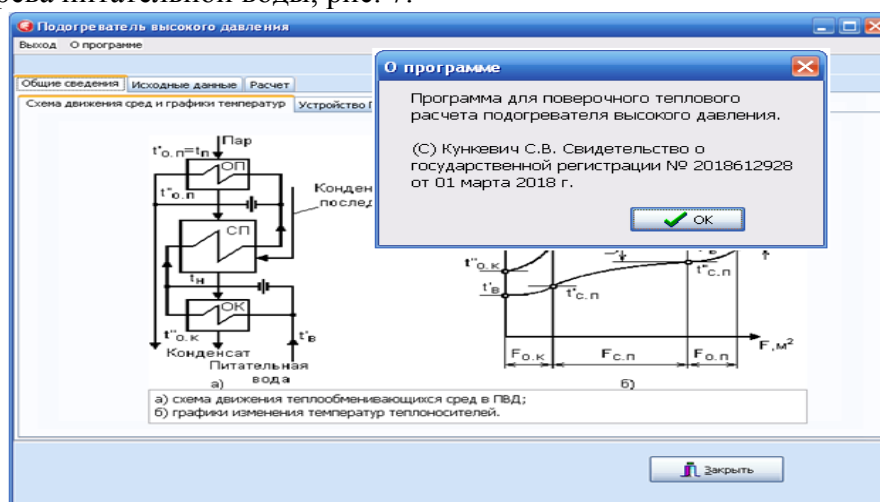


Рис. 7 Общий вид программы расчёта ПВД

С помощью рассмотренных программ есть возможность оценить трудоёмкость расчётов в зависимости от установленной степени точности вычисления определённых параметров, опираясь на количество требуемых итераций при расчёте данных параметров (количество итераций подсчитывается программой).

Результаты расчёта подогревателя высокого давления представляются как в числовом, так и в графическом виде, рис. 8.

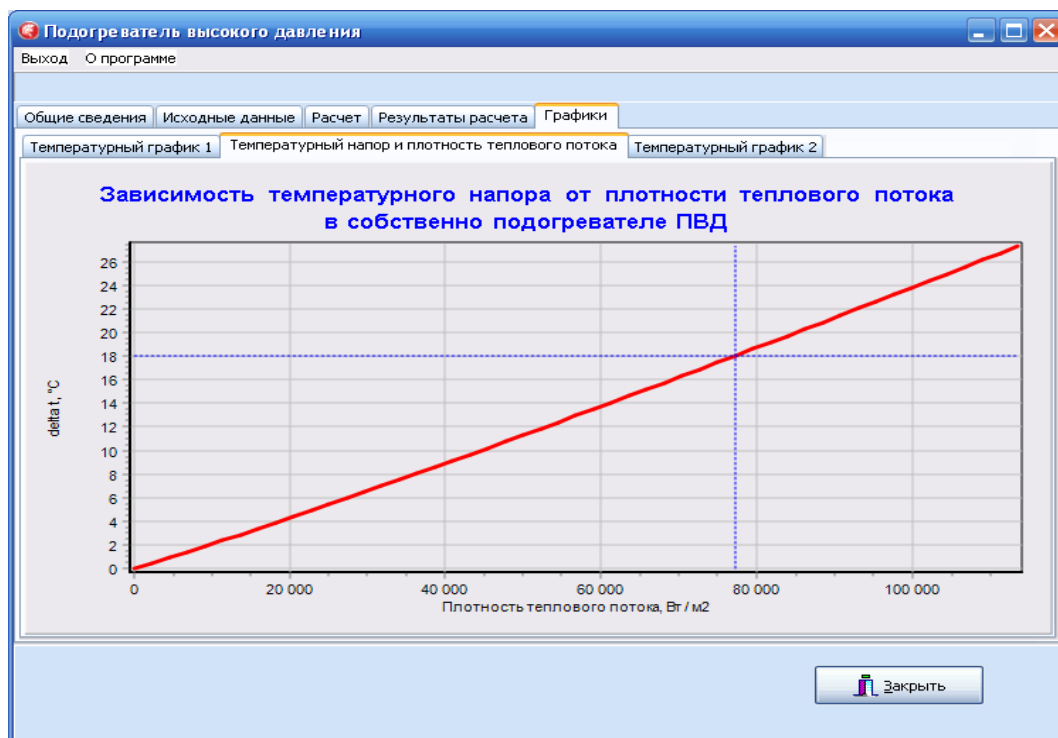


Рис. 8 Зависимость температурного напора от плотности теплового потока ПВД

### 3. Способы реализации алгоритмов

Для реализации алгоритмов теплового расчёта теплообменных аппаратов можно воспользоваться следующими способами:

– **ручной счёт** (общедоступно и универсально, но трудоёмко). При этом свойства воды и водяного пара можно брать из специальных таблиц [3] или, что более удобно, пользоваться специальными электронными теплотехническими калькуляторами ENEKcalc [5] или WaterSteamPro [4].

– **применение специализированных математических пакетов** (Mathcad, SMath и др.) – наиболее удобный способ автоматизации и документирования расчётов, особенно при решении нелинейных уравнений и систем, а также автоматическом вычислении различных математических выражений и функций состояния воды и водяного пара. Наряду с применением функций состояния воды и водяного пара [4,5], можно воспользоваться свободно распространяемой библиотекой CoolProp [6], которая имеет в своём составе также функции для расчёта термодинамических свойств ещё более 120 компонентов. Главный недостаток таких математических пакетов – неразвитые возможности программирования и отладки, что не позволяет полноценно проводить итерационные вычисления с большим объёмом кода и вложенными циклами.

– **применение алгоритмических языков программирования** (C/C++, Basic, Pascal и др.). Наиболее универсальный и гибкий способ расчёта. Недостаток – необходимы

специфические знания и опыт программирования. Кроме того, требуется наличие специализированных библиотек математических функций для решения различных уравнений и их систем.

#### 4. Заключение

Применение средств автоматизации в учебном процессе позволяет сократить время расчётов и сконцентрироваться на более глубоком изучении сути происходящих процессов и изучаемом оборудовании. Программные средства позволяют проводить исследования взаимосвязи и взаимозависимости различных геометрических и режимных параметров тепловых аппаратов в рамках реализованной математической модели.

Рассмотренные программные средства имеют значительный потенциал для расширения функциональности с целью их применения, например, при изучении переменных режимов ТЭС.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 10731-85 Испарители поверхностного типа для паротурбинных электростанций. Общие технические условия.
2. Назмеев Ю.Г., Лавыгин В.М. Теплообменные аппараты ТЭС. М.: Издательский дом МЭИ, 2007, 269 с.
3. Александров А.А., Григорьев Б.А. Таблицы термодинамических свойств воды и водяного пара. М.: Издательство МЭИ, 1999, 168 с.
4. <http://www.wsp.ru/ru/> - сайт программы WaterSteamPro – свойства воды и водяного пара.
5. <http://www.tef.kgtu.runnet.ru/> - сайт программы свойств воды и водяного пара ENEKcalc.
6. <http://coolprop.sourceforge.net/> - сайт свободно распространяемой библиотеки свойств веществ CoolProp.

#### ABOUT THERMAL CALCULATION OF HEAT EXCHANGE APPARATUSES OF TPP

Kunkevich Sergey Vladimirovich, candidate of Science, associate Professor

Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,  
e-mail: SKunkevich@mail.ru

*Features of thermal calculation of heat exchangers in the educational process, application of modern software, as well as the use of their own developments in the learning process are considered.*



## ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПЕЧЕЙ СПЕКАНИЯ

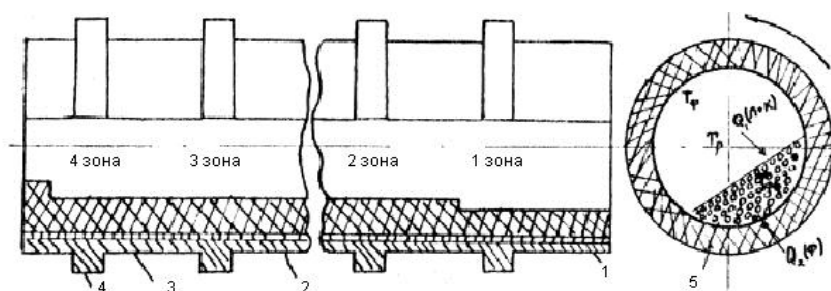
Никифоров Александр Степанович, профессор, д-р техн. наук,  
Кинжибекова Акмарал Кабиденовна, канд. техн. наук,  
Приходько Евгений Валентинович, доцент, канд. техн. наук, профессор  
Карманов Амангельды Ерболович, ст. преподаватель

Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова, г. Павлодар,  
Казахстан, e-mail: aleke4599@mail.ru

*Производится анализ эффективности тепловой работы печей спекания. По результатам термоаудита составлен тепловой баланс печи, где показаны основные статьи прихода и расхода теплоты действующего агрегата. Проведён анализ, который показывает, что на долю потерь теплоты в окружающую среду приходится чуть больше пяти процентов, т.е. реальные потери оказались значительно меньше, чем принимаемые априори*

В настоящее время в мировой и отечественной практике процессы спекания и кальцинации гидроокиси алюминия осуществляют во вращающихся трубчатых печах.

Мощные вращающиеся печи диаметром до 5 м и длиной более 100 м покоятся на жестких опорах. Сварной цилиндрический корпус, изготовленный из листовой стали толщиной 30-60 мм, состоит из обечаек – звеньев, установленных бандажами на роликовых опорах с уклоном 2 % в сторону выхода материала. Изнутри корпус защищен от высоких температур футеровкой, выполненной из шамотного кирпича и жароупорного бетона различной конфигурации (Рис. 1)



1 - шамотный огнеупор; 2 - засыпка; 3 - корпус; 4 - бандаж

Рисунок 1 - Разрез вращающейся печи

Печи спекания по технологии производства глинозема можно условно разделить на 4 зоны. В них перерабатывается шихта из смеси красного шлама, известняка и соды. Здесь первая зона – зона сушки и подогрева сырья с температурой порядка 500 °С; вторая зона – зона кальцинирования, где температура среды достигает 900 °С; третья зона – зона спекания, где температура возрастает до своего максимального значения 1100-1250 °С; в четвертой зоне полученный спек начинает охлаждаться. Отходящие из печи газы имеют температуру порядка 250-350 °С.

Таким образом, как следует из приведенных данных, огнеупорные материалы футеровки печей эксплуатируются в сложных температурных условиях. Стойкость кладки в таких мощных печах составляет лишь 150-200 суток и в среднем 7 % календарного времени эти печи простаивают из-за ремонта футеровки [1].

Рассмотрим более подробно причины и характер разрушения футеровки вращающихся печей.

Основными причинами, приводящими к разрушению огнеупорной защиты печей, являются:

- а) сколы элементов огнеупорного кирпича;
- б) вспучивание футеровки;
- в) химическое взаимодействие между обрабатываемым материалом и поверхностью футеровки;
- г) абразивное истирание огнеупорной поверхности.

Степень влияния указанных причин на стойкость футеровки проявляется по-разному в зависимости от места нахождения рассматриваемой зоны печи.

Например, химическое взаимодействие перерабатываемого продукта с огнеупором имеет место только в тонком поверхностном слое кирпича. Толщина образующейся при этом реакционной зоны не превышает 4 мм. Даже в зоне прокали, где футеровка находится под воздействием наиболее высоких температур, износ огнеупоров оплавлением их рабочей поверхности составляет в среднем всего лишь 3-5 мм.

Наибольший износ футеровки истиранием ее рабочей поверхности имеет место в зоне подогрева, где вследствие низкой температуры гарнисаж не образуется, и в зоне охлаждения, где исходный материал приобретает высокую твердость. Однако износ футеровки в этих зонах вследствие абразивного воздействия, не превышает 8 мм за эксплуатационный период.

Вспучивание кладки возникает при неправильном расчете и выполнении температурных швов, так как расширение огнеупоров при локальном перегреве не успевает компенсироваться.

Результаты обследования печей показывают, что основным видом разрушения футеровки является скалывание ее поверхностных слоев.

Одной из причин такого характера разрушения является наличие значительных температурных градиентов по сечению футеровки [2].

Кроме того, в результате вращения печи, деформаций поперечного и продольного изгиба, появления скручивания при пуске и останове ВТУ футеровка испытывает значительные знакопеременные механические напряжения.

Необходимо отметить, что современные мощные вращающиеся печи работают под открытым небом, например, в Павлодаре (Республика Казахстан) и в Ачинске (Российская Федерация), т. е. эксплуатируются в сложных климатических условиях, что также влияет на надежность работы этих агрегатов.

Несмотря на значительные габариты и сложность теплообменных процессов эффективность тепловой работы печей непосредственно влияет на надежность элементов футеровки.

Одним из критериев оценки энергетической эффективности являются потери теплоты через ограждающие конструкции. Как правило, величину потерь из-за сложности и громоздкости расчета материальных и тепловых балансов определяют по остаточному принципу в доле от теплоты сгорания топлива. В частности, для рассматриваемых печей она берется в количестве 10 %.

Проанализируем тепловой баланс печи по результатам термоаудита.

Тепловой баланс отражен в таблице 1.

## Тепловой баланс печи спекания

Наименование статей расхода	кДж	%	Наименование статей прихода	кДж	%
На испарение воды и перегрев водяных паров до температуры отходящих газов	$2572,27 \cdot 10^3$	50,2	физического с шихтой	$35,24 \cdot 10^3$	0,73
с углекислотой от разложения карбонатов в процессе спекания	$108,53 \cdot 10^3$	2,1	физического с топливом	$8,92 \cdot 10^3$	0,18
на эндотермические реакции	$394,73 \cdot 10^3$	7,7	физического с оборотной пылью	$70,2 \cdot 10^3$	1,45
с выходящим из печи спеком	$1170 \cdot 10^3$	22,9	физического с подогретым воздухом	$494,78 \cdot 10^3$	10,22
тепло с оборотной пылью	$100,74 \cdot 10^3$	1,96	за счет сгорания топлива	3314,04	68,5
тепло с безвозвратной пылью	$2,69 \cdot 10^3$	0,05	за счет экзотермических реакций	$913,83 \cdot 10^3$	18,9
тепло с отходящими газами от сжигания топлива при температуре отходящих газов	506,93	9,9			
потери в окружающую среду	$265,52 \cdot 10^3$	5,2			
ИТОГО	$5121,41 \cdot 10^3$	100	ИТОГО	$4837,01 \cdot 10^3$	100

Как следует из баланса на долю потерь в окружающую среду приходится чуть больше пяти процентов, т.е. реальные потери оказались значительно меньше, чем принимаемые априори. Прежде всего это можно объяснить тем, что за определяющий параметр принимается теплота сгорания топлива. И если для теплогенерирующих установок (например, котельных агрегатов) это в большей степени приемлемо, то для технологических установок (каким является печь спекания) это не совсем объективный показатель, так как в приходной части кроме тепла, которое приходит за счет сгорания топлива имеется существенная доля (почти двадцать процентов) поступающая за счет экзотермических реакций технологических материалов.

Следовательно, и такой важный показатель как удельный расход топлива также будет меняться.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никифоров А.С. Надежность работы футеровок металлургических печей. – Павлодар: ЭКО, 2003. – 110 с.

2. Никифоров А.С. Анализ теплового состояния вращающихся печей // Вестник Карагандинского технического университета. 2002. № 1. – С.11-12.

### **ENERGY EFFICIENCY OF OPERATION OF SANDING OVEN**

Nikiforov Aleksandr Stepanovich, prof., doctor of technical sciences,  
Kinzhibekova Akmaral Kabidenovna, Ph.D., associate prof.  
Prihod'ko Evgenij Valentinovich, Ph.D., prof.  
Karmanov Amangeldy Erbolovich, the senior teacher

The Pavlodar State University. S. Toraigyrov  
Pavlodar, Kazakhstan, e-mail: aleke4599@mail.ru

*This article analyzes the efficiency of the thermal operation of sintering furnaces. Based on the results of the thermal audit, the heat balance of the furnace is compiled, where the main articles of the arrival and consumption of heat of the operating unit are shown. The analysis is carried out, which shows that the share of heat losses in the environment is slightly more than five percent, i.e. the real losses turned out to be much less than the a priori taken.*

УДК 621.431

### **АЛГОРИТМ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ СУДОВ РЫБОПРОМЫСЛОВОГО ФЛОТА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ДИАГНОСТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА**

Одинцов Виктор Иванович, д-р техн. наук, профессор

Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота  
ФГБОУ ВО «КГТУ», Калининград, Россия,  
e-mail: seu@bga.gazinter.net; bgarf1988@inbox.ru

*Диагностирование технического состояния судовых ДВС заключается в сравнении текущих показателей работы с эталонными. Обычно в качестве эталонных значений применяются результаты стендовых испытаний двигателя на заводе-изготовителе или в период сдаточных испытаний, что не учитывает влияния эксплуатационных факторов. Это затрудняет процесс диагностирования. Предложен алгоритм, устраняющий вышеназванные недостатки*

Суда флота рыбной промышленности эксплуатируются в различных зонах Мирового океана, которые отличаются гидрометеорологическими условиями. Одновре-

менно изменяется техническое состояние основных узлов двигателя. Гидрометеорологические условия включают: силу и направление ветра, глубину под килем, барометрическое давление, относительную влажность и температуру окружающего воздуха, уровень волнения моря, температуру и уровень солености заборной воды.

Из-за обилия действующих факторов трудно, а иногда и невозможно, оценить влияние каждого из них на показатели работы двигателя из-за высокой трудоемкости и больших затрат на проведение эксперимента, так как все процессы взаимосвязаны. Следовательно, на наш взгляд, более предпочтительным является метод моделирования процессов протекающих в дизеле, на ЭВМ. Такой-же подход принят в [1].

На рисунке 1 представлено влияние действующих эксплуатационных факторов на процесс сгорания и его параметры.

Совместное и раздельное воздействие эксплуатационных факторов приводит к снижению коэффициента избытка воздуха при сгорании, снижению экономичности, увеличению выбросов вредных веществ с отработавшими газами (углеводородов, оксидов азота и др.). Одновременно повышается теплонапряженность деталей цилиндропоршневой группы.

Количество воздуха в конце процесса сжатия при текущем техническом состоянии деталей ЦПГ и атмосферных условиях можно выразить следующими уравнениями:

$$G_{cx} = G_{ax} - \Delta G_{умх} - \Delta G_{влх}, \quad (1)$$

где  $G_{ax}$  - масса воздуха в цилиндре двигателя в момент начала сжатия;  
 $\Delta G_{умх}$  - потери воздуха в период сжатия через неплотности деталей ЦПГ;  
 $\Delta G_{влх}$  - снижение коэффициента избытка воздуха из-за наличия паров воды.

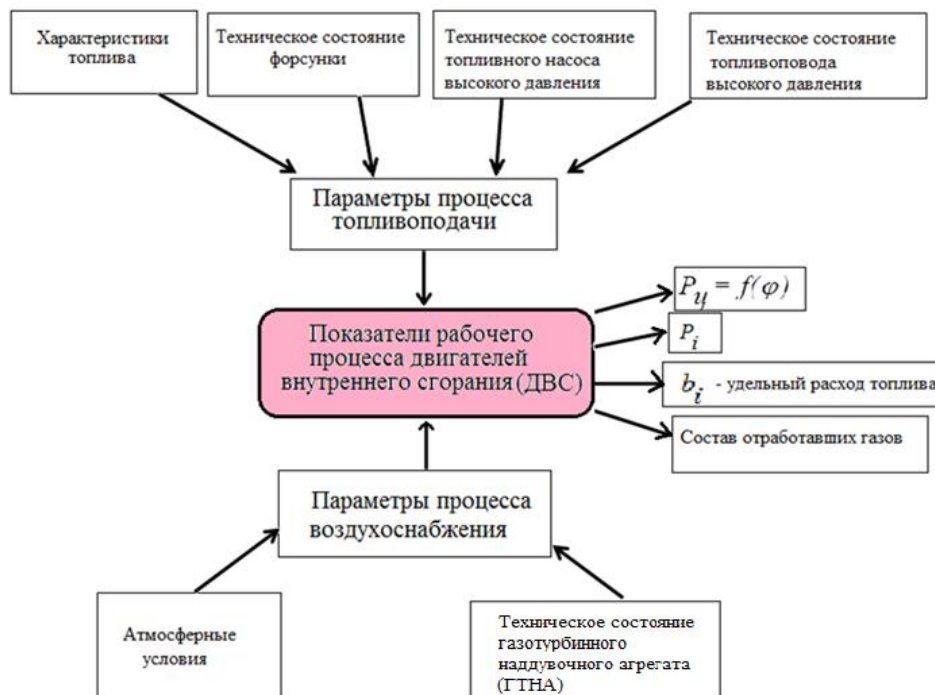


Рис. 1. Показатели рабочего процесса

Из уравнения состояния по измеренной величине давления в конце сжатия  $P_c$  (учитывающей утечки через неплотности деталей ЦПГ на линии сжатия) и известному значению объема камеры сжатия  $V_c$  и (1) найдем:

$$G_{cx} = \frac{P_{cx} V_{cx}}{RT_{cx}} - \Delta G_{вх}, \quad (2)$$

где  $P_{cx}$  и  $T_{cx}$  - давление и температура рабочего тела в конце процесса сжатия при текущих внешних условиях,

$V_{cx}$  - объем камеры сгорания,

$R$  - газовая постоянная.

Температура в конце процесса сжатия ( $T_c$ ) вычисляется по известным из теории рабочего процесса формулам.

Наличие паров воды в воздухе, поступающем в дизель, снижает количество кислорода и, следовательно, ухудшает качество процесса сгорания. Влагосодержание оценивается по известным формулам [1,2].

Сохранение заданной скорости свободного хода или траления в условиях повышения сопротивления движению судна возможно путем повышения цикловых подач топлива, что приводит к увеличению механических и тепловых напряжений в деталях ЦПГ сравнительно с паспортными условиями.

Износ прецизионной поверхности плунжерной пары, нарушение герметичности уплотнительных поверхностей приводит к увеличению утечек и, следовательно, к снижению давления топлива в форсунке в период топливоподачи. Уменьшаются геометрические параметры топливных струй (длина, угол конуса), увеличивается средний диаметр капель распыленного топлива, ухудшается процесс сгорания. Влияние уменьшения давления топлива на контролируемые параметры рабочего процесса ДВС выражается следующими приближенными зависимостями (3) – (6) для четырехтактных ДВС современных конструкций:

- увеличение продолжительности процесса сгорания:

$$\varphi_{z,x} = 42 + 1,33 \cdot \Delta P_T, \text{ } ^\circ \text{ПКВ}, \quad (3)$$

- изменение максимального давления цикла:

$$P_z = 220 - 4,8 \cdot \Delta P_T, \text{ бар}, \quad (4)$$

- изменение температуры отработавших газов:

$$t_{в.г.х} = 420 + 3,33 \Delta P_T, \text{ } ^\circ \text{C}, \quad (5)$$

- изменение удельного расхода топлива:

$$b_e = 179 + 1,03 \Delta P_T, \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}. \quad (6)$$

В уравнениях  $\Delta P_T$  – снижение давления топлива в результате утечек через неплотности прецизионных пар ТНВД, бар.

При износе направляющих поверхностей иглы и корпуса распылителя, а также торцевой уплотнительной поверхности (корпус форсунки – корпус распылителя) увеличиваются утечки через неплотности, а среднее давление топливоподачи уменьшается. Однако, утечки меньше, и, следовательно, снижение давления ниже, чем при износе прецизионных поверхностей в ТНВД. В расчетах применяются формулы (3-6).

Износ уплотнительного конуса иглы и посадочного места в корпусе распылителя приводит к пропуску топлива в цилиндр дизеля в период процесса сжатия и, тем самым, снижается среднее давление топливоподачи, ухудшается качество распыливания топлива, увеличивается температура отработавших газов.

Загрязнение (закоксовывание) сопловых отверстий в распылителе происходит вследствие его перегрева (например, из-за ухудшения охлаждения или бункеровки топливом несоответствующего качества). Отклонение параметров рабочего процесса для четырехтактных ДВС современных конструкций можно оценить по приближенным зависимостям:

- изменение продолжительности процесса сгорания:

$$\varphi_{z,x} = 42 + 6,8 \cdot \Delta J_{CO}, \text{ } ^\circ \text{ПКВ}, \quad (7)$$

- изменение максимального давления цикла:

$$P_z = 220 - 6,3 \cdot \Delta J_{CO}, \text{ бар}, \quad (8)$$

- изменение температуры отработавших газов:

$$t_{в.г.х} = 420 + 33,1 \Delta J_{CO}, \text{ } ^\circ \text{C}, \quad (9)$$

- изменение удельного расхода топлива:

$$b_e = 179 + 8,3 \Delta J_{CO}, \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}. \quad (10)$$

В уравнениях  $\Delta J_{CO}$  – количество закоксовавшихся сопловых отверстий в распылителе.

Износ сопловых отверстий распылителя, в соответствии с действующими рекомендациями, не должен превышать 5% от диаметра соплового отверстия. Так как при износе ухудшается качество распыливания, а количество топлива, поступающего в цилиндр, увеличивается. Что приводит к повышению жесткости работы ДВС. Растут механические нагрузки и теплонапряженность деталей ЦПГ.

Рабочая характеристика турбонаддувочного агрегата определяется гидравлическими характеристиками ДВС, компрессора и турбины. Отложения в проточных частях системы газообмена дизеля и турбокомпрессора изменяют гидравлическую характеристику совместной работы в сторону увеличения давления для обеспечения одного и того же расхода рабочего тела.

Загрязнение проточной части компрессора (из-за отложений солей и продуктов неполного сгорания) увеличивает потери на трение, снижает адиабатный КПД компрессора, увеличивает мощность, необходимую для производства заданного расхода воздуха и его давления, то есть в эксплуатации происходит снижение давления и расхода воздуха.

Влияние приведенных выше параметров на характеристики работы ДВС вычисляется по приближенным зависимостям для четырехтактных ДВС современных конструкций:

- изменение продолжительности процесса:

$$\varphi_{z,x} = 42 + 44,9 \cdot \left(1 - \frac{\eta_{кх}}{0,8}\right), \text{ } ^\circ \text{ПКВ}, \quad (11)$$

- изменение максимального давления цикла:

$$P_z = 220 - 139,6 \cdot \left(1 - \frac{\eta_{кх}}{0,8}\right), \text{ бар}, \quad (12)$$

- изменение температуры отработавших газов:

$$t_{в.г.х} = 420 + 223,4 \cdot \left(1 - \frac{\eta_{кх}}{0,8}\right), \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (13)$$

- изменение удельного расхода топлива:

$$b_e = 179 + 41,9 \cdot \left(1 - \frac{\eta_{кх}}{0,8}\right), \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}. \quad (14)$$

В приведенных выше уравнениях  $\eta_{кх}$  - КПД компрессора при текущем техническом состоянии.

Влияние загрязнения проточной части турбины вычисляется по аналогичным формулам.

Загрязнение фильтра воздушного компрессора уменьшает проходное сечение, увеличивает перепад давлений (вход-выход) и скорость воздуха. В результате расход воздуха уменьшается, а давление - снижается.

Влияние загрязнения воздушного фильтра на показатели работы дизеля вычисляется по следующим приближенным зависимостям для четырехтактных ДВС современных конструкций:

- изменение продолжительности процесса сгорания:

$$\varphi_{z,x} = 42 + 44,9 \cdot \left(1 - \frac{P_{ох}}{P_{он}}\right), \text{ } ^\circ \text{ПКВ}, \quad (15)$$

- изменение максимального давления цикла:

$$P_z = 220 - 139,6 \cdot \left(1 - \frac{P_{ох}}{P_{он}}\right), \text{ бар}, \quad (16)$$

- изменение температуры отработавших газов:

$$t_{в.г.х} = 420 + 223,4 \cdot \left(1 - \frac{P_{ох}}{P_{он}}\right), \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (17)$$

- изменение удельного расхода топлива:

$$b_e = 179 + 41,9 \cdot \left(1 - \frac{P_{ох}}{P_{он}}\right), \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}. \quad (18)$$

где  $P_o$  - давление воздуха на входе в турбокомпрессор (после воздушного фильтра), соответственно, при паспортном (н) и текущем (х) значениях.

Загрязнение газораспределительного тракта дизеля вызывает увеличение сопротивления на выпуске из турбины и, следовательно, снижает степень расширения газов в турбине и располагаемый адиабатный перепад и мощность турбины. Влияние на параметры работы дизеля вычисляется по приближенным зависимостям для четырехтактных ДВС современных конструкций:

- изменение продолжительности процесса сгорания:

$$\varphi_{z,x} = 42 + 40,1 \cdot \left(1 - \frac{P_{тх}}{P_{тн}}\right), \text{ } ^\circ \text{ПКВ}, \quad (19)$$

- изменение максимального давления цикла:

$$P_z = 220 - 183,7 \cdot \left(1 - \frac{P_{тх}}{P_{тн}}\right), \text{ бар}, \quad (20)$$



- изменение температуры отработавших газов:

$$t_{в.г.х} = 420 + 215 \cdot \left(1 - \frac{P_{Tx}}{P_{TH}}\right), \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (21)$$

- изменение удельного расхода топлива:

$$b_e = 179 + 39 \cdot \left(1 - \frac{P_{Tx}}{P_{TH}}\right), \text{ } \text{г/кВт}\cdot\text{ч}. \quad (22)$$

где  $P_T$  - противодавление в выпускном коллекторе при паспортном (н) и текущем (х) технических состояниях.

При ухудшении технического состояния элементов ДВС повышается тепловая и механическая их напряженность, а на режимах близких к холостому ходу процесс сгорания удлиняется и сопровождается отложениями неполных продуктов сгорания в газовыпускном тракте ДВС. Поэтому величина эксплуатационной мощности должна назначаться с учетом технического состояния двигателя и условий окружающей среды [4]. Тогда величина механических и тепловых напряжений не выйдет за пределы допустимых значений.

Износы цилиндрических втулок и поршневых колец приводят к потере части заряда из цилиндра. В результате этого уменьшается количество воздуха, участвующего в процессе сгорания, а также уменьшается давление в цилиндре на линии расширения. Что приводит к увеличению тепловых напряжений.

Применительно к двигателям типа ЧН 32/48, широко применявшихся на судах флота рыбной промышленности и установленных на УПС «КРУЗЕНШТЕРН» методом математического моделирования получены следующие зависимости для удельного расхода топлива, максимального давления сгорания, максимальной температуры рабочего тела в цилиндре дизеля, продолжительности сгорания, выбросов оксидов азота.

Ниже приведены следующие зависимости для оценки влияния эксплуатационных факторов на показатели работы ДВС:

- удельный расход топлива

$$b_e = 0,216 + 0,4(125 - P_{ax}) + 1,73(50 - P_{Tx}) + 30(5 - J_{conx}) + 2(8 - f_{ingx}) - 0,13(330 - T_{kx}), \text{ } \text{г/кВт}\cdot\text{ч}; \quad (23)$$

- максимальное давление сгорания вычисляется по

$$P_{max} = 6,43 - 0,05(125 - P_{ax}) - 0,08(50 - P_{Tx}) - 0,65(5 - J_{conx}) - 0,17(8 - f_{ingx}) - 0,007(330 - T_{kx}); \quad (24)$$

- максимальная температура рабочего тела вычисляется по

$$T_{max} = 1709 + 13,3(125 - P_{ax}) - 13,3(50 - P_{Tx}) - 186,7(5 - J_{conx}) - 6,7(8 - f_{ingx}) - 3,3(330 - T_{kx}); \quad (25)$$

- продолжительности сгорания вычисляется по

$$\phi_{сг} = 64 + 0,13(125 - P_{ax}) + 1,6(50 - P_{Tx}) + 27(5 - J_{conx}) + 0,7(8 - f_{ingx}) - 15(330 - T_{kx}); \quad (26)$$

- выбросы оксидов азота вычисляется по

$$e_{Nox} = 1 + 0,011(125 - P_{ax}) + 0,008(50 - P_{Tx}) + 0,16(5 - J_{conx}) + 0,013(8 - f_{ingx}) - 0,005(330 - T_{kx}); \quad (27)$$

В практике эксплуатации судовых ДВС установлено, что на ходовых режимах основными категориями опасности являются: перегрузка главного дизеля, срабатывание аварийно-предупредительной сигнализации и защиты, пожары в машинно-котельном отделении, загрязнение атмосферы. На режимах маневрирования - отказы выполнения маневра, взрывы и пожары в машинно-котельном отделении, загрязнение атмосферы.

Для исключения пожаров в машинно-котельном отделении (МКО) необходимо снизить продолжительность работы ДВС на малых нагрузках, так как при длительной работе выпускной тракт (включая утилизационные котлы) загрязняется неполными продуктами сгорания. Загрязняется также продувочный коллектор. Если невозможно сократить работу на малых нагрузках, то Правила технической эксплуатации дизелей рекомендуют периодически увеличивать нагрузку для выжигания отложений. Кроме того необходимо поддерживать в хорошем техническом состоянии топливную аппаратуру и систему газотурбинного наддува. Для исключений отказов по срабатыванию аварийно-предупредительных сигнализаций и защиты необходимо своевременно проводить техническое обслуживание системы.

Для проведения технического диагностирования предварительно:

1. Устанавливаются зависимости изменения мощностных и экономических показателей работы двигателя от частоты вращения коленчатого вала по результатам буксировочных испытаний при различных сопротивлениях движению судна.

2. По одному из действующих методов, например [3], проводится расчет процесса топливоподачи при различных сопротивлениях движению судна и частотах вращения коленчатого вала. При этом применяется метод планирования эксперимента. Вычисляются параметры процесса топливоподачи: максимальное и среднее давления топливоподачи, продолжительность процесса топливоподачи, скорости нарастания давления в ТНВД и форсунке.

3. По методу [3] вычисляются основные контролируемые параметры работы двигателя: давление в конце процесса сжатия, максимальное давление сгорания, среднее индикаторное давление, температура отработавших газов, удельный расход топлива в зависимости от изменения давления воздуха в начале процесса сжатия, количества действующих сопловых отверстий, среднего давления топливоподачи. Применяется метод планирования эксперимента.

4. Методом планирования эксперимента вычисляются: давление в конце процесса сжатия, максимальное давление сгорания, среднее индикаторное давление, температура отработавших газов, удельный расход топлива в функции от угла начала воспламенения топлива и температуры воздуха в продувочном коллекторе.

Оценка технического состояния проводится в следующем порядке:

1. Измеряется и сравнивается с паспортным значением величина среднего индикаторного давления по всем цилиндрам при текущей частоте вращения коленчатого вала. Разброс величин должен находиться в пределах требований «Правил технической эксплуатации судовых дизелей». Превышение среднего индикаторного давления свидетельствует об увеличении сопротивления движению судна.

2. Измеряется расход топлива и сравнивается с паспортным значением для данной нагрузки ( $P_i, n$ ). Превышение свидетельствует о возможном влиянии параметров воздухообеспечения и (или) ухудшения технического состояния топливной аппаратуры.

3. Оценивается влияние параметров воздухообеспечения на показатели работы двигателя. При этом применяются полученные вышеприведенные зависимости влияния параметров воздухообеспечения на показатели работы двигателя.

4. Если отклонение параметров работы двигателя соответствует влиянию параметров воздухообеспечения, то двигатель находится в удовлетворительном техническом состоянии. В противном случае проверяется техническое состояние топливной аппаратуры по полученным выше уравнениям.

### **Заключение**

1. Разработан порядок (алгоритм) диагностирования технического состояния судовых ДВС, учитывающий влияние ряда эксплуатационных факторов: изменения сопротивления движения судна и параметров воздуха, поступающего в цилиндр дизеля. Это позволяет выделить результаты воздействия технического состояния основных элементов двигателя.

2. Алгоритм диагностирования основывается на результатах буксировочных испытаний судна и моделирования на ЭВМ влияния атмосферных условий, параметров работы систем топливоподачи и воздухообеспечения, физико-химических характеристик топлива.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Возницкий, И.В. Судовые двигатели внутреннего сгорания / И.В. Возницкий, А.С. Пунда // М.: МОРКНИГА, 2010. –Том II. – 302 с.

2. Кабыш, С.А. Влияние параметров окружающей среды на температуру точки росы / С.А. Кабыш, В.Б. Одинцов, М.В. Усатов // тезисы докладов. IX Международная конференция: Калининград: Изд-во БГАРФ, 2011. –С. 68-71.

3. Одинцов, В.И. Рабочий процесс судовых ДВС: моногр. / В.И. Одинцов. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2010.– 141 с.

4. Одинцов, В.И. Обеспечение безопасной эксплуатации дизелей флота рыбной промышленности путем сокращения расходов топлив в эксплуатации /В.И. Одинцов, Ю.Н. Мясников, В.Т. Томилко //тезисы докладов. V Международный Балтийский морской форум (21-27 мая): Калининград, БГАРФ, 2017. – С. 152-155.

### **ALGORITHM OF DIAGNOSTICS OF THE TECHNICAL CONDITION OF MOTORS OF SHIPS OF THE FISHERY FLEET WHEN USING A MEASURING DIAGNOSTIC COMPLEX**

Odintsov Victor Ivanovich, Dr. habil., Professor

Baltic fishing fleet state academy FSBEI HE "KSTU", Kaliningrad, Russia,  
e-mail: seu@bga.gazinter.net; bgarf1988@inbox.ru

*Diagnosis of the technical condition of the ship ICE is to compare the current performance with the reference. Usually, the results of bench tests of the engine at the manufacturer or during the commissioning tests are used as reference values which does not take into account the influence of operating factors. This makes the diagnosis process more difficult. The article suggests an algorithm that eliminates the above-mentioned shortcomings.*

## К РАСЧЕТУ КАПЕЛЬНОГО УНОСА В СУДОВЫХ ДИСТИЛЛЯЦИОННЫХ ОПРЕСНИТЕЛЯХ

<sup>1</sup> Резник Владимир Михайлович, канд. техн. наук, доцент,

<sup>2</sup> Ключ Олег Валентинович, д-р техн. наук, профессор,

<sup>3</sup> Филонов Александр Георгиевич, канд. техн. наук, доцент

<sup>1,3</sup> ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,  
Калининград, Россия, e-mail: sudfac@yandex.ru

<sup>2</sup> Морская Академия в Щецине, г. Щецин, Польша, e-mail: olegklus@o2.pl

*Представлен анализ зависимостей для расчета капельного уноса в камерах испарения судовых дистилляционных опреснителей, полученных экспериментальным путём для барботажного и безбарботажного режимов кипения морской воды. Показано влияние режимных параметров на влажность вторичного пара. Полученные зависимости могут применяться при проектировании камер испарения судовых опреснителей*

Не смотря на быстрый прогресс обратного осмоса, дистилляция по-прежнему остаётся одним основным методом опреснения морской воды на судах. Необходимость обеспечения максимальной грузоподъемности судна накладывает жесткие ограничения на габариты опреснителей, к которым с другой стороны предъявляются требования высокой надёжности, экономичности и возможно большей производительности [1-4].

Основное влияние на габариты дистилляционного опреснителя оказывает камера испарения, размеры которой занимают (40-60) % общего объёма. Они зависят от типа опреснителя, его режимных параметров, влияют на влажность вторичного пара и в конечном счете на качество дистиллята и возможность размещения опреснителя в машинно-котельном отделении.

Возможность получения на судне высококачественного дистиллята определяется организацией режима испарения морской воды, обеспечивающего низкую влажность вторичного пара и безнакипную работу опреснителя, а также эффективностью работы паросепарационных устройств судовых опреснителей, в которых происходит окончательная, тонкая очистка вторичного пара от капельного уноса.

Однако, если при избыточных давлениях на пресной воде капельный унос изучен всесторонне, то при вакууме таких исследований мало, и проводились они, главным образом, для крупных испарителей производительностью сотни тонн дистиллята в сутки и малоприспособны для проектирования судовых опреснителей [5, 6].

Поэтому важнейшими научными задачам при разработке судовых дистилляционных опреснителей нового типа являются:

1. Установление количественных зависимостей влажности вторичного пара в камерах испарения кипящих и адиабатных вакуумных опреснителей.
2. Исследование эффективности паросепарационных устройств при различных режимах работы опреснителей.
3. Разработка рекомендаций по проектированию камер испарения минимальных габаритов.

Недостаточность парка отечественных опреснителей отразилась на нашем промышленном флоте ещё в 70-е годы, поэтому разработке новых типов высокоэкономичных и малогабаритных аппаратов посвящено одно из основных научных направлений кафед-

ры судовых энергетических установок и теплоэнергетики Калининградского государственного технического университета [1-4]. На рисунке 1 приведены водопереточные устройства: с подводом пара, или перегретой воды под погружённый парораспределительный дырчатый щит (ПДЩ) и в виде вертикального канала с направляющим поворотным козырьком, которые исследовались в работах [1-3].

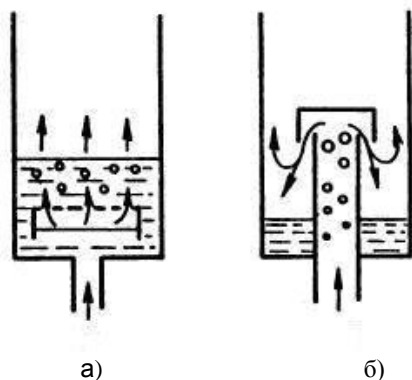


Рис. 1 Водопереточные устройства судовых опреснителей  
а) - барботажного типа, б) - вертикальный канал с поворотным козырьком

Исследования капельного уноса в барботажном и безбарботажном режимах на экспериментальных стендах кипящего и адиабатного опреснителей были проведены в В.М. Тихоновым [1]. Экспериментальная установка представляла собой барботажную колонку диаметром 230 мм, с переменной высотой – от 400 до 1500 мм. Капельный унос определялся по количеству влаги отводимой из кольцевых ловушек в центре и на стенках колонки. Уровень барботажного слоя над ПДЩ измерялся по иллюминатору и водоуказательному стеклу.

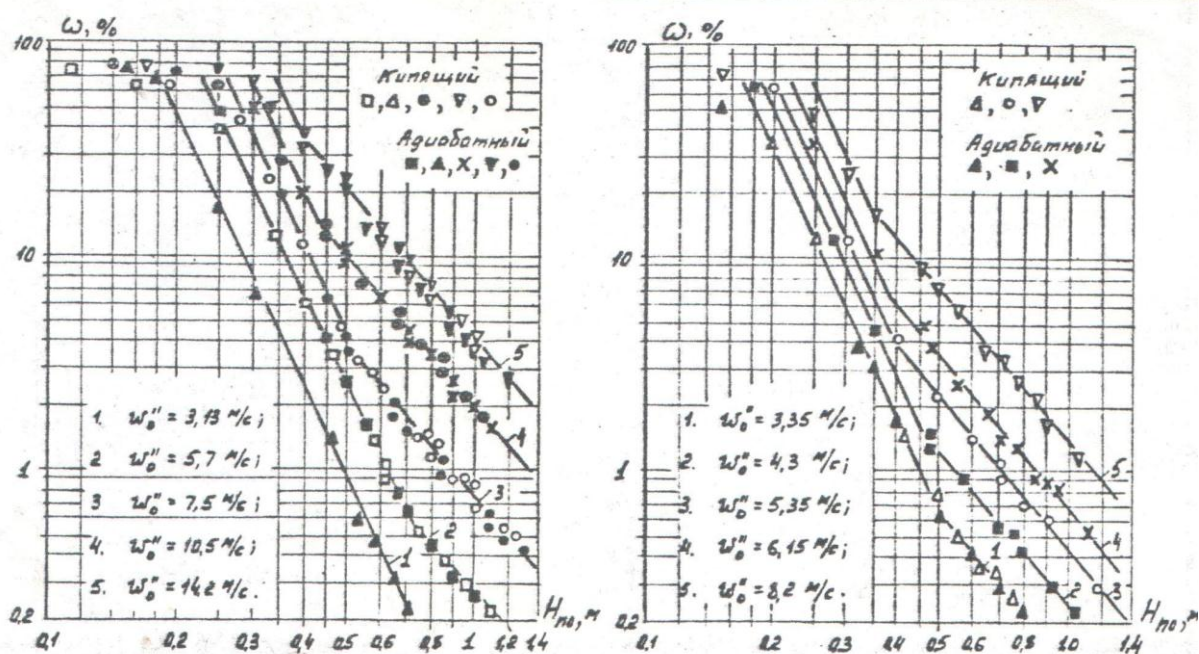


Рис. 2 Зависимости уноса при в кипящем и адиабатном опреснителях при барботаже пара на пресной воде в зависимости от  $W_0''$  и  $H_{no}$  при  $P = 0,0075 \text{ МПа}$  и  $0,02 \text{ МПа}$

На рисунках 1, 2 представлены некоторые результаты данных экспериментальных исследований капельного уноса на разной высоте от зеркала испарения в диапазоне приведенной скорости пара  $W_0'' = (3-14)$  м/с для первого водопереточного устройства на пресной и солёной воде при температуре испарения 40 и 80 °С.

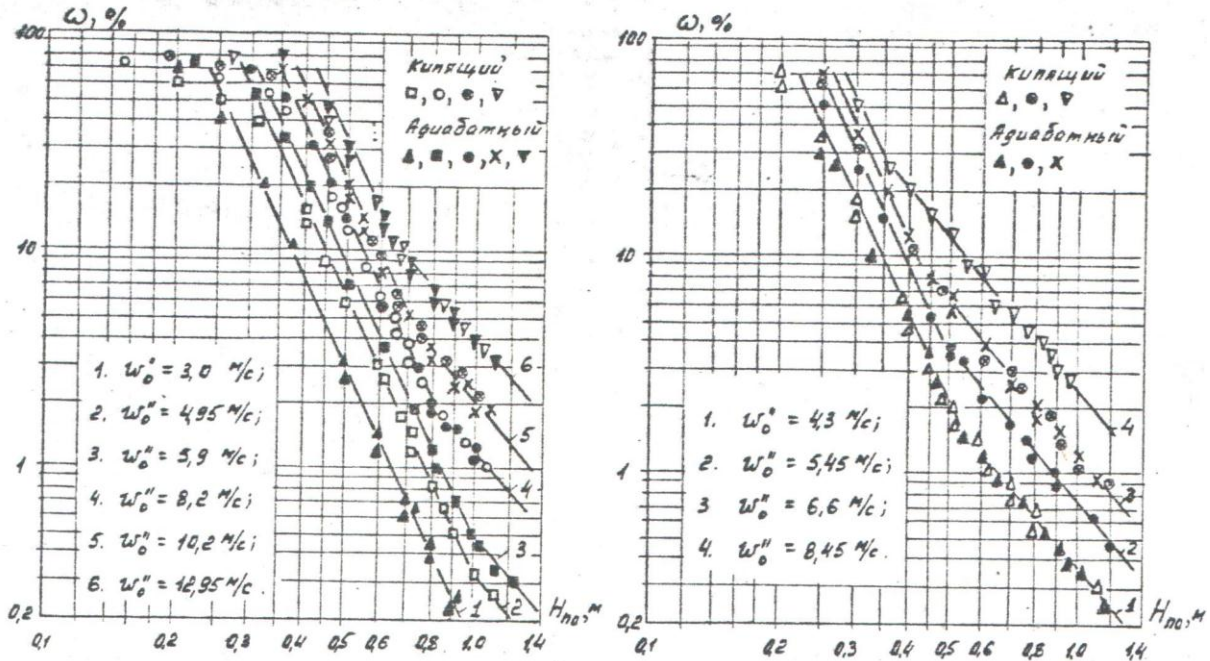


Рис. 3 Зависимости уноса при в кипящем и адиабатном опреснителях при барботаже пара на солёной воде в зависимости от  $W_0''$  и  $H_{no}$  при  $P = 0,0075$  МПа и  $0,02$  МПа

Обработка полученных экспериментальных данных по уносу влаги при барботажном и безбарботажном кипении позволила установить зависимости для определения влажности пара. При отсутствии в камере испарения опреснителя сепараторов для расчета влажности пара в зонах подброса и транспортируемого уноса капель испаряемого рассола используются зависимости

$$\omega_n = M_n \cdot (W_0'')^{1.68} \cdot H_{no}^{-4.2}, \% \quad (1)$$

$$\omega_{nm} = M_{nm} \cdot (W_0'')^{2.76} \cdot H_{no}^{-2.3}, \% \quad (2)$$

Выбор формул (1-2) для расчета влажности пара на входе в конденсатор опреснителя  $\omega_k$  зависит от соотношения высоты парового объёма  $H_{no}$  и границы зоны подброса капель воды

$$H_n = (W_0'')^{-0.568} \cdot \left( \frac{M_n}{M_{nm}} \right)^{0.526}, \text{ м} \quad (3)$$

Если  $H_{no} \leq H_n$ , то  $\omega_k = \omega_n$  (формула 1); при  $H_{no} > H_n$  будем иметь  $\omega_k = \omega_{nm}$  (формула 2). Константы  $M_n$  и  $M_{nm}$  зависят только от физических свойств воды и пара:

-для пресной воды:

$$M_n = 4,2 \cdot 10^{-5} \cdot \left[ \frac{\sigma}{g \cdot (\rho' - \rho'')} \right]^{1,68} \cdot Ar^{1,1}, \quad (4)$$

$$M_{nm} = 5,73 \cdot 10^{10} \cdot \left[ \frac{\sigma}{g \cdot (\rho' - \rho'')} \right]^{0,46} \cdot Ar^{-1,1}, \quad (5)$$

-для солёной воды:

$$M_n = 3,32 \cdot 10^{-12} \cdot \left[ \frac{\sigma}{g \cdot (\rho' - \rho'')} \right]^{1,68} \cdot Ar^{1,86} \quad (6)$$

$$M_{nm} = 2,38 \cdot 10^{18} \cdot \left[ \frac{\sigma}{g \cdot (\rho' - \rho'')} \right]^{0,46} \cdot Ar^{-1,86}, \quad (7)$$

где:  $Ar = g \cdot \left[ \frac{\sigma}{g \cdot (\rho' - \rho'')} \right]^{1,5} \cdot (\nu')^{-2} \cdot \frac{(\rho' - \rho'')}{\rho''}$  - число Архимеда,  $Fr = \frac{(W_0'')^2}{g \cdot H_{no}}$  - число

Фруда,  $We = \frac{\sigma}{g \cdot (\rho' - \rho'') \cdot H_{no}^2}$  - число Вебера,  $W_0''$  - скорость вторичного пара, приведенная к «зеркалу испарения», м/с, а  $H_{no}$  - высота парового объема, отсчитываемая от действительного уровня рассола в опреснителе, м.

Выбор формул (1-2) для расчета влажности пара на входе в конденсатор опреснителя  $\omega_k$  зависит от соотношения  $H_{no}$  и границы зоны подброса капель рассола

$$H_n = (W_0'')^{-0,568} \cdot \left( \frac{M_n}{M_{nm}} \right)^{0,526}, \text{ м.} \quad (5)$$

При  $H_{no} = H_n$ , влажность пара на границе зоны подброса рассчитывается по формуле (6)

$$\omega_n = M_{nm}^{2,21} \cdot M_n^{-1,21} \cdot (W_0'')^{4,068}, \text{ \%}. \quad (6)$$

Было установлено, что при барботажном кипении влажность пара не зависит от типа опреснителя, если снятие перегрева заканчивается до выхода пара из отверстий ПДЦ. Для расчета влажности пара в камере испарения адиабатного опреснителя при безбарботажном режиме с переточным устройством в виде вертикального канала с поворотным козырьком предложена зависимость (7)

$$\omega = 1,45 \cdot 10^{-3} \cdot (W_0'')^{4,05} H_{от}^{-0,92} \cdot \left[ \frac{\rho''}{\rho' - \rho''} \right]^{0,74}, \text{ \%} \quad (7)$$

Более подробные экспериментальные исследования капельного уноса при адиабатном испарении воды внутри вертикального канала с поворотным отражательным козырьком (см. рис. 4) были проведены В.М. Резником [2].

Эксперименты проводились на при температурах (40-45) °С на опытном пароводяном стенде, который имел сечение камеры испарения, соответствующее натурному опреснителю 6А-25. Были определены зоны формирования и сепарации капель при адиабатном испарении солёной воды и установлены две области зависимости капельного уноса от скорости выхода пара из - под отражательного козырька (см. рис. 5).

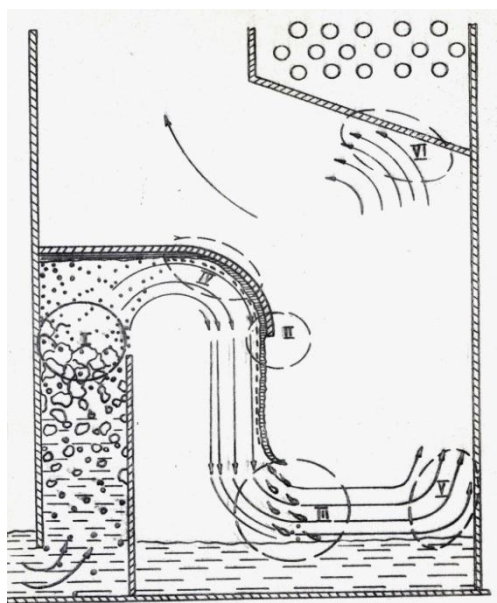


Рис. 4. Схема формирования капельного уноса в камере адиабатного испарения

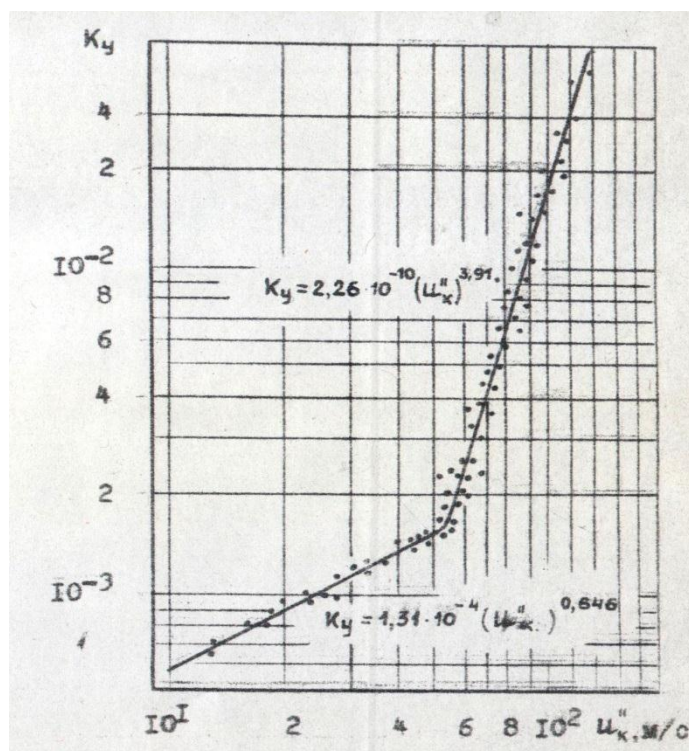


Рис. 5. Унос влаги в зависимости от приведенной скорости выхода пара из-под отражательного козырька



В первой области, где происходит полное снятие перегрева воды внутри перепускного устройства, вода стекает из-под козырька в виде спокойной плёнки. Унос здесь меньше, определяется неотсепарированными под козырьком каплями и вторичным дроблением при пересечении стекающей плёнки потоком пара и описывается зависимостью

$$\omega = 1,31 \cdot 10^{-4} \cdot (U_K'')^{0,646} \%, \quad (8)$$

где  $U_K''$  - приведенная скорость истечения вторичного пара выходящего из-под козырька. Во второй области, где происходит частичное снятие перегрева с поверхности струи воды за пределами козырька и имеет место интенсивное дробление паром жидкости вытекающей из-под козырька в результате испарения, зависимость имеет более крутой вид

$$\omega = 2,26 \cdot 10^{-10} \cdot (U_K'')^{3,91} \%. \quad (9)$$

На рисунке 6 представлено влияние следующих режимных и геометрических факторов вертикального канала с поворотным отражательным козырьком на величину капельного уноса:

- слабая зависимость от высоты камеры испарения  $H_K$  и перепада температуры жидкости в подводящем канале  $\Delta t$ ,
- влияние высоты падающей струи  $H_{СТ}$  и отношения площади поперечного сечения камеры испарения к площади выходного поперечного сечения козырька  $F_K/f_{отр}$

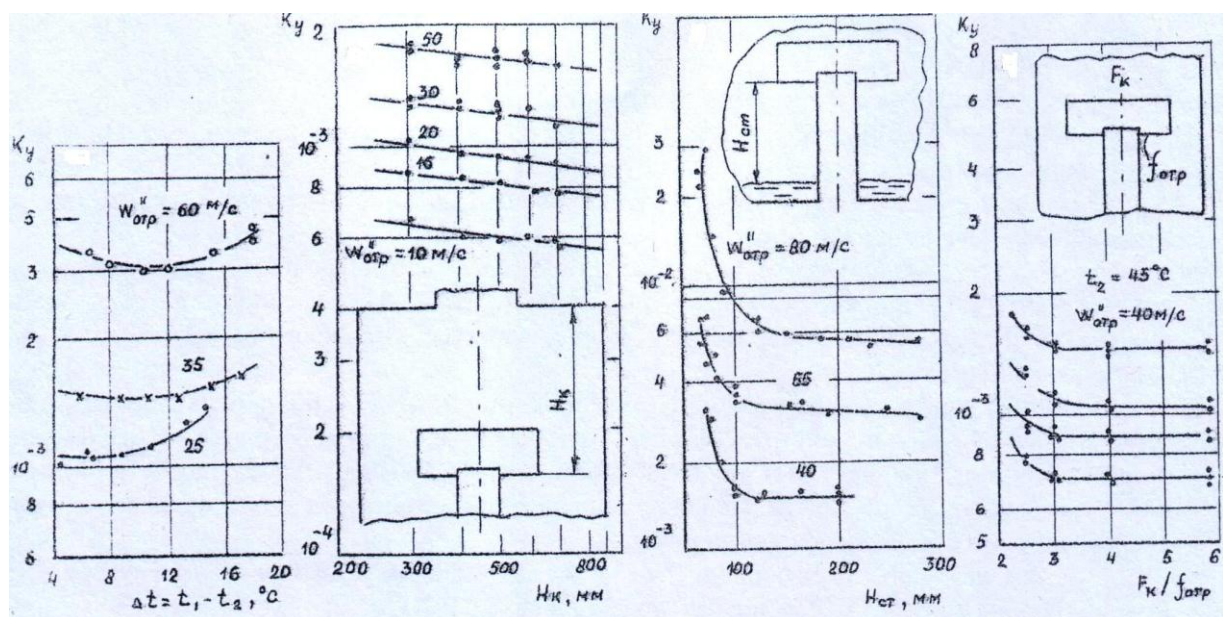


Рис. 6. Зависимость уноса влаги в камере испарения от общего перегрева, высоты камеры, высоты струи и отношения площадей  $F/f_{отр}$

Обработка данных по уносу в камере испарения даёт эмпирические зависимости:

- при  $U_K'' \leq 55$  м/с

$$\omega = 1,23 \cdot 10^{-2} \cdot (U_K'')^{0,646} \cdot (H_K)^{-0,144} \% \quad (10)$$

- при  $U_K'' > 55$  м/с

$$\omega = 2,08 \cdot 10^{-2} \cdot (U_K'')^{3,91} \cdot (H_K)^{-0,144} \% \quad (11)$$

Сопоставление зависимостей (1, 2, 7, 10, 11) показывает что унос капель при барботажном режиме значительно выше, чем при безбарботажном, так как в последнем происходит сепарация крупных капель при вводе пароводяной смеси в паровую камеру. Достоинством безбарботажного кипения является слабая зависимость от высоты камеры испарения, что позволяет проектировать для судов компактные адиабатные опреснители большой производительности.

Проведённые исследования позволили рекомендовать безбарботажный режим кипения для первых ступеней адиабатных опреснителей, а барботажный режим кипения в последних ступенях многоступенчатых адиабатных опреснителей, где малые перепады давлений приводят к неустойчивой работе камеры испарения что было подтверждено испытаниями опытного адиабатного опреснителя 4А-6,3.

Стендовые и промышленные испытания судовых опреснителей конструкции КГТУ 6А-25, 2Д2М показали, что зависимости (1, 2, 7, 10, 11) могут применяться при проектировании камер испарения судовых дистилляционных опреснителей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихонов В.М. Экспериментальное исследование уноса и сепарации капель в вакуумных опреснителях: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: 1978. 20 с.
2. Резник В.М. Исследование процесса адиабатного испарения морской воды в судовых опреснителях: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Ленинград, 1980. 24 с.
3. Лукин Г.Я. Исследование рабочих процессов в судовых опреснителях мгновенного вскипания и их разработка. автореф. дис. ... докт. техн. наук. Ленинград, 1981. 39 с.
4. Филонов А.Г. Влияние режимных и конструктивных параметров сепараторов судовых опреснителей на эффективность процессов тонкой очистки пара. автореф. дисс... канд. техн. наук. Калининград, 2000. 22 с.
5. Слесаренко В.Н. Опреснительные установки. Владивосток. 1999. 244 с.
6. Мошкарин А.В. Испарительные установки тепловых электростанций. М.: Энергоатомиздат, 1994. 272 с.

#### TO THE CALCULATION OF DROPLET ENTRAINMENT IN SHIP DISTILLATION DESALINATION PLANTS

<sup>1</sup>Reznik Vladimir Mikhailovich, PhD, associate professor,

<sup>2</sup>Klyus Oleg Valentinovich, doctor of technical sciences, professor,

<sup>3</sup>Filonov Alexandr Georgievich, PhD, associate professor

<sup>1,3</sup>Kalininsrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,  
e-mail: sudfac@yandex.ru

<sup>2</sup>Maritime Academy in Szczecin, Szczecin, Poland, e-mail: olegklus@o2.pl

*The analysis of dependencies for the calculation of droplet entrainment in the evaporation chambers of ship distillation desalination plants, obtained experimentally for flash and barbotage boiling regimes of sea water is presented. Shows the effect of regime parameters on the steam humidity. The formulas can be used in the design of evaporation chambers of ship desalination plants.*

УДК 620.91/.98(470.26)

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ  
ЭНЕРГЕТИКИ КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ НА БАЗЕ МЕСТНЫХ  
И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ.  
ПРИМЕРЫ РАЗРАБОТКИ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ  
ТЕХНОЛОГИЙ И УСТАНОВОК**

Селин Виктор Васильевич, канд. техн. наук, профессор  
Юрков Сергей Валерьевич, доцент  
Беркова Елена Анатольевна, ст. преподаватель

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,  
Калининград, Россия,  
e-mail: viktor.selin@klgtu.ru; sergej.yurkov@klgtu.ru; elena.berkova@klgtu.ru

*Исследуются возможности и способы использования местных и возобновляемых топливно-энергетических ресурсов в областной энергетике. Предложены варианты энергетического использования биомассы сельского и городского происхождения. Приведены примеры инновационных теплоэнергетических технологий на местном биотопливе и торфе*

Одной из важнейших, но до сих пор нерешенных коммунальных и экологических проблем городов и даже малых населённых пунктов Калининградской области, является проблема избавления от бытовых и промышленных отходов, в том числе от биогенных отходов сельскохозяйственного производства. Экономическая и политическая проблема уничтожения отходов и ликвидации свалок перерастает в проблему санитарно-экологической безопасности населения не только Калининградской области, но и населения приграничных территорий сопредельных государств.

Другой ключевой проблемой является проблема энергетической безопасности, под которой понимается гарантированное получение энергии в том количестве и того качества, которые требуются обществу в данных экономических условиях.

Для Калининградской области эта проблема приобрела особую актуальность два с половиной десятилетия назад, когда после распада СССР область оказалась в особых экономических и геополитических условиях. Появилась необходимость в формировании своей региональной энергетической стратегии, в которой ранее не было особой нужды, когда наша область на 92 % обеспечивалась электроэнергией поставками из единой энергосистемы России через Литовскую Республику [1,2,3].

Несмотря на ввод в 2005 году первого энергоблока Калининградской ТЭЦ-2 и реализованное в 2010 году удвоение электрической мощности станции, проблему обеспечения энергетической безопасности региона в перспективе не решить без ввода дополнительных генерирующих мощностей. пиковых ТЭС, Маяковской и Талаховской, а

также, планируемых к вводу в ближайшие годы, Прегольской и резервной Приморской ТЭС. При этом необходимо выполнить целый ряд требований, основными из которых являются разнообразие источников получения энергии, гарантированное обеспечение энергоресурсами; отсутствие внешних препятствий для получения энергии, исключение чрезмерного роста стоимости энергии; оптимизация структуры топливно-энергетического комплекса, приемлемый уровень экологического воздействия энергокомплексов на человека и окружающую среду.

Если обратиться к структуре топливного баланса Калининградской области, то основным видом топлива является природный газ (примерно 2 млрд. м<sup>3</sup> в год), при этом почти 1.4 млрд. м<sup>3</sup> потребляет Калининградская ТЭЦ-2. Поставки угля и мазута, которые используются в основном на муниципальных и ведомственных котельных, составляют примерно по 300 тыс. тонн в год. Для региона особенно важно соблюдение принципа диверсификации видов топлива и энергии. Моноструктура топливно-энергетического баланса не допустима – экономика не должна чрезмерно зависеть от какого-либо одного энергоносителя. Однако в области по-прежнему основной упор делается на использование природного газа, который уже сейчас составляет в топливном балансе более 70%, что недопустимо и с точки зрения энергетической безопасности.

Согласно разработанной энергетической стратегии Калининградской области до 2031 г. доля местных энергоресурсов в балансе первичной энергии к 2020 г. должен был составлять не менее 20%. Основным видом местного топлива является торф, промышленные запасы которого составляют 2.5 млрд. м<sup>3</sup>, а используется только около 50 тыс. м<sup>3</sup> в год. Правительство Калининградской области в своей стратегии планировало к 2016 году использовать его до 2 млн. тонн в год. Но на данный момент в этом направлении пока ничего не делается. В 2011-2013 г.г., в соответствии с Генеральной схемой развития энергосистемы области рассматривались предложения о строительстве в Калининградской области ряда ТЭЦ единичной мощностью 120-180 МВт, работающих на торфе и каменном угле, однако эти проекты так и не были реализованы.

Вместе с тем, по экспертным оценкам Калининградская область обладает высоким биоэнергетическим потенциалом и реальными возможностями его использования в качестве дополнительного ресурса топливно-энергетического комплекса. Основными видами биотоплива в регионе, кроме торфа, являются: ТБО, твердые осадки биологической очистки сточных вод, отходы животноводческих комплексов, сельскохозяйственной деятельности и древесные отходы, которые можно условно разделить на две группы: источники биомассы, имеющие сельское происхождение, и источники биомассы городского происхождения [4].

Ежегодное получение биотоплива по данным [7], из источников биомассы сельского происхождения, может составить порядка 44,9 тысяч тонн условного топлива, где на биогаз из отходов животноводства приходится 13,8 тыс. т у.т., на древесное топливо из лесосечных отходов – 31,1 тыс. т у.т.. Для источников биомассы городского происхождения рассчитанный в [7] энергетический потенциал составляет 63,9 тыс. т у.т./год, из которого на долю твердых бытовых отходов приходится 38,9 тыс. тонн у.т./год, на отходы деревообработки – 25 тыс. тонн у.т./год.

Что касается торфа, то это местное топливо может считаться возобновляемым только в объемах ежегодного прироста. Общие промышленные запасы торфа в Калининградской области по данным [5, 6] составляют 311 млн. тонн. Из них возможно использование в качестве топлива порядка 57,8 млн. тонн.

Экономическая целесообразность вовлечения нетрадиционных видов топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) в топливно-энергетический баланс региона определяется степенью совершенства и практической доступностью технологий производства, транспортировки, хранения и использования ТЭР. Именно наилучшие доступные, на

данный момент и в краткосрочной перспективе, технологии позволяют оценивать технически и экономически доступный потенциал того или иного вида ТЭР.

На рисунке 1 приведена обобщенная структурная схема доступных технологий для реализации концепции распределенной энергетики региона на базе местных и возобновляемых ТЭР.

*Доступные технологии преобразования энергии первичных энергетических ресурсов*

*Доступные первичные энергетические ресурсы*

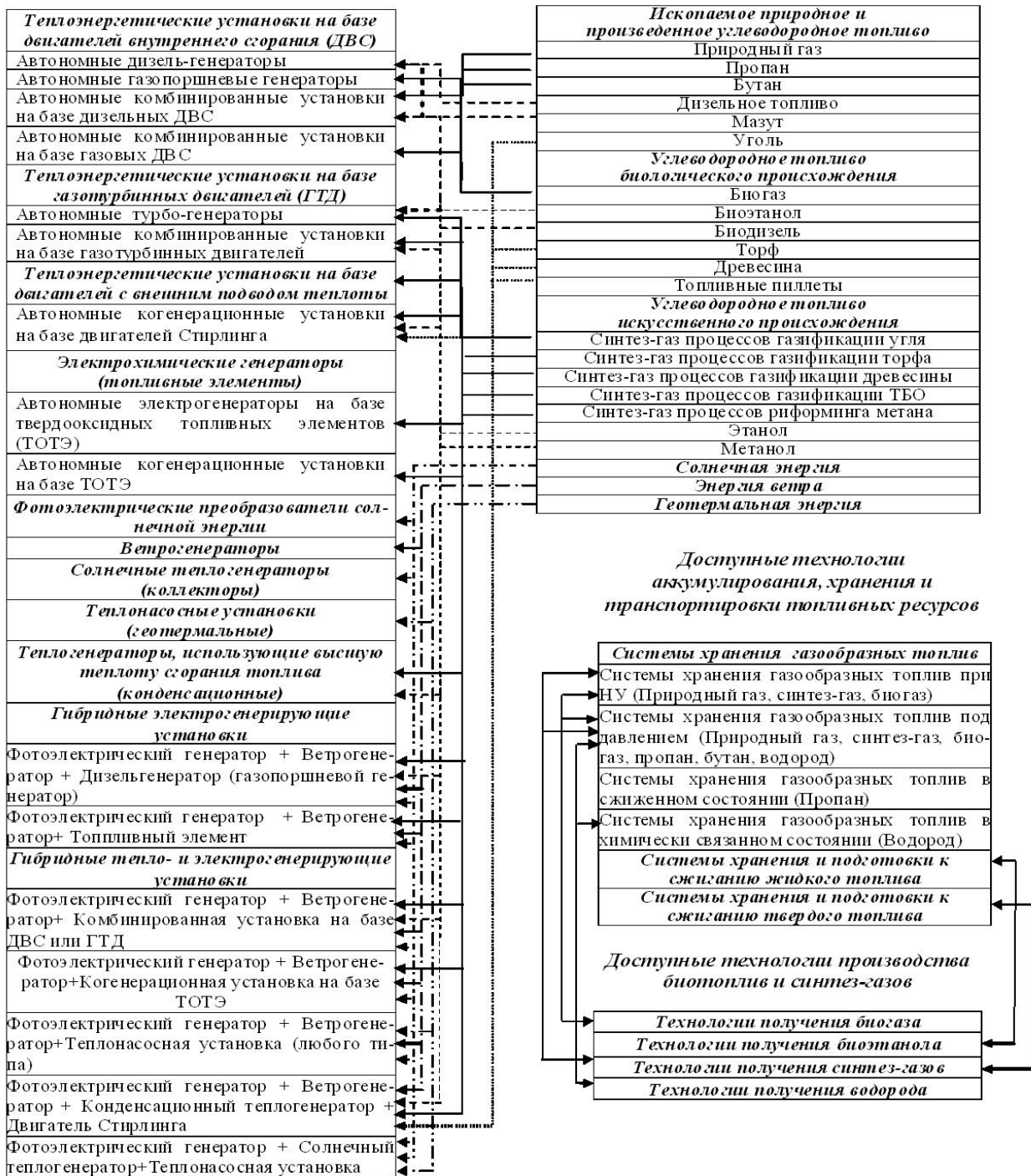


Рис. 1. Обобщенная структурная схема доступных энергетических ресурсов и технологий

подавляющее большинство энергетических установок (ЭУ) в структуре мощностей, генерирующих товарную тепловую и электрическую энергию, составляют ЭУ с топливопотребляющими тепловыми двигателями – ДВС или ГТД, использующими различные виды жидких и газообразных углеводородных топлив. Исключение составляют двигатели Стирлинга, способные работать и на твердых топливах, но в силу существенной ограниченности мощности ЭУ на их базе, в данной работе они не рассматриваются, как значимые для энергетики. Некоторые виды газообразного топлива используются в качестве первичного энергетического ресурса в ЭУ на базе электрохимических генераторов (топливных элементов). Твердое топливо энергетически эффективно может быть использовано в котельных установках при производстве тепловой энергии и паротурбинных теплоэнергетических установках (ТЭУ) твердотопливных ТЭС или ТЭЦ.

Применение торфа в качестве регионального энергетического топлива – вопрос технически осуществимый, но серьезно оспариваемый. Казалось бы, в Калининградской области есть все условия для того, чтобы развивать энергетику на торфе. Регион даже входит в список территорий, рекомендованных для реализации пилотных проектов в этой сфере. Залежи торфа сосредоточены в поверхностных слоях земли, его добыча ведётся открытым способом и не требует значительных затрат. В торфе практически отсутствует сера и он имеет низкую зольность.

Вместе с тем содержание влаги в торфе достигает 60-65% к рабочей массе. Чем выше этот показатель, тем меньше теплота сгорания топлива и его энергетическая эффективность и, как следствие, больший расход при сжигании. Если один кубометр каменного угля имеет массу, равную примерно 800 кг, то в одном кубометре торфа – в пять раз меньше. То есть для перевозки одной и той же массы (по сравнению с углём) требуется больше транспортных средств. Удалённость энергообъекта от месторождения более чем на 100 км делает проект убыточным. Торф перевозится саморазгружающимися полувагонами грузоподъёмностью 20 тонн. Если учесть, что расход топлива, например, на электростанции мощностью 160 МВт – от 30 до 50 кг/с, в зависимости от влажности торфа, то ежедневно та территорию ТЭС должны заходить от 130 до 216 таких вагонов. Трудно себе представить, как должен быть организован график движения по железной дороге, чтобы обеспечить доставку такого количества топлива.

В Калининградской области глубина торфяного слоя достигает 10 м, при этом площадь месторождений относительно невелика. Для того, чтобы обеспечить топливом электростанцию мощностью 160 МВт, ежегодно нужно извлекать до полурора миллиона тонн торфа, что повлечёт за собой образование огромных котлованов, которые со временем будут увеличиваться в связи с интенсивной эрозией.

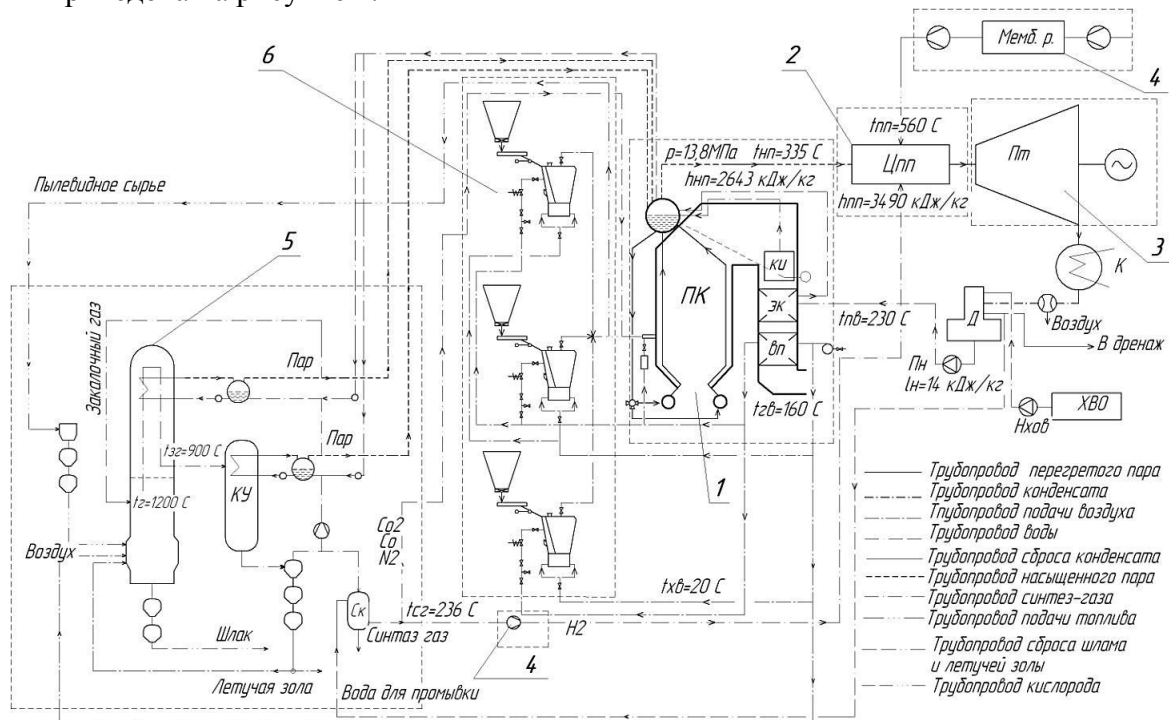
Торф – чрезвычайно активная биомасса, наполовину состоящая из углерода, который окисляется в результате контакта с влагой после того, как месторождение вскрыто. С большой поверхности в атмосферу может выделяться огромное количество углекислого газа. Это негативный вклад в тот самый парниковый эффект, с которым сейчас борются все развитые страны.

Совокупность этих минусов не позволяет воспринимать всерьёз идею строительства в Калининградской области электростанции подобной мощности на торфе. Её появление означало бы нарушение экосистемы, а сам проект из-за инфраструктурных проблем транспортировки топлива был бы очень дорогим.

Торф можно использовать в энергетике области только для нужд маломощных котельных на торфяных брикетах, которые бы отапливали отдалённые населённые пункты. Что же касается проекта торфяной электростанции, очевидно, что в Калининградской области его реализация целесообразна, с учетом принятия поправок в Феде-

ральный закон «Об энергетике», поддерживающих генерацию на торфе, при небольшой мощности энергоблока – до 25 МВт.

В качестве примера проектного решения паротурбинного энергоблока малой и средней мощности для твердотопливной ТЭС нами предложена паротурбинная ТЭУ с частичной внутрицикловой газификацией твердого топлива и генерацией водорода для целей внешнего перегрева пара в центральном водородно-кислородном пароперегревателе. Внешний перегрев пара позволяет использовать в составе ПТУ серийные котлы малой и средней производительности, генерирующие насыщенный или слабо перегретый водяной пар. Принципиальная тепловая схема ТЭУ энергоблока мощностью 25-65 МВт приведена на рисунке 2.

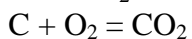
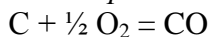


1- котел; 2- центральный водородный пароперегреватель; 3- турбина; 4- вспомогательное оборудование; 5- газификатор 6- система топливоподготовки

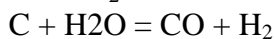
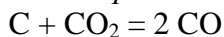
Рис.2. Принципиальная тепловая схема паротурбинная ТЭУ с частичной внутрицикловой газификацией твердого топлива и генерацией водорода

Внутрицикловая газификация осуществляется по методу Копперса-Тоттцека, исходным топливом в процессе газификации является фрезерный торф, используемый в качестве основного топлива. Торф поступает в газификатор, где образуется синтез-газ целевого состава. Целевыми компонентами в этой смеси являются CO, H<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub>. Основные химические реакции процесса следующие [8]:

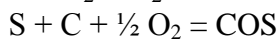
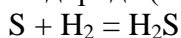
Экзотермические реакции:



Эндотермические реакции:



В ходе процесса газификации, сера, которая присутствует в топливе, реагирует до сероводорода (H<sub>2</sub>S) и серооксида углерода (COS) по реакциям:

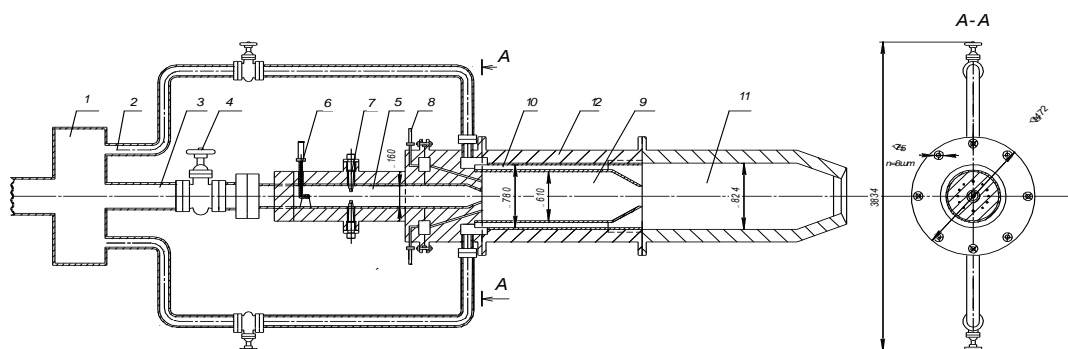


Образующийся сырой газ содержит в основном окись углерода и водород, который охлаждают в котле-утилизаторе при генерации технологического пара. Газ затем обеспыливают в керамическом фильтре и дальше очищают в скруббере.

Расчетный состав генераторного газа процесса парокислородной газификации торфа в процентном содержании компонентов смеси по объему следующий:  $\text{CO}_2$  -0,2%;  $\text{CO}$  -24,3%;  $\text{H}_2$  -53,48%;  $\text{CH}_4$  -13,8%;  $\text{C}_n\text{H}_m$  -0,7%;  $\text{N}_2$  -7,22%;  $\text{O}_2$  -0,3%.

Полученный водород направляется через газовый разделитель в центральный водородно-кислородный пароперегреватель. Оставшиеся компоненты синтез-газа направляются в топку котла на дожигание.

На рисунке 3 представлена конструкция центрального водородно-кислородного пароперегревателя, разработанного для ТЭУ с внутрицикловой газификацией твердого топлива.

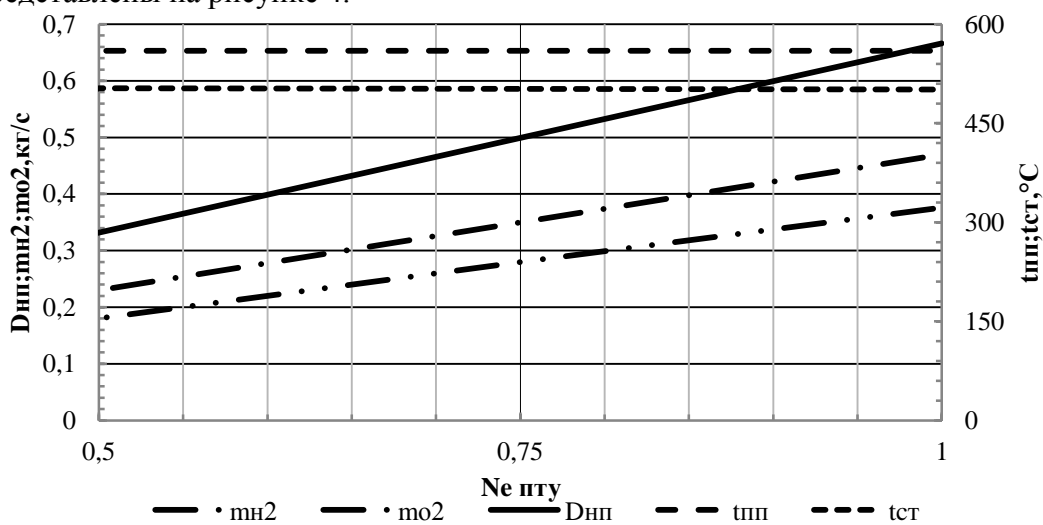


1-распределительный коллектор; 2-трубопровод кольцевого канала; 3-трубопровод основного потока пара; 4-клапан регулирования расхода пара; 5-камера смешения кислорода и насыщенного пара; 6-распылитель кислорода; 7-запальная свеча; 8-трубопровод подачи водорода; 9-камера сгорания; 10-кольцевой канал; 11-камера смешения; 12-корпус

Рис.3. Конструкция центрального водородно-кислородного пароперегревателя

Греющей средой пароперегревателя является продукты реакции окисления водорода кислородом – сверхперегретый водяной пар. В связи с чем и возникает необходимость внутрицикловой генерации водорода и кислорода в количестве, необходимом для обеспечения расчетной мощности пароперегревателя

Тепловой расчет пароперегревателя выполнен для трех эксплуатационных режимов нагрузки паротурбинной ТЭУ: 100%, 75% и 50% от номинального. Расчетные характеристики работы пароперегревателя на поминальном и долевых режимах работы представлены на рисунке 4.



$m\text{H}_2$ - массовый расход водорода;  $m\text{O}_2$ - массовый расход кислорода;

$D_{пп}$ -паропроизводительность котла;  $t_{пп}$ - температура перегретого пара;  $t_{ст}$ - температура стенки пароперегревателя;  $N_e$  пту- мощность паротурбинной установки

Рис. 4. Расчетные характеристики пароперегревателя на долевых режимах работы ТЭУ



Наиболее совершенные способы энергетической утилизации древесины и древесных отходов также базируются на технологиях предварительной газификации. Количество и состав газа зависит от температуры процесса, вида топлива и скорости нагрева его частиц. Так, например, при температуре 550 °С в состав летучих продуктов пиролиза твердых топлив входят пары воды, смол и кислот, а также неконденсирующиеся газы (CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>), а при температуре свыше 800 °С основными компонентами неконденсирующихся газов являются CO и H<sub>2</sub>.

Наиболее простым является воздушный метод газификации, при котором газификация древесины происходит только за счет кислорода воздуха. Продуктом газификации является воздушный генераторный газ с низкой теплотой сгорания, который состоит в основном из окиси углерода CO и водорода H<sub>2</sub>. Расчетный состав воздушного генераторного газа существенно отличается от состава продуктов газификации торфа: CO<sub>2</sub> -7,5%; CO -17,53%; H<sub>2</sub> -15,36%; CH<sub>4</sub> -1,5%; C<sub>n</sub>H<sub>m</sub> -0,1%; N<sub>2</sub> -42%.

При обратном процессе газификации в плотном слое воздушное дутьё организовано в средней части шахты газогенератора. В этой зоне образуется очаг горения, а генераторный газ отводится из нижней части шахты.

Главное преимущество газогенераторов обратного процесса – это низкое содержание смол в генераторном газе. Поэтому такой газ после обычной фильтрации и охлаждения может быть использован в двигателях внутреннего сгорания.

Графическое представление процессов протекающих в газогенераторе обратного типа приведено на рисунке 5.

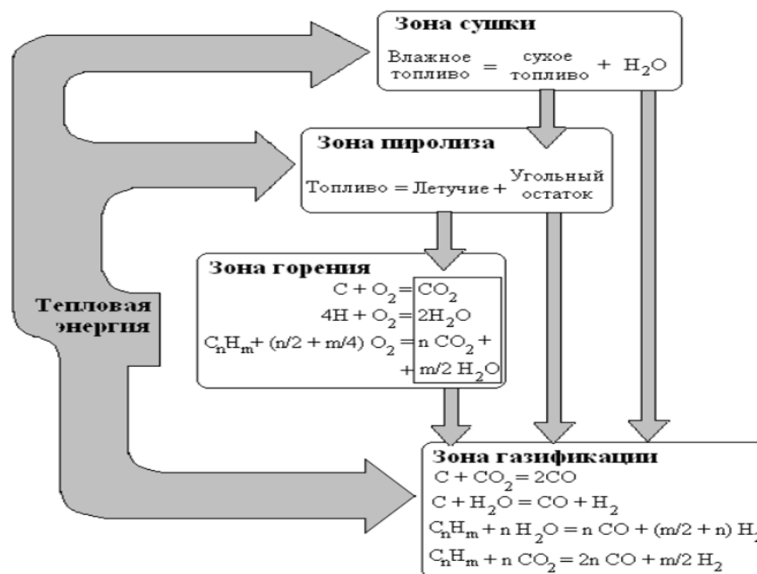
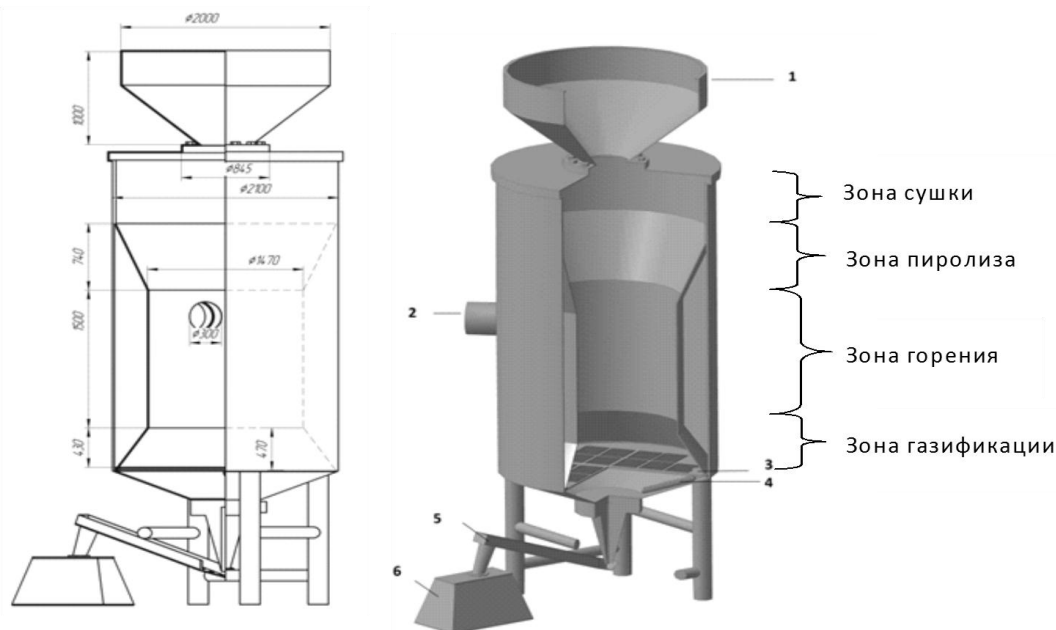


Рис. 5. Схема газогенераторных процессов

В рамках регионального проекта по утилизации старогодных железнодорожных шпал сотрудниками кафедры СЭУиТЭ КГТУ выполнено теоретическое обоснование технологии энергетической утилизации и разработана теплоэнергетическая установка на базе спроектированного газогенератора обратного типа для полигона производственной базы ПМС-93 на станции Луговое-Новое Калининградской железной дороги. Проект предлагает организацию утилизации отработанных железнодорожных шпал с применением технологии газификации и использованием полученного генераторного газа в качестве топлива для отопительных водогрейных котлов суммарной пиковой нагрузкой около 1 МВт. С этой целью выполнен тепловой, конструктивный расчеты и эскизное проектирование газогенератора тепловой мощностью 1,23 МВт (Рисунок 6.).



1 – бункер для щепы; 2 - подача воздуха в камеру газификации; 3 – колосниковая решетка; 4 – мешалка; 5 – шнековый транспортёр; 6 – зольник

*Рис.6. Общий вид газогенератора тепловой мощностью 1,23 МВт*

Использование биомассы сельского и городского происхождения предполагает создание автономных теплоэнергетических комплексов (АТК), рассредоточенных по территории региона, для получения биогаза, тепловой и электрической энергии, а также экологически чистых удобрений для сельского хозяйства. Создание АТК позволит решить не только проблему энергетической безопасности, но и ряд других проблем: экологическую, санитарную, социальную. По нашим оценкам использование местного топливного ресурса позволит сэкономить до 160 тыс. тонн условного топлива.

Крупные животноводческие комплексы, птицефабрики, звероводческие и растениеводческие хозяйства располагают значительными объёмами органических отходов животного и растительного происхождения. Эффективным способом энергетической утилизации биогенных отходов является их преобразование в биогаз и экологически чистые сельскохозяйственные удобрения в биогазовых установках путём анаэробного сбраживания с последующим использованием биогаза в качестве энергетического и моторного топлива в тепловых двигателях АТК.

Однако следует отметить, что биогаз содержит 60—70% метана ( $\text{CH}_4$ ), 30—35% углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ), 2—3% азота ( $\text{N}_2$ ), 1—2% водорода ( $\text{H}_2$ ) и до 1% кислорода ( $\text{O}_2$ ). Поэтому создание двигателей внутреннего сгорания, работающих на биогазе в его «первозданном виде», представляет трудности, связанные с необходимостью сохранения мощности и экономичности работы. Считается, что непосредственно биогаз может быть использован в качестве топлива преимущественно для систем теплоснабжения, а в качестве моторного топлива целесообразнее использовать не биогаз, а получаемый из него биометан. Для этого из биогаза удаляют  $\text{CO}_2$  и другие примеси, после чего получаемый газ имеет практически однородный состав, содержащий до 96—98%  $\text{CH}_4$ .

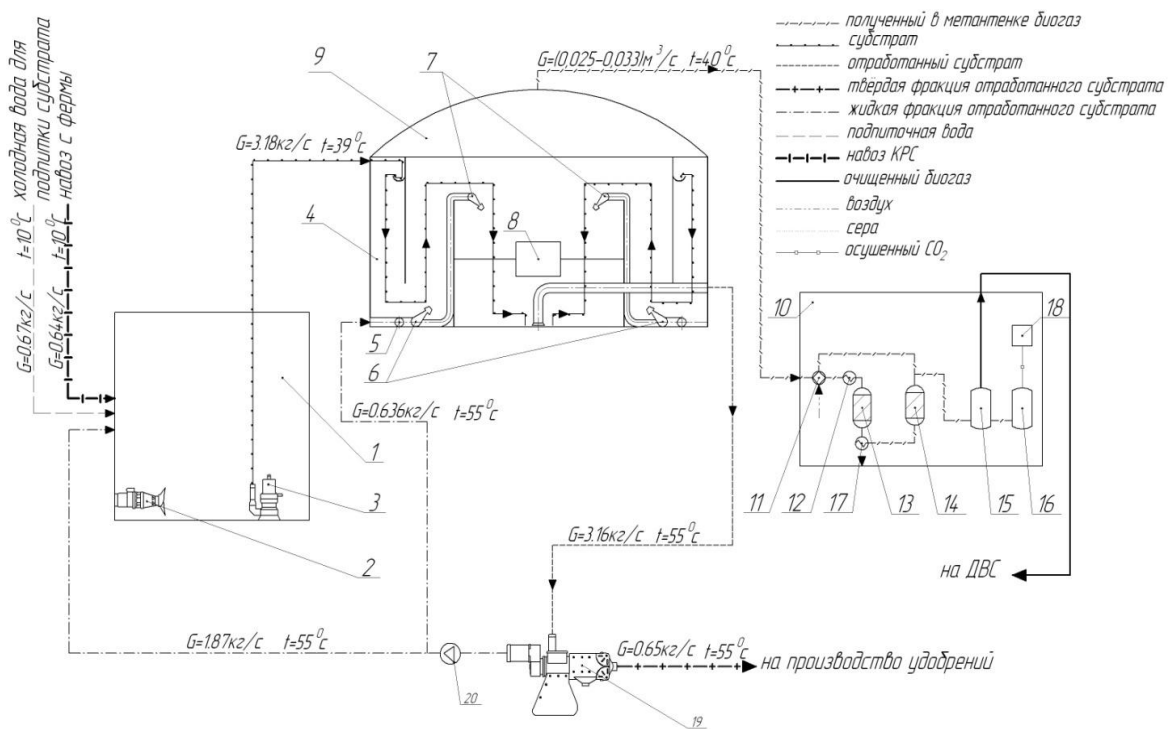
Биометан во многом соответствует природному газу — прежде всего, по процентному содержанию метана, количество которого в нем колеблется от 95 до 98% от общего объема. Биометан, как моторное топливо, имеет высокую теплоту сгорания - (50-55 МДж/кг) и октановое число - 110, что превышает аналогичные характеристики бензина, которые, соответственно, равны 44 МДж/кг и 72-85.

По сравнению с нефтяными моторными топливами биометан имеет более высокую детонационную стойкость, что позволяет в двигателях внутреннего сгорания снижать концентрацию вредных веществ в отработанных газах и уменьшать количество отложений в двигателе.

Получившие в последние годы широкое распространение в стационарной энергетике многотопливные газопоршневые и газотурбинные ТЭУ, позволяют рассматривать первичное биогазовое топливо в качестве серьезного источника основного или резервного энергетического топлива для генерирующих мощностей на базе подобных ТЭУ.

Комплексное обоснование возможности эффективного использования биогенных отходов сельскохозяйственного производства приграничных территорий Калининградской области, в качестве энергетического ресурса для АТК и разработка проектных решений по созданию биоэнергетических установок на базе серийных тепловых двигателей для АТК класса ТЭЦ специалистами кафедры СЭУ и ТЭ КГТУ выполнено на примере крупнейшего в регионе свиноводческого комплекса – ЗАО «Правдинское свинопроизводство» и современного хозяйства молочного животноводства – ООО «Залесье-Агро».

На рисунке 7 представлены технологическая схема биогазовой установки (БГУ) на базе трехстадийного метантенка, разработанного для ООО «Залесье-Агро».



1-приемный бак; 2-миксер; 3- насос подачи субстрата; 4- трехстадийный метантенк; 5- коллектор эжекторных мешалок; 6- эжекторные мешалки мезофильной зоны; 7- эжекторные мешалки термофильной зоны; 8- конвективно-индуктивный нагреватель; 9- газгольдер; 10- хемосорбционно-каталитическая система очистки биогаза; 11- смеситель начального биогаза; 12- нагреватель газовой смеси; 13- реактор окисления сероводорода; 14- система хемосорберов; 15- блок выделения  $\text{CO}_2$ ; 16- блок осушки  $\text{CO}_2$ ; 17- теплообменник для охлаждения газа и конденсации серы; 18- блок производства жидкого  $\text{CO}_2$  и сухого льда; 19- прессово-шнековый сепаратор; 20- насос рециркуляции.

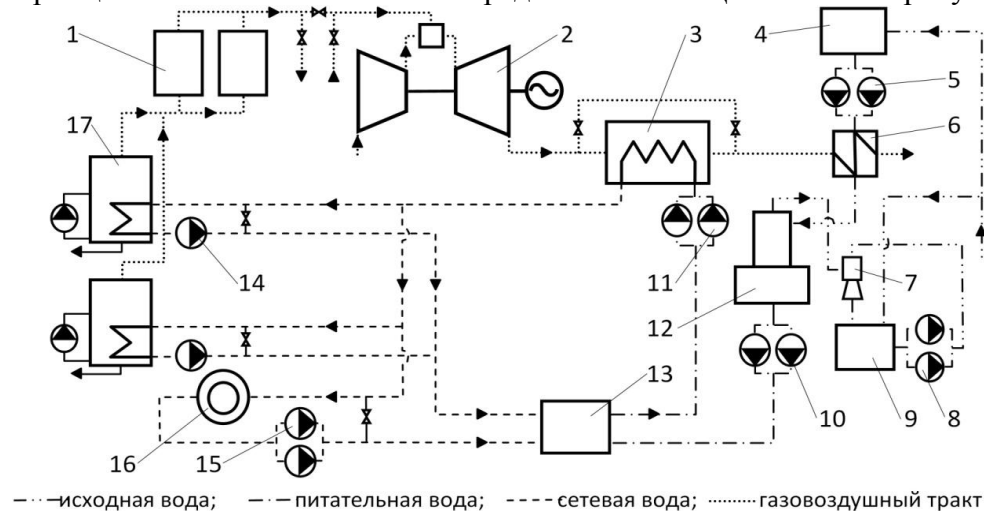
Рис. 7. Технологическая схема биогазовой установки

Специалистами кафедры разработаны проектные решения по АТК класса био-ТЭЦ на базе широкого типоразмерного ряда газовых ДВС и ГТУ для объектов муниципальной и агропромышленной энергетики.

Большинство современных тепловых двигателей, работающих на газообразном топливе предполагает возможность использования топлив с переменными характеристиками, т.е. данные двигатели обычно проектируются как многотопливные. Под многотопливностью понимается возможность работы двигателя на природном, генераторном, попутном газе, биогазе, дизельном топливе и т.п. Основным видом топлива производители рассматривают природный газ ( $Q_n^p = 49108$  кДж/кг). При этом эксплуатационные характеристики двигателя при работе на альтернативных видах топлива, как правило, производителями умалчиваются или труднодоступны для проектанта. Достаточно широкий модельный ряд высокоэкономичных газопоршневых и газотурбинных двигателей спроектирован исключительно для работы на природном газе. В связи с чем необходимо проведение дополнительных исследований (в первую очередь теоретических) для оценки возможности работы на видах топлива с характеристиками отличными от расчётного. В данном случае речь идёт о биогазе ( $Q_n^p = (24100 \div 25900)$  кДж/м<sup>3</sup>), как альтернативе основному виду топлива.

Наряду с рассмотренными проектами АТК агропромышленных предприятий региона может быть осуществлен энергобиологический комплекс (ЭБК) на базе ГП «ОКОС» в пос. Заостровье Калининградской области. На площадке очистных сооружений этого предприятия производится очистка сточных вод курортной зоны с последующим сбросом очищенных стоков в Балтийское море. Проектная производительность очистных сооружений составляет 40 тыс. м<sup>3</sup> в сутки. При модернизации предприятия, которую намерено произвести его руководство, возможно получение биогаза из осадков сточных вод, прошедших биологическую обработку, и пищевых отходов ЖКХ, собранных в курортной зоне и трех районах Калининграда. ЭБК будет работать в режиме ТЭЦ с выработкой электрической энергии газотурбинной установкой (ГТУ) и тепловой энергии в газодляном теплообменнике уходящими из ГТУ газами.

Принципиальная тепловая схема предлагаемой ТЭЦ показана на рисунке 8.



1 – газгольдер; 2 – ГТУ; 3 – газодляной теплообменник; 4 – ХВО; 5 – насос ХВО; 6 – подогреватель ХВО; 7 – эжектор; 8 – эжекционный насос; 9 – бак технической воды; 10 – подпиточный насос; 11 – питательный насос; 12 – деаэратор; 13 – бак питательной воды; 14 – циркуляционный насос; 15 – сетевой насос; 16 – тепловой потребитель; 17 – метантенк

Рис.8. Принципиальная тепловая схема ТЭЦ ГП «ОКОС»

Произведенная электроэнергия может быть использована для обеспечения работы электрооборудования предприятия, а тепловая энергия – на отопление и горячее водоснабжение зданий и сооружений ГП «ОКОС», а также на поддержание термофильного режима в метантенке.

Особо следует остановиться на проблеме избавления территории области от мусорных свалок. Эта проблема возникла не сегодня, но до сих пор не решается радикально. Способ рекультивации свалок (в том числе вблизи Калининграда) не избавляет земные недра, подземные воды и атмосферу от вредных продуктов химических реакций, происходящих в недрах свалочных масс. Единственно надежным способом утилизации отходов является их переработка в высокотемпературных печах с глубокой очисткой дымовых газов

Городское направление энергетического использования биомассы предполагает создание в г. Калининграде и других крупных городах области ( г.Советск, г.Черняховск, г. Гусев) комплексных районных тепловых станций (КРТС), где для выработки тепловой и электрической энергии в качестве основного топлива должны использоваться ТБО и ПО, а в качестве резервного – какое-либо природное топливо. Концепция таких КРТС для России еще в 1996 г. была разработана Институтом теплофизики Сибирского отделения РАН [9]. Технологии очистки уходящих газов от вредных веществ позволяют размещать такие КРТС в городской черте, например, на месте существующих РТС и котельных. В КГТУ уже сделан ряд таких проработок. Одна из них предполагает постепенную ликвидацию свалки в городской черте Советска с использованием отечественной технологии. Эта технология позволяет помимо тепловой и электрической энергии при переработке свежих и свалочных ТБО получать целый ряд других товарных продуктов: металл, строительные материалы, товарный синтез-газ. Одновременно решается проблема круглогодичного горячего водоснабжения Советска [10]. Принципиальная технологическая схема подготовки ТБО к газификации, разработанная на кафедре СЭУ и ТЭ КГТУ приведена на рисунке 9.

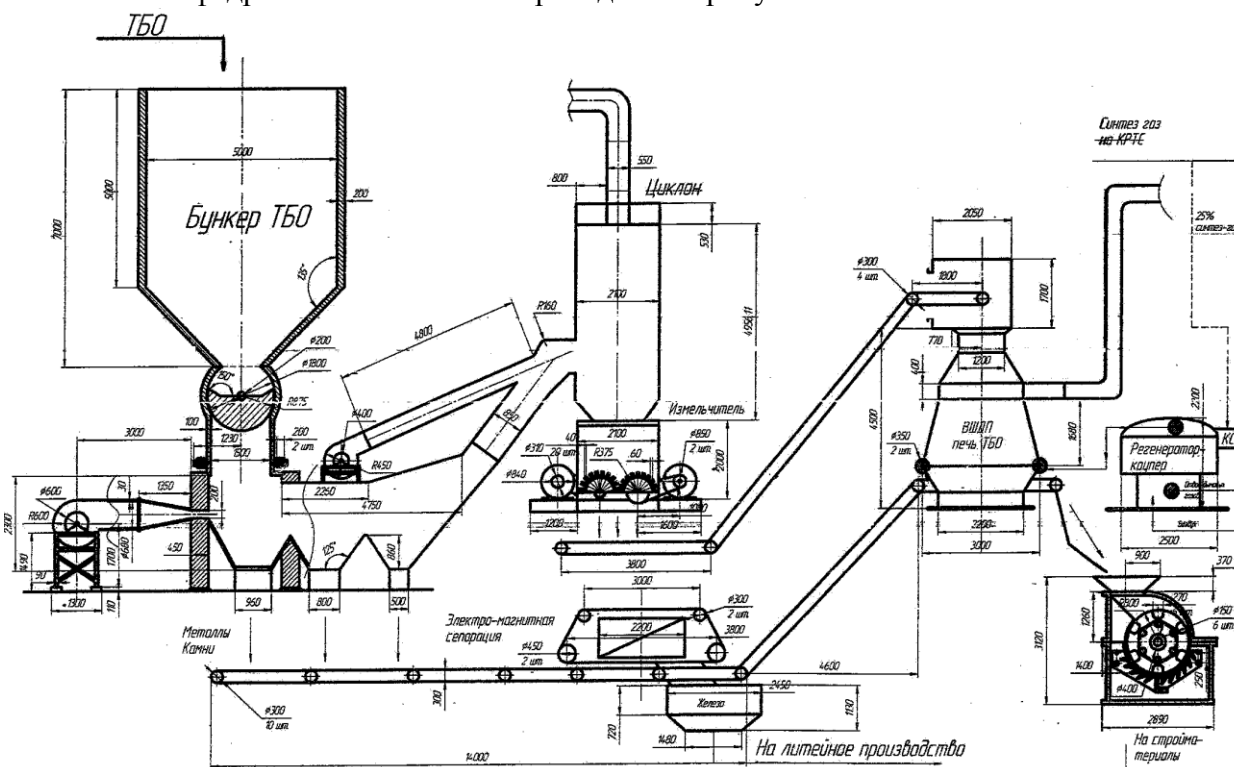


Рис.9. Принципиальная технологическая схема подготовки ТБО к газификации

Одним из перспективных направлений решения проблем обеспечения электрической энергией потребителей в различных, в том числе и сложных условиях, являются топливные элементы (ТЭ). Электрохимическое преобразование топлива в ТЭ позволяет получить достаточно высокий КПД, и экологически чистый состав продуктов реакции (водяной пар, азот, углекислый газ), отсутствие движущихся, а значит и трущихся частей, тихая работа и практическое отсутствие вредных выбросов в окружающую среду. Достоинством когенерационных установок считается то, что они относятся к объектам малой энергетики и располагаются в непосредственной близости к потребителям, т.е. имеют сравнительно короткие линии электропередачи и теплотрассы. Однако под когенерационными объектами обычно понимают только теплоэнергетические объекты: мини-ТЭЦ и котельные, реконструируемые в ТЭЦ. Значительно реже рассматриваются варианты когенерационных установок, которые в качестве основного продукта производят электрическую энергию, а тепло генерируют путем вторичного преобразования электроэнергии. Но именно такой способ когенерации особенно актуален для повышения эффективности использования установок на основе топливных элементов. Такие установки получили название гибридных энергетических комплексов.

Наиболее динамично на сегодняшний день развиваются высокотемпературные топливные элементы с твердым электролитом (ТОТЭ). Электролит ТОТЭ обладает электрической проводимостью по ионам кислорода, что дает возможность использовать в элементе любое углеводородное топливо, включая природный газ, биогаз и продукты газификации угля. Высокая рабочая температура ТОТЭ (1073-1273К) обеспечивает высокие скорости электрохимических реакций в элементе и позволяет снизить стоимость катализатора и потери мощности по сравнению с низкотемпературными топливными элементами. Существующие на сегодняшний день батареи ТОТЭ обладают электрическим КПД 40-60 %. Структурная схема гибридной ТЭУ мощностью 250 кВт на базе ТОТЭ представлено на рисунке 10.

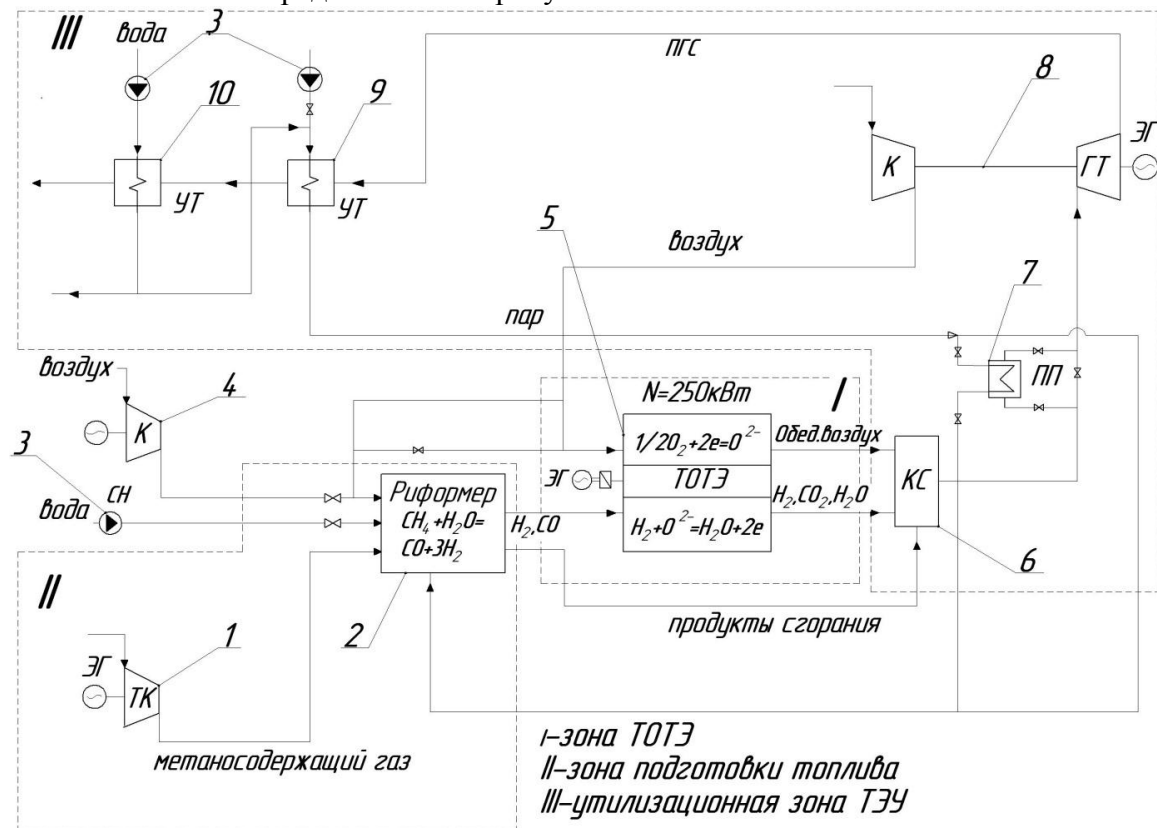


Рис. 10. Структурная схема гибридной ТЭУ на базе ТОТЭ

Основными элементами гибридной энергоустановки на базе ТОТЭ и турбокомпрессора (ТК) являются утилизационная газовая турбина (УТГ), воздушный компрессор и электрогенератор, расположенные на одном валу (8), батарея ТОТЭ (5), инвертор, камера смешения продуктов реакции (6), топливный компрессор (1), рекуператор для подогрева технологической воды (9), рекуператор для полезной утилизации тепла (теплоснабжение потребителей) (12).

Принцип работы схемы заключается в следующем. Топливо (природный газ), первоначально имеющее температуру 15-22°C, подается в топливный компрессор, где нагревается до 530 °С. Подогретое топливо поступает в электрохимический генератор (батарею ТОТЭ). Компрессор, приводимый в движение турбиной, производит забор воздуха из окружающей среды (температура 18-20 °С), нагревает его до 530 °С и поступает в батарею ТОТЭ. После реакции в ТОТЭ газы (1000-1150 °С) поступают в камеру дожигания (6), где при дополнительной подпитке воздухом (и топливом при необходимости) их температура повышается до номинальной входной температуры газов УТГ. Турбина приводится в движение за счет газов разогретых в блоке топливных элементов и камере дожигания, раскручивая генератор и компрессор. Газы на выходе из турбины поступают в рекуператор, и в виде выхлопа выбрасываются в атмосферу.

Водород генерируется в цикле установки в результате паровой каталитической конверсии метана по реакции:  $CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$ .

Спроектированный для этих целей топливный процессор показан на рисунке 11.

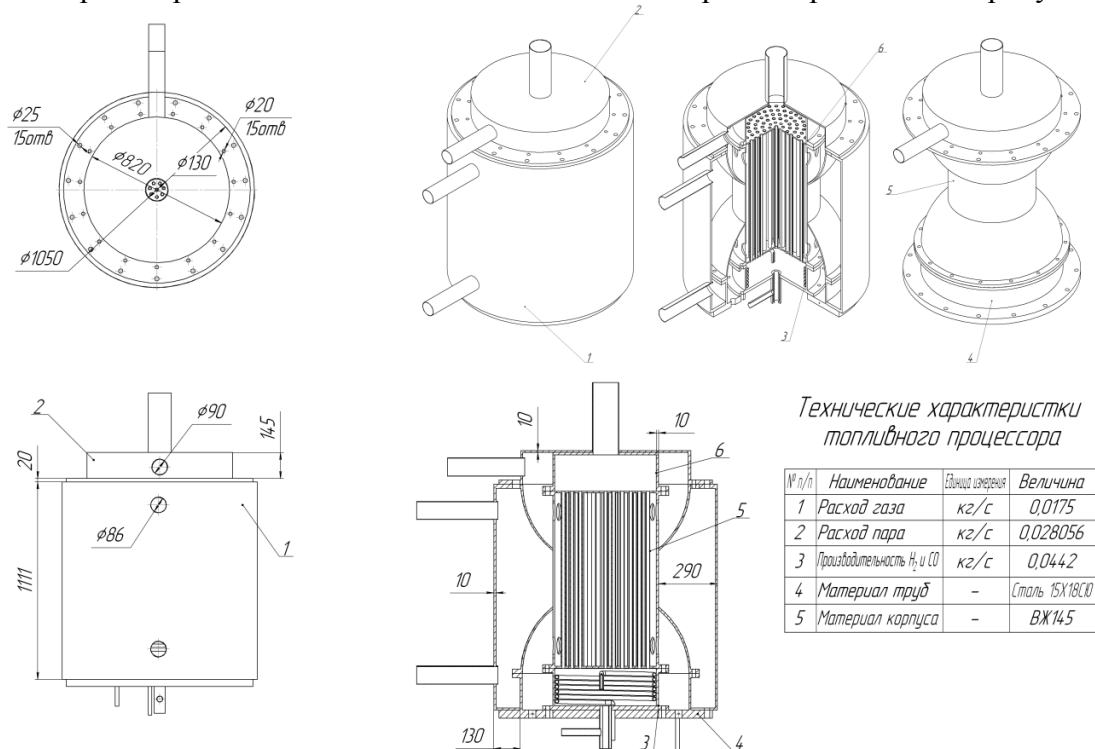


Рис. 11. Общий вид топливного процессора-реформера

По нашему мнению, четкая энергетическая стратегия обеспечения энергетической безопасности региона должна решаться на пути формирования оптимальной структуры генерирующих мощностей с использованием как традиционных источников энергии, так и возобновляемых источников энергии, в первую очередь биомассы городского и сельского происхождения в КРТС и АТК на базе наилучших доступных и разрабатываемых технологий. При этом одновременно с проблемой энергетической безопасности решаются проблемы экологические, санитарные и социальные.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гнатюк В.И. О стратегии развития РЭЭЖ Калининградской области / В.И. Гнатюк // Энергия: экономика, техника, экология. – 2008. – № 11. – С. 10-16.
2. Селин В.В. К вопросу о разработке стратегии развития региональной энергетики / В.В. Селин // Надежность и эффективность технических систем: международный сборник научных трудов / КГТУ. – Калининград, 2009. – С.112-122.
3. Селин В.В. К вопросу о разработке концепции использования биотоплива в энергобалансе Калининградской области / В.В. Селин // Электрика. – 2006. – № 8. – С.9-12.
4. Селин В.В. К вопросу о разработке стратегии развития региональной энергетики // Надежность и эффективность технических систем: международный сборник научных трудов / КГТУ, Морская академия. – Щецин, Калининград, 2009. – С. 112-122.
5. Географический атлас Калининградской области / Гл. редактор В.В. Орлёнок. – Калининград: Изд-во КГУ; ЦНИТ, 2002. – 276 с.
6. Загородных В.А. Геология и полезные ископаемые Калининградского региона / В.А. Загородных, Т.А. Кунаева. – Калининград, 2005. – 250 с.
7. Рагулина, И.Р. Биоэнергетический потенциал Калининградской области: автореф. дисс. канд. геогр. наук: 25.00.36. – геоэкология // РГУ им. Канта. – Калининград, 2007. – 24 с.
8. Николаев Ю.Е. Математическое описание процесса газификации твердого топлива в поточных автотермических газогенераторах / Ю.Е. Николаев, А.Н. Мракин // Вестник СГТУ.-2011.-№1.-с. 154.-161.
9. Комплексные районные тепловые станции. Концепция. / В.Е. Накоряков, С.В. Алексеенко, А.С. Басин, А.В. Попов, Г.И. Багрянцев. – Новосибирск: Сиб. отд. РАН, 1996. – 15 с.
10. Селин В.В. Малая энергетика как инструмент для решения комплекса региональных проблем / В.В. Селин, Н.В. Жданова // Надежность и эффективность технических систем: международный сборник научных трудов / КГТУ. – Калининград, 2008. – С. 143-152.

### **THEORETICAL AND APPLIED ASPECTS OF DISTRIBUTED ENERGY OF KALININGRAD REGION ON THE BASIS OF LOCAL AND RENEWABLE FUEL AND ENERGY RESOURCES. EXAMPLES OF DEVELOPMENT OF INNOVATIVE HEAT-POWER ENGINEERING TECHNOLOGIES AND INSTALLATIONS**

Selin Viktor Vasilyevich, Ph.D., Professor  
Yurkov Sergey Valeryevich, Associate Professor  
Berkova Elena Anatolyevna, Senior Teacher

Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,  
e-mail: viktor.selin@klgtu.ru; sergej.yurkov@klgtu.ru; elena.berkova@klgtu.ru

*The possibilities and ways of using local and renewable fuel and energy resources in the regional energy are explored. Variants of energy use of biomass of rural and urban origin are suggested. Examples of innovative heat and power technologies on local biofuel and peat are given.*



## СЕПАРАЦИЯ КАПЕЛЬ В ЖАЛЮЗИЙНОМ СЕПАРАТОРЕ ПАРА С ПЛОСКИМИ ПЛАСТИНАМИ ПРИ НИЗКИХ ДАВЛЕНИЯХ

Филонов Александр Георгиевич, канд. техн. наук, доцент

Архипов Максим Игоревич, аспирант

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,  
Калининград, Россия, e-mail: sudfac@yandex.ru

*Представлены результаты экспериментальных исследований эффективности очистки вторичного пара от капель испаряемой воды в сепараторах, состоящих из прямых параллельных пластин при барботажном кипении солёной воды. Установлено влияние перекрытия одной пластины другой, способа установки сепаратора в паровом объёме расстояния между пластинами на конечную влажность пара после сепаратора при давлении пара  $P = 0,101$  МПа и  $0,0199$  МПа*

Эффективность работы жалюзийных сепараторов пара судовых дистилляционных опреснителей и стационарных испарительных установок зависит от геометрических характеристик профиля канала пластин жалюзи, из которых собираются сепараторы. Наличие резких поворотов потока пара в криволинейном канале меняет режим его движения и условия сепарации капель испаряемой воды, уносимых вторичным паром в камере испарения аппарата [1, 2].

Для исключения влияния геометрических параметров криволинейного профиля: радиусагиба пластин -  $R$ , числа ступеней сепарации -  $n$ , половины угла поворота потока в криволинейном канале -  $\alpha$ , перекрытия одной пластины другой -  $C$ , можно определить, как влияет расстояние между пластинами  $t$  на величину конечной влажности пара после сепаратора  $\omega_k$  и критическую скорость пара в сепараторе  $W''_{кр}$ . Исследования проводились на экспериментальном барботажном пароводяном стенде, принципиальная схема которого и методика проведения экспериментов подробно приводятся в [1].

Объектом исследований был выбран сепаратор поперечным сечением  $100 \times 100$  мм, состоящий из прямых параллельных пластин длиной 86 мм и толщиной 0,5 мм с различным шагом  $t$ , который устанавливался вертикально, горизонтально и по схеме работы гравитационно-инерционного сепаратора [2]. Конструктивные параметры сепараторов представлены в таблице 1. Сепаратор такой конструкции состоит из прямолинейных каналов прямоугольного сечения, в которых отсутствуют повороты потока пара и перекрытие одной пластины другой (рис. 1 - 2).

Исследование пакета плоских параллельных пластин, установленного по схеме работы гравитационно-инерционного сепаратора, проводилось также с целью определения дополнительного эффекта сепарации капель от действия силы тяжести, так как действие центробежной силы, играющей существенную роль при осаждении влаги в криволинейном канале, здесь невелико.

Следует отметить, что пакет плоских параллельных пластин может устанавливаться после вертикального жалюзийного сепаратора с традиционными волнообразными пластинами для дополнительного снижения  $\omega_k$  и увеличения допустимой скорости потока пара в аппаратах мокрой очистки газов химической промышленности. В связи с этим полученные экспериментальные данные по определению эффективности этого сепаратора будут также представлять интерес.

Сепаратор № 12 представлял собой пакет прямолинейных параллельных пластин, установленных под углом к горизонтали  $\beta = 84^0$  с перекрышей  $C = 10$  мм (рис. 2). Результаты экспериментальных исследований этого каплеуловителя позволят определить во сколько раз снижается величина  $\omega_k$  после одной ступени сепарации влаги и сделать вывод о выборе минимально-необходимого количества полуволн для горизонтального жалюзийного сепаратора.

Таблица 1

### Характеристики исследуемых сепараторов

№ сепаратора	Профиль канала жалюзи	Расстояние между пластинами $t$ , мм	Пространственное расположение пакета сепаратора
1	Криволинейный профиль "а" [2]	10	Вертикальный
2		10	Горизонтальный
3		10	ГИС, $\gamma = 9^0$
4	Криволинейный профиль "б" [2]	10	Горизонтальный
7	"Г"	10,1	Вертикальный
8	"д"	4,2	То же
9	"е"	3,0	То же
10	"ж"	1,7	То же
11	"Г"	10,1	Горизонтальный
12	"Г"	10,1	Горизонтальный, с перекрышей $C = 10$ мм и $\beta = 84^0$
13	"Г"	10,1	ГИС, $\gamma = 9^0$
14	"д"	4,2	То же

На рисунке 3 представлены экспериментальные данные по уносу влаги до и после пакетов прямых параллельных пластин №8 и № 14 в зависимости от солености воды при  $W_0'' = 0,33$  м/с и  $P = 0,101$  МПа, с живым сечением погруженного парораспределительного щита дырчатого листа  $\phi_{отв} = 2,85$  %.

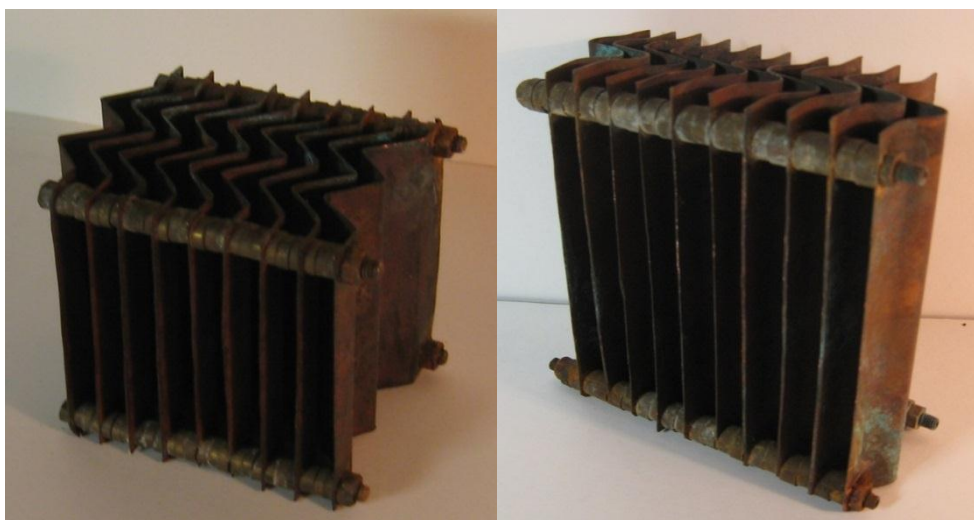


Рис. 1. Исследуемые сепараторы из прямых параллельных пластин № 7 и № 10

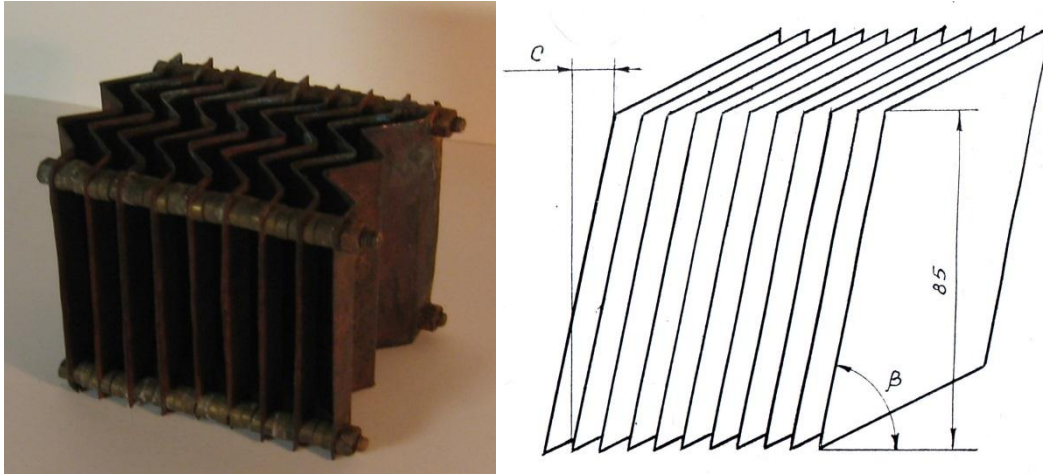


Рис. 2. Исследуемые гравитационно-инерционный и горизонтальный жалюзийные сепараторы из прямых параллельных пластин № 14 и № 12

Солесодержание концентрата изменялось в пределах  $S_p = (10^3 \div 10^5)$  мг/л NaCl, действительный уровень в испарителе поддерживался постоянным, а весовой уровень изменялся в зависимости от солёности в пределах  $h_{вес} = (90 \div 140)$  мм. Исследуемые каплеуловители имели одинаковое расстояние между пластинами  $t = 4,2$  мм и длину пластин  $H = 86$  мм, но разное пространственное расположение: пластины пакета № 8 устанавливались вертикально, а пакет № 14 - по схеме работы ГИС с углом наклона пластин  $\gamma = 9^\circ$  для отвода уловленной влаги.

Из рисунка 3 видно, что значения  $\omega_k$  после пакетов прямых параллельных пластин № 8, № 14 в исследуемом диапазоне  $S_p$  отличались не более, чем в  $(1,2 \div 1,3)$  раза. Полученные опытные данные позволяют утверждать, что влажность пара после пакета плоских параллельных пластин не зависит от солёности испаряемой воды, если истинный уровень остается неизменным.

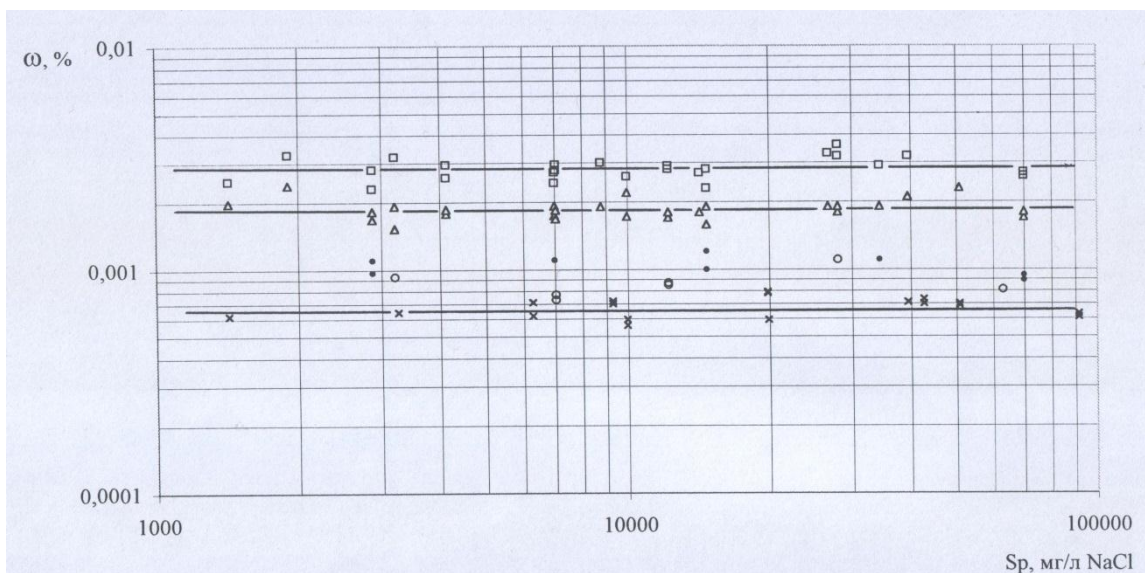


Рис. 3. Влажность пара после сепараторов различного типа в зависимости от солесодержания рассола при  $P = 0,101$  МПа,  $W_c'' = 3,1$  м/с,  $W_o'' = 0,33$  м/с,  $\varphi_{отв} = 2,85$  %,   
 -  $\omega_n$ ,  $H_{no} = 0,435$  м; -  $\omega_c$ ; - вертикальный сепаратор № 1, пакеты прямых параллельных пластин: - вертикальный пакет № 8, - ГИС № 14

Эксперименты подтвердили результаты ранее проведенных исследований влияния  $S_p$  на величину конечной влажности пара после вертикальных сеток и жалюзийных сепараторов [1, 2]. На рисунке 3 для сопоставления приведены значения  $\omega_k$  после вертикального жалюзийного сепаратора №1, обладающего криволинейным профилем канала "а" с шагом  $t = 10$  мм, исследования которого проводились в аналогичных условиях [2]. Скорость пара в проходном сечении всех трех сепараторов была примерно одинакова  $W_c'' = (3,1 \div 3,3)$  м/с. Как показали исследования, влажность после вертикального жалюзийного сепаратора №1, была ниже в  $(1,5 \div 1,8)$  раза по сравнению с пакетами № 8, № 14, несмотря на то, что шаг между пластинами жалюзи у этого каплеуловителя был в 2,4 раза меньше.

На рисунке 4 представлены результаты экспериментального исследования эффективности сепараторов № 7, № 11, № 13, собранных из прямолинейных параллельных пластин, в зависимости от скорости пара  $W_c''$  и способа установки пакета пластин в паровом объеме стенда, полученные на соленой воде при  $t_s = 60$  °С,  $W_o'' = 1,6$  м/с.

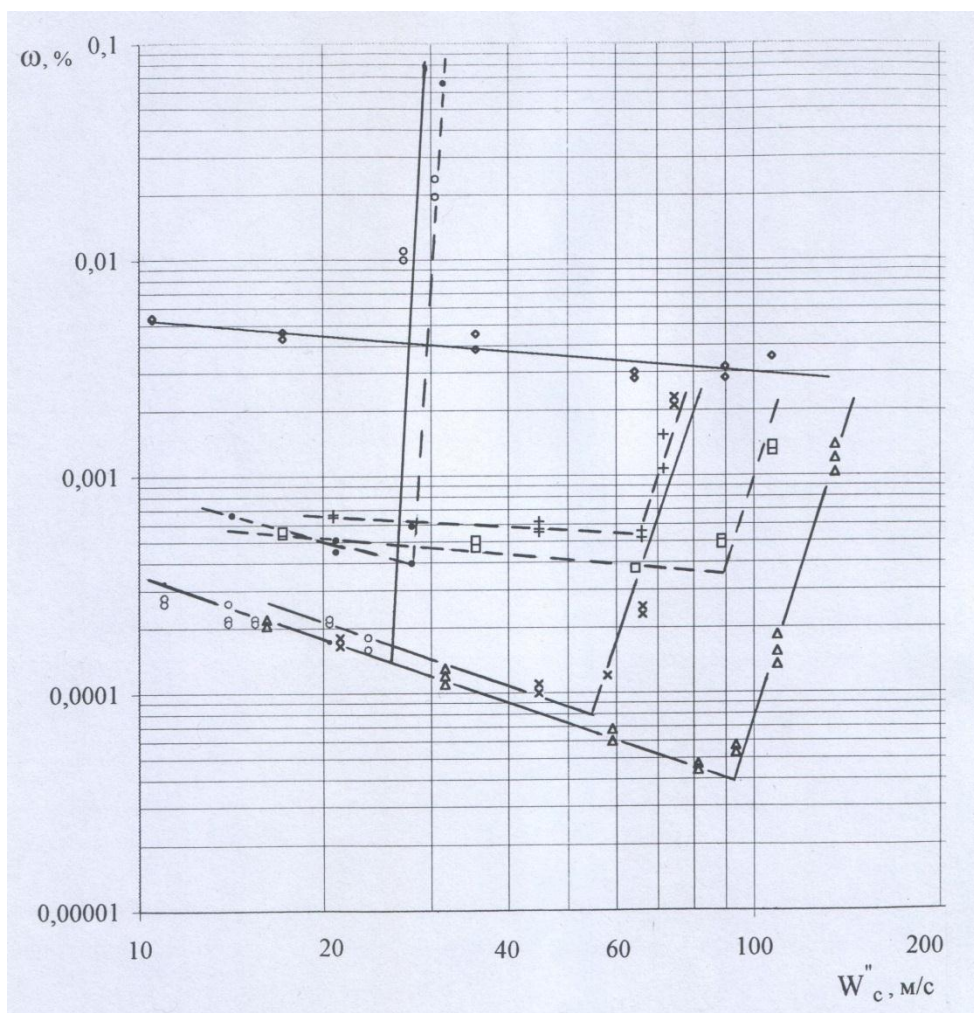


Рис. 4. Влажность пара после сепараторов различного типа в зависимости от скорости пара в сепараторе и способа установки пакета пластин в паровом объеме стенда при  $P = 0,0199$  МПа,  $W_o'' = 1,6$  м/с

○, □, △ - жалюзийные сепараторы №1, №3, ГИС №6  
 ○, □, △ - пакеты параллельных пластин №7, №11, ГИС №13

На основании рис.4 можно утверждать, что конечная влажность после всех трех пакетов, установленных по схемам работы вертикального, горизонтального и гравитационно-инерционного сепараторов, оказалась примерно одинаковой. Критическая скорость вертикального сепаратора № 7 превосходила значения  $W_{кр}''$  для горизонтального сепаратора № 11 и ГИС № 13 с  $\gamma = 9^\circ$ . На этом рисунке показаны также зависимости  $\omega_k = f(W_c'')$  для ГИС № 6, горизонтального и вертикального жалюзийных каплеуловителей № 3, № 1 с традиционным криволинейным профилем канала "а", полученные при тех же условиях работы. Все шесть сепараторов имели одинаковый шаг  $t = 10$  мм.

Из сопоставления характеристик  $\omega_k = f(W_c'')$ , показанных на рисунке 4, видно, что значения конечной влажности после жалюзийных сепараторов № 1, № 3, № 6 оказались в  $(2,8 \div 7)$  раз ниже, чем после пакетов № 7, № 11, № 13 с аналогичным способом установки в паровом объеме стенда, что можно объяснить отсутствием перекрыши С в профиле "г", а также наличием значительного сепарационного эффекта, вызываемого в криволинейном канале действием центробежной силы. Как показали визуальные наблюдения, через горизонтальный пакет параллельных пластин № 7, пролетали даже отдельные крупные капли. Поэтому с увеличением скорости набегающего потока пара  $W_c''$  эффективность осаждения влаги в пакетах прямых параллельных пластин возрастала гораздо слабее, чем в жалюзийных сепараторах.

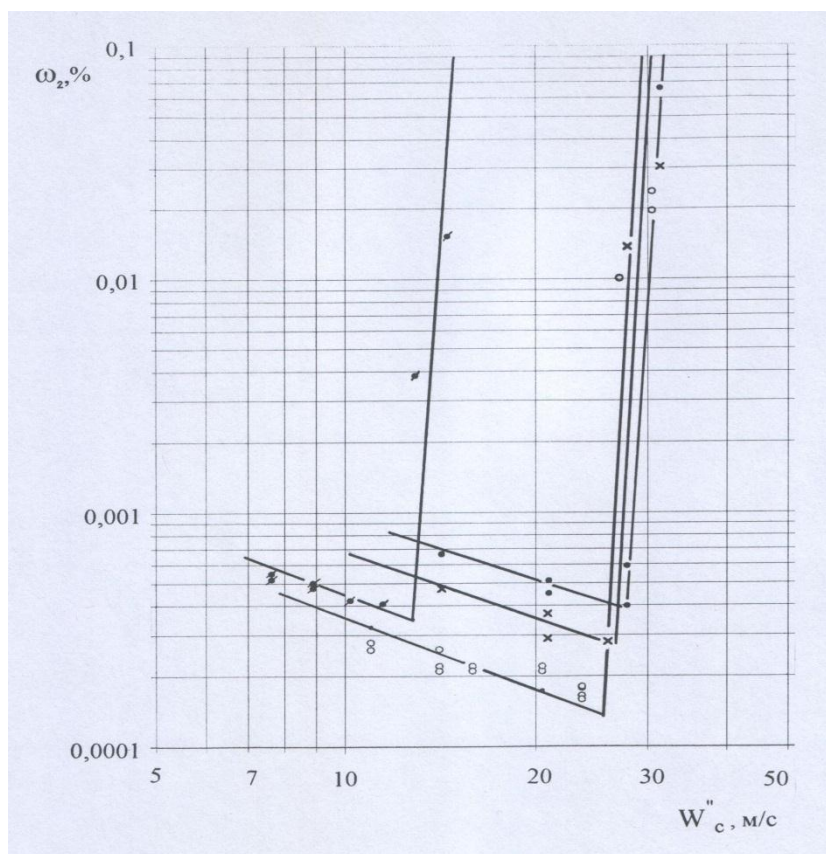


Рис. 5. Влажность пара после горизонтальных сепараторов различного типа в зависимости от скорости пара в сепараторе и перекрытия пластин С при  $P = 0,0199$  МПа,  $W_o'' = 1,6$  м/с  
, , - жалюзийные сепараторы № 3 ( $C = 5$  мм), № 4 ( $C = 10$  мм);  
, - пакеты параллельных пластин № 11 ( $C = 0$  мм), № 12 ( $C = 10$  мм)

Влияние перекрытия на эффективность сепарации капель в горизонтальном пакете прямых параллельных пластин № 12 с профилем “г” показана на рисунке 5. При значении  $C = 10$  мм величина конечной влажности по сравнению с пакетом пластин № 11 снизилась примерно в 1,5 раза. Конечная влажность пара уже после первого поворота потока пара была меньше величины  $\omega_n$  в  $(22,0 \div 27,5)$  раза. Однако эффективность горизонтального сепаратора № 3 с криволинейным профилем канала, характеристика которого показана на рисунке 5, оставалась по-прежнему выше приблизительно в 2 раза. На этом рисунке показана также зависимость  $\omega_k = f(W_c^n)$  для горизонтального жалюзийного каплеуловителя № 4. Увеличение перекрыши в горизонтальном сепараторе до  $C = 10$  мм уже не приводило к дальнейшему уменьшению конечной влажности, а сопровождалось снижением критической скорости пара в сепараторе.

По данным, приведенным на рисунках 4 и 5 можно установить, что значения критической скорости потока пара для сепараторов с криволинейным и прямолинейным профилями каналов, имеющими одинаковое расположение в пространстве (№ 1 и № 7; № 3, № 11 и № 12; № 6 и № 13), отличаются не более, чем на  $(5 \div 7)$  м/с. Критическая скорость пара в жалюзийных сепараторах и в пакетах параллельных пластин с шагом  $t = 10$  мм при одинаковых условиях работы определялась способом дренажа уловленной жидкости.

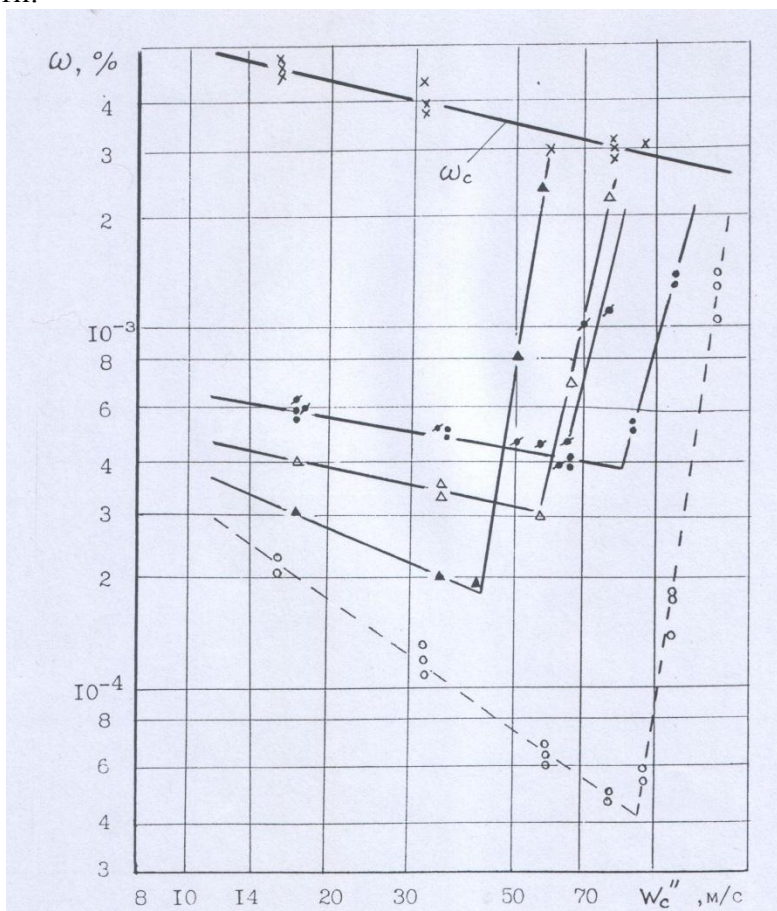


Рис. 6. Влажность пара после вертикальных сепараторов различного типа в зависимости от скорости пара в сепараторе и шага  $t$  при  $P = 0,0199$  МПа,  $W_0'' = 1,6$  м/с,

, , - жалюзийный сепаратор № 1,  $t = 10$  мм;  
, , , - пакеты параллельных пластин № 7, 8, 9, 10,  $t = 10$ ; 4,2; 3; 1,7 мм

Результаты экспериментальных исследований вертикальных пакетов прямых параллельных пластин №7 - №10 с различной величиной шага  $t$ , представленные на рисунках 6, 7 подтвердили существующее предположение о влиянии расстояния между пластинами на значения конечной влажности  $\omega_k$  и критической скорости пара. Уменьшение величины  $t$  с 10,1 мм до 4,2 мм не отразилось на значениях  $\omega_k$ , что, вероятно, можно объяснить малыми размерами пролетающих через сепаратор капель, из которых состоит транспортируемый унос после поворота. Дальнейшее уменьшение шага до  $t = 3,0$  мм и  $t = 1,7$  мм сопровождалось снижением  $\omega_k$  в  $(1,5 \div 2,5)$  раза. Однако, как видно из рисунка 6, эффективность горизонтального сепаратора № 3 с криволинейным профилем канала "а" оставалась по-прежнему выше в  $(1,5 \div 1,8)$  раза.

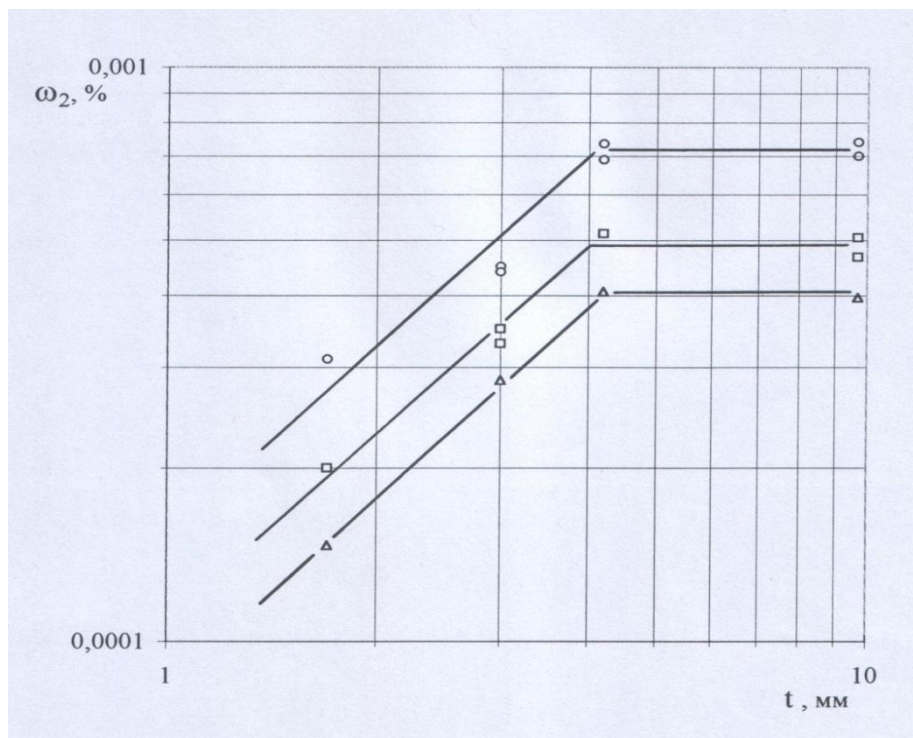


Рис. 7. Зависимость влажности пара после вертикального пакета прямых параллельных пластин от расстояния между пластинами  $t$  при  $P = 0,0199$  МПа,  $W_o'' = 1,6$  м/с  
 -  $W_c'' = 17,2$  м/с, -  $W_c'' = 35,5$  м/с, -  $W_c'' = 57,3$  м/с

Величина шага оказывала влияние также и на критическую скорость пара в сепараторе. Уменьшение расстояния между пластинами с 10,1 мм до 1,7 мм приводило к снижению  $W_{кр}''$  в вертикальных пакетах пластин примерно в  $(1,8 \div 2,0)$  раза. Коэффициенты очистки пара в вертикальном пакете параллельных пластин № 7 и вертикальном жалюзийном сепараторе № 1 с шагом 10 мм составляли  $K_{оч} = (8 - 10)$  и  $K_{оч} = (23 - 73)$  соответственно (рис.4). Установка в повороте горизонтального пакета № 11 ( $t = 10,1$  мм) привела к увеличению величины общего коэффициента очистки пакета пластин № 11 и поворота с  $K_{п} \approx 26$  до  $K_{оч} = (187 - 300)$ . Установка традиционного горизонтального жалюзийного сепаратора № 3 давала снижение  $\omega_{п}$  в  $(428 - 750)$  раз (рис. 4, 5).

По мнению ряда авторов, эффективность улавливания капель в пакете прямых параллельных пластин может определяться инерционным захватом плоских пластин, диффузионным осаждением мелких капель в пристеночной области, эффектом зацеп-

ления капель при обтекании пластины, уменьшением турбулентности и транспортирующей способности потока пара в каналах сепаратора. Общий суммарный эффект очистки пара вследствие действия предполагаемых механизмов осаждения капель в пакете параллельных пластин оказывается достаточно существенным.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Архипов М.И., Филонов А.Г. Исследование эффективности вертикальных сепараторов пара судовых дистилляционных опреснителей // Морские интеллектуальные технологии, 2017. Т.1. № 3. С.74-79.

2. Архипов М.И., Филонов А.Г. Экспериментальное исследование влияния геометрических характеристик профиля канала жалюзи на эффективность очистки вторичного пара в сепараторах судовых опреснителей // Морские интеллектуальные технологии, 2017. Т.2. № 4. С.93-99.

#### **DROPS SEPARATION IN THE LOUVER STEAM SEPARATOR OF FLAT PLATES AT LOW PRESSURES**

Filonov Alexandr Georgievich, PhD, associate professor  
Arkhipov Maksim Igorevich, postgraduate

Kalininsrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,  
e-mail: sudfac@yandex.ru

*The article presents the experiments results of flate-plates and zig-zag-plates entrainment separators investigation. The effects of steam velocity, flate-plates distance, separator location and boiling water saltiness on droplet collection efficiency are experimentally studied under steam pressure  $P = 0,101$  MPa and  $0,0199$  MPa.*

УДК 620.91/.98(470.26)

#### **К ВОПРОСУ О НОРМИРУЕМЫХ ПОКАЗАТЕЛЯХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЭС НА ТБО**

Юрков Сергей Валерьевич, доцент

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»  
Калининград, Россия, e-mail: sergej.yurkov@klgtu.ru

*Предложена система удельных и относительных показателей энергетической эффективности тепловых электрических станций и тепло-электроцентралей, использующих в качестве топлива твердые смешанные бытовые отходы. Определена область их применения. Приведены примеры расчета*

Как показывает мировой опыт, самым доступным и одним из наиболее экономически целесообразных возобновляемых источников энергии являются твердые бытовые отходы (ТБО), сжигаемые на тепловых электростанциях ТЭС и тепло-электроцентралях



ТЭЦ (ТЭС или ТЭЦ на ТБО). ТБО - это топливо, которое по теплоте сгорания сопоставимо с торфом и некоторыми марками бурых углей, образуется в местах, где электроэнергия наиболее востребована, т. е. в крупных городах, и имеет гарантированное предсказуемое возобновление.

В России до недавнего времени предприятия для сжигания отходов находились вне сферы интересов энергетиков. Переработкой ТБО занимались коммунальные службы, которые в первую очередь решали проблему санитарной очистки городов от образующихся отходов. Выделяющуюся в процессе сжигания энергию использовали для покрытия собственных теплофикационных нужд и, в лучшем случае, отпускали излишки в тепловые городские сети.

В отличие от России за рубежом в настоящее время значительная часть предприятий для сжигания отходов принадлежит ведущим энергетическим компаниям, и интерес энергетиков к этому источнику энергии продолжает возрастать. ТБО уже давно и практически во всех промышленно развитых странах рассматриваются как один из перспективных возобновляемых источников получения электроэнергии [1].

Нормативная база в части показателей энергетической эффективности, применительно к процессам создания, применения изделий, ликвидации их после использования по назначению на этапах технологического цикла отходов с вовлечением отходов в хозяйственную деятельность в качестве вторичных материально-сырьевых и энергетических ресурсов, находится в стадии разработки.

Для количественной характеристики энергоэффективности ТЭС на ТБО предлагается использовать как удельные, так и относительные нормируемые показатели.

В качестве укрупненного показателя удельной энергетической эффективности ТЭС (ТЭЦ) на ТБО целесообразно использовать отношение массы ТБО на единицу выработанной товарной энергии :

$$\frac{\text{утилизированная масса ТБО}}{\text{произведенная товарная энергия}} = \left[ \frac{\text{тонн ТБО}}{\text{МВт*ч (электроэнергии)}} \right] \quad (1)$$

или величину обратную, т.е. отношение количества выработанной товарной энергии из единицы массы ТБО :

$$\frac{\text{произведенная товарная энергия}}{\text{утилизированная масса ТБО}} = \left[ \frac{\text{МВт*ч (электроэнергии)}}{\text{тонн ТБО}} \right]. \quad (2)$$

В последнем случае явно выражен физический смысл показателя, поскольку единице массы ТБО может быть поставлен в соответствие их энергетический потенциал, рассчитанный с учетом теплоты сгорания 1 кг ТБО в расчете на сухую  $Q_H^c$  или рабочую  $Q_H^p$  массу : 1 тонна ТБО обладает располагаемой теплотой  $Q = 1000 * Q_H^p$ , [МДж]. В свою очередь :  $1 \text{ МДж} = 1 \text{ МВт*ч} / 3600$  .

Приводя числитель соотношения (2) к размерности [МДж], мы получаем безразмерный показатель, характеризующий косвенно энергетическую эффективность ТЭС на ТБО :

$$\frac{\text{МДж (электроэнергии)}}{\text{МДж (тонны ТБО)}} = \frac{3,6 * \text{МВт*ч}}{Q_H^p (\text{ТБО})} .$$

Рассматриваемый показатель, по сути, представляет собой электрический КПД ТЭС на ТБО. Аналогичный показатель может быть использован и для теплофикационных котельных на ТБО :

$$\frac{\text{МДж (тепловой энергии)}}{\text{МДж (тонны ТБО)}} = \frac{3,6 \cdot \text{МВт} \cdot \text{ч}}{Q_n^p (\text{ТБО})} = \frac{\text{Гкал (тепловой энергии)}}{4,19 \cdot \text{МДж (тонны ТБО)}} \cdot$$

Здесь следует учитывать, что для расчета этой группы показателей необходимо иметь информацию о средней теплоте сгорания ТБО на рассматриваемом объекте. Кроме того, данными показателями не учитывается расход энергии дополнительного топлива, используемого для производства товарной энергии.

С точки зрения оценки утилизационной мощности ТЭС на ТБО (производительности по утилизации ТБО) целесообразно использовать показатель, представляющий собой отношение часового расхода ТБО к номинальному значению генерируемой мощности (электрической или тепловой):

$$\frac{\text{часовой расход ТБО}}{\text{генерируемая мощность}} = \left[ \frac{\text{тонн ТБО/час}}{\text{МВт (электроэнергии)}} \right]$$

или (3)

$$\frac{\text{часовой расход ТБО}}{\text{генерируемая мощность}} = \left[ \frac{\text{тонн ТБО/час}}{\text{МВт (тепловой энергии)}} \right] \cdot$$

Для целей оценки (сравнения) уровня достижимой генерируемой мощности энергообъекта на ТБО может быть использован показатель, рассчитываемый как величина обратная соотношению (3) :

$$\frac{\text{генерируемая мощность}}{\text{часовой расход ТБО}} = \left[ \frac{\text{МВт (электроэнергии)}}{\text{тонн ТБО/час}} \right]$$

или (4)

$$\frac{\text{генерируемая мощность}}{\text{часовой расход ТБО}} = \left[ \frac{\text{МВт (тепловой энергии)}}{\text{тонн ТБО/час}} \right] \cdot$$

Показатели, рассчитанные по формулам (3) и (4) могут применяться для целей предварительной оценки уровня мощности при известном массовом потоке ТБО, предполагаемых для энергетической утилизации.

Проиллюстрируем последнее утверждение на примере. Пусть известна массовая емкость полигона ТБО и входные потоки ТБО. Исходя из производительности транспортной системы, формирующей потоки ТБО, в том числе к энергообъекту, используя показатель (4) можно определить, в первом приближении, достижимую энергетическую мощность ТЭС на ТБО (без учета использования дополнительного топлива).

Полигон «Барсуково» характеризуется накопительной емкостью 100000 тонн/год, что соответствует входному потоку 12,5 т/час. Достижимые мощности (МВт) при различной энергетической эффективности ТЭС (Котельной) рассчитываются путем умножения величины входного потока ТБО для данного полигона (12,5 т/ч) на удельную мощность ТЭС при заданном потоке ТБО, ( МВт/тонн\*ч).

Результаты расчета достижимой мощности энергообъектов различной энергетической эффективности приведены в столбце 4 таблицы 1.

## Удельные показатели энергетической эффективности

Наименование ТЭС на ТБО, страна	Удельная мощность ТЭС при заданном потоке ТБО, МВт/тонн*ч	Энергетическая эффективность полезного использования энергии топливной составляющей ТБО, МДж эл./МДж т тбо (МВт эл./МВт топл)	Достижимые мощности при различной энергетической эффективности ТЭС(Котельных), МВт
1	2	3	4
Amager Bakke / Copenhill, Дания	0,62	0,19	7,8
County Meath, Ирландия	2,57 (тепловая)	1,16	32,1
Amsterdam Waste Fired Power Plant, Голландия	0,63	0,21	7,9
A2A Brescia, Италия	0,70	0,23	8,7
Sundsvall, Швеция	0,60	0,20	7,5
L90 Esbjerg, Дания	0,73	0,24	9,2
Reno Nord, Дания	0,90	0,27	11,3
West Palm Beach, США	0,84	0,30	10,5
Roskilde, Дания	0,80	0,26	10,0
Runsdorf, Германия	0,96	0,29	12,0
EBS Knapsack, Германия	0,88	0,29	11,0
МСЗ №2, Россия Москва	0,19	0,08	2,4
МСЗ №3, Россия Москва	0,24	0,10	3,1
МСЗ №4, Россия Москва	0,35	0,15	4,4

С точки зрения энергетической эффективности использования топливной составляющей ТБО, данный показатель так же отражает уровень электрического КПД ТЭС:

$$\eta_{эл} = \frac{\text{МВт эл.эн.}}{\text{МВт эн.топлива}} \cdot$$

Для перехода к такой безразмерной величине необходимо в знаменателе отношения (4) привести массовый расход ТБО к его энергетическому эквиваленту:

$$\frac{[\text{т/час}] \text{ ТБО} * 1000 [\text{кг}] * Q_n^p [\text{Дж/кг}]}{3600 [\text{с}]} \Rightarrow Q_{\text{топливн.}} [\text{МВт}].$$

Результаты расчета  $\eta_{эл}$  для энергообъектов представленных в таблице 1 приведены в столбце 3.

За рубежом практически на всех современных предприятиях по термической утилизации ТБО, выделяемая в процессе термической переработки ТБО энергия, обязательно преобразуется в тепловую для отпуска потребителю или для дальнейшей выработки электроэнергии. Европейским законодательством предложена формула R1 [2] оценки энергоэффективности (Э) таких предприятий, которую применительно к российским условиям можно представить следующим образом:

$$\Theta = \frac{(E_p - (E_f + E_i))}{(0,97 * (E_w + E_i))} , \quad (5)$$

где  $E_p$  - энергия, отпущенная потребителю в виде тепла или электроэнергии, ГДж/год. Эта величина умножается на коэффициент  $K_T=1,1$  при отпуске тепла и на  $K_{эл}=2,6$  при выработке электроэнергии;  $E_f$  - теплота дополнительного топлива, за траченного на производство энергии, ГДж/год;  $E_w$ - энергия, содержащаяся в перерабатываемых отходах, рассчитанная с учетом их теплоты сгорания, ГДж/год;  $E_i$  - импортируемая энергия, получаемая от внешнего поставщика, ГДж/год, исключая  $E_w$  и  $E_f$ ; 0,97 - коэффициент, учитывающий тепловые потери с золошлаками и в окружающую среду.

На современных предприятиях с экономической и экологической точек зрения энергетическая эффективность процесса составляет 0,60 - 0,65 (60 - 65 %). Если предприятие, удовлетворяющее этому требованию, специализируется на отпуске электроэнергии внешнему потребителю (или на комбинированном отпуске тепловой и электрической энергии), его можно считать ТЭС на ТБО.

С энергетической точки зрения данная формула выражает отношение полезно используемой в энергетическом процессе тепловой энергии, выделившейся при сжигании ТБО, к располагаемой химической энергии горючих компонентов ТБО с учетом затрат внешней энергии на осуществление процесса сжигания. Физический смысл формулы можно пояснить с помощью схемы, представленной на рисунке 1.

Строго говоря,  $E_p$  – это товарная энергия, приведенная к первичной, т.е. тепловой энергии, выделившейся при сжигании ТБО и полезно использованной в мусоро-сжигательном устройстве (МСУ). Это энергия, переданная от продуктов сгорания горючих компонентов ТБО к рабочему телу теплоэнергетической установки (ТСУ) – пару. Если пар является носителем товарной тепловой энергии, то в процессе его получения должны быть учтены потери, характеризующиеся КПД-нетто котлоагрегата -  $\eta_T$ . В этом случае необходимо разделить величину товарной тепловой энергии на  $\eta_T$ :

$$E_p = (E_{p_T} / \eta_T)$$

или умножить на  $K_T$ :

$$E_p = (E_{p_T} * K_T) .$$

В том случае, когда тепловая энергия рабочего тела (пара) преобразуется в тепловом двигателе в механическую, а затем – в электрическую в электрогенераторе, переход от товарной электрической к первичной тепловой энергии должен учитывать наряду с потерями в котле, необратимые потери в турбине, передаче, генераторе, характеризующиеся электрическим КПД теплоэнергетической установки -  $\eta_{эл}$ .

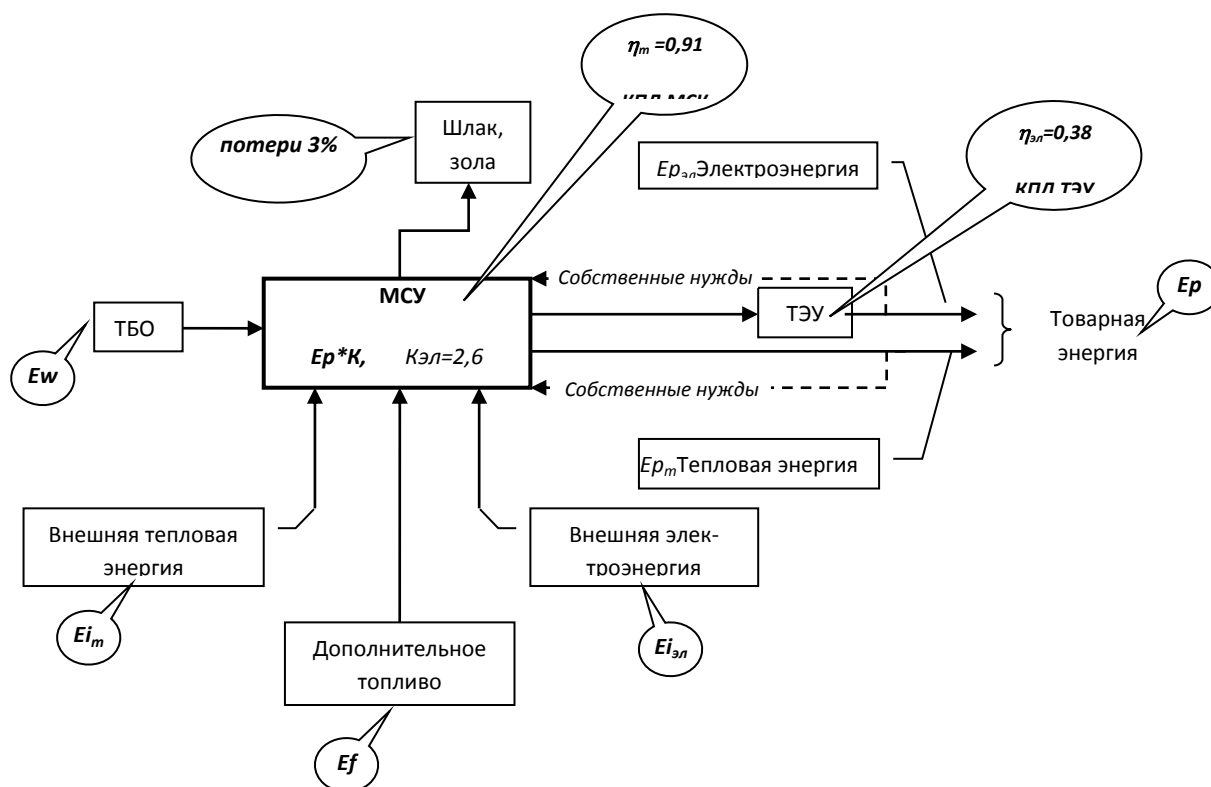


Рис. 1. Структурная схема энергетических потоков ТЭС на ТБО

Величина товарной электрической энергии, в этом случае, делится на  $\eta_{эл}$ :

$$E_p = (E_{p_{эл}} / \eta_{эл})$$

или умножить на  $K_{эл}$ :

$$E_p = (E_{p_{эл}} * K_{эл}) .$$

Напомним, что  $\eta_{эл}$  учитывает в т.ч. и потери первичной энергии в котлоагрегате.

Приведение различных видов энергии к первичной необходимо в связи с существенным различием качества (потенциала) как электрической и тепловой энергии, так и тепловой энергии с различными параметрами.

Рекомендуемым значениям коэффициентов  $K_t$  и  $K_{эл}$  соответствуют среднеевропейские значения  $\eta_t = 0,91$  и  $\eta_{эл} = 0,38$  (для парогенераторов средней мощности и паротурбинных установок на их базе), принятые в качестве нормативных в соответствии с принципами наилучших доступных технологий, то есть: при  $\eta_t = 0,91$   $K_t = 1/\eta_t = 1,1$ ; при  $\eta_{эл} = 0,38$   $K_{эл} = 1/\eta_{эл} = 2,6$ .

Полезное тепловыделение в котле достигается при условии должной предварительной подготовки ТБО к сжиганию, что требует дополнительных затрат внешней энергии. Кроме того, за счет внешней энергии как тепловой, так и электрической обеспечивается работа систем и устройств, как котельной установки, так и ТЭУ в целом. Без этих дополнительных энергозатрат ни система подготовки к сжиганию, ни котел, ни тепловой двигатель работать не смогут. Таким образом  $E_i$  – это неизбежные затраты энергии, включенные в товарную энергию  $E_p$ , а значит подлежащие исключению из нее в процессе перехода к первичной тепловой.

Энергия дополнительного топлива  $E_f$ , обеспечивающая условия качественного сгорания горючих компонентов ТБО в случае их малой концентрации в исходной рабочей массе также подлежит исключению из товарной энергии при переходе к первичной тепловой, выделившейся из ТБО.

К числу основных внешних потерь энергии топливосжигающих устройств относятся потери тепла во внешнюю среду с излучением от нагретых поверхностей элементов конструкции котла и с физическим потоком шлака, отводимого за пределы топки. Данные потери приняты в размере 3% от физической теплоты выделившейся в топке в результате сжигания ТБО.

При оценке показателя энергоэффективности в первом приближении. Можно допустить, что отношение  $\frac{E_p - (E_f + E_i)}{0,97}$  фактически является располагаемой теплотой сгорания горючей массы ТБО -  $E_w$ .

Тогда формула (5) приводится к виду:

$$\Theta = \frac{E_w}{(E_w + E_i)} . \quad (6)$$

Для энергетических установок с термической утилизацией ТБО, введенных в эксплуатацию с 01.01.2009г., согласно [ ], пороговым значением энергоэффективности установлено значение  $\Theta=0,65$ . Это означает, что в соответствии с Европейским законодательством в области энергетики, эффективными считаются установки для которых  $\Theta \geq 0,65$ . Подставляя пороговое значение  $\Theta$  в формулу (6) получим:

$$\frac{E_w}{(E_w + E_i)} \geq 0,65. \quad (7)$$

В результате решения этого неравенства получаем предварительную оценку допустимой величины расхода внешней энергии на собственные нужды ТЭС на ТБО:

$$E_w \geq 0,65 * (E_w + E_i); \quad E_i \leq 0,54 * E_w \quad (8)$$

Из соотношений (8) следует, что для энергоэффективных ТЭС на ТБО величина импортируемой энергии для собственных нужд ТЭС не должна превышать половины располагаемой теплоты сгорания ТБО.

Подставляя в формулу (5)  $E_i$  из соотношений (8) для значения  $\Theta=0,65$  получим:

$$\frac{E_p - (E_f + 0,54E_w)}{(0,97 * (E_w + 0,54E_w))} = 0,65 . \quad (9)$$

Отсюда:

$$K * E_p = 1,51 * E_w + E_f , \quad (10)$$

$$\text{при } K = K_\Theta = 2,6 \quad E_p = 0,58 * E_w + 0,38 * E_f , \quad (11)$$

$$K = K_T = 1,1 \quad E_p = 1,37 * E_w + 0,91 * E_f . \quad (12)$$

Формулы (11) и (12) устанавливают зависимость между товарной и первичной располагаемой энергией основного и дополнительного топлива при нормируемом уровне затрат внешней энергии на собственные нужды ТЭС на ТБО.

Следует заметить, что приводя входящие в (5) величины к размерности [МДж/с] уравнения (11) и (12) представляют собой баланс мощности конечной и первичной энергии.

Например, если располагаемая энергия вносимая в топку МСУ с потоком ТБО в единицу времени составляет величину -  $E_w = 8$  МВт, то котельная на ТБО без сжигания дополнительного топлива и при нормируемом уровне внешних энергозатрат будет отвечать уровню энергоэффективности  $\Theta = 0,65$  при отпуске товарной энергии в количестве  $E_{p,r} = 1,96$  МДж/с(МВт), а ТЭС на ТБО, при тех же исходных данных, должна иметь нормативную электрическую мощность  $E_{p,эл} = 4,64$  МВт.

Рассмотренные показатели позволяют достаточно полно количественно характеризовать уровень энергетической эффективности энерго-технологических объектов по термической утилизации ТБО и могут быть использованы в качестве нормируемых параметров как для оценки эксплуатационной эффективности, так и при проектировании ТЭС на ТБО.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тугов А. Н. Использование энергопотенциала твердых бытовых отходов в России и за рубежом / А. Н. Тугов, В. Ф. Москвичев // Энергия: экономика, техника, экология. - 2011. - № 8. - С. 32-42.
2. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives (Text with EEA relevance). Official Journal of the European Union. 22.11.2008. – P. 126.

#### **ON THE QUESTION OF NORMALIZED INDICATORS OF ENERGY EFFICIENCY OF THERMAL POWER STATIONS ON SOLID WASTES**

Yurkov Sergey Valerevich, Associate Professor of the Department of Ship Power Plants and Heat Power Engineering

Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,  
e-mail: sergej.yurkov@klgtu.ru

A system of specific and relative indicators of the energy efficiency of thermal power plants and heat electric power plants using solid mixed domestic waste as fuel is proposed. The scope of their application has been determined. Examples of calculation are given.

## СЕКЦИЯ «ПРОМЫШЛЕННОЕ РЫБОЛОВСТВО»

### SECTION "COMMERCIAL FISHING"

УДК 639.2.061

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ КАНАТОУКЛАДЧИКОВ НА КАНАТОЕМКОСТЬ НАВИВНЫХ БАРАБАНОВ

Бальчитис Кирилл Вацисович, аспирант  
Суконнов Анатолий Владимирович, канд. техн. наук, доцент

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,  
Калининград, Россия,  
e-mail: balchitis039@gmail.com; e-mail: anatoly.sukonnov@klgtu.ru

*Неправильная укладка каната на барабан траловой лебедки приводит к уменьшению канатоемкости барабана, захлестам, износу троса, а также к аварийным ситуациям. Были проведены экспериментальные исследования по оценке влияния факторов реальных условий эксплуатации на качество укладки каната, получена зависимость, позволяющая определить степень влияния исследуемых факторов. Для повышения качества укладки каната и обеспечения максимальной канатоемкости разработан алгоритм управления канатоукладочным устройством*

Для ведения тралового лова рыбодобывающие суда оборудованы промысловыми лебедками (такими как траловые, ваерные, кабельно-вытяжные, промыслово-грузовые). Траловые лебедки являются одним из важнейших средств механизации орудий промышленного рыболовства.

Достижение той или иной глубины траления обеспечивается, как правило, соответствующей длиной вытравленного буксирного каната. Длина уложенного на барабан каната в большинстве случаев определяется размерами барабана лебедки, а так же качеством укладки. Промысловые суда имеют уже определенные размеры барабанов, а качество укладки, в свою очередь, зависит от многих факторов и определяется коэффициентом плотности укладки каната [1].

Под коэффициентом плотности укладки каната на барабане понимают отношение объема каната к объему тела намотки на барабане. Коэффициент плотности укладки каната должен стремиться к 1, но в реальных условиях эксплуатации он колеблется в диапазоне 0,6 – 0,8, что уменьшает канатоемкость барабана, тем самым снижая эффективность промысловой операции. Среднее значение коэффициента плотности укладки каната на ваерном барабане траловой лебедки при применении ручного ваероукладчика равно 0,66, т. е. только 66% от навивного объема ваерного барабана используется полезно. В случае применения механических канатоукладчиков коэффициент плотности укладки колеблется в зависимости от схемы укладки, размеров барабана и каната в пределах 0,7-0,85 [2].

Как показывает опыт, на качество укладки влияет множество различных внешних факторов. Несовершенство конструкций канатоукладочных систем, их привода и управления приводит к неправильной укладке каната на барабан, захлестам, и, как



следствие, износу каната и недоиспользованию емкости навивного барабана. Из практики также известны случаи, когда неправильная укладка приводила к аварийным ситуациям - обрыву каната.

Основными факторами, которые оказывают наибольшее влияние на работоспособность траловых лебедок, являются тяговое усилие на барабане и скорость выборки каната.

С целью определения степени влияния вышеперечисленных параметров на качество укладки каната на барабан, нами была выполнена серия экспериментальных работ.

Для проведения исследований по оценке влияния скорости выборки каната и тягового усилия на качество укладки каната на барабан, нами была разработана методика и подготовлена экспериментальная установка, базой которой является траловая лебедка для судов типа МСТБ - 150. Экспериментальная установка оснащается поворотным устройством и силоизмерительным комплексом. Поворотное устройство служит для перемотки ваера с барабана на барабан и имеет рычажно – кулисный механизм, позволяющий устанавливать силоизмерительный датчик. Силоизмерительный комплекс обеспечивает регулирование соответствующего тягового усилия. Скорость выборки регулируется контроллером с помощью прибора ИДМ-2.

Исходя из данных, полученных при проведении исследований, можно сделать выводы, что технические параметры лебедки оказывают влияние на качество укладки, однако реализовать их на практике не всегда представляется возможным. Это связано с тем, что значительно увеличить скорость укладки невозможно, т.к. с увеличением скорости увеличивается сопротивление орудия лова, тем самым используется тяга лебедки, что влечет за собой вытягивание ваера, изменение его диаметра и нарушение укладки. Отсюда следует вывод, что одним из решающих факторов, влияющих на качество укладки, является сопоставление скорости вращения барабана и скорости вращения винта ваероукладчика с учетом изменяющегося диаметра, поэтому необходимо рассмотреть более совершенное устройство, позволяющее изменять соотношение скорости вращения барабана и скорости вращения винта ваероукладчика.

Опыт показывает, что в процессе выборки каната на навивной барабан, необходима плавная регулировка скорости каретки ваероукладчика и как следствие передаточного отношения. В связи с этим, нами было разработано устройство, которое позволяет в процессе выборки изменять передаточное отношение в соответствии с качеством укладки. Учитывая ситуацию, что основной вал и винт ваероукладчика разнесены на довольно приличное расстояние, применяем ременный вариатор.

На рис. 1 приведена кинематическая схема ваероукладчика с ременным вариатором, где 1 – навивной барабан, 2 – звездочка на основном валу, 3 – цепная передача, 4,5 – управляемый шкив, состоящий из двух половин, 6 – клиноременная передача, 7 – пружина, 8 – ведомый шкив, 9 – канатоукладчик навивного барабана. Основные достоинства ременных вариаторов: широкий диапазон изменения частоты вращения; компактность конструкции; большая нагрузочная способность; относительно невысокие требования к точности изготовления.

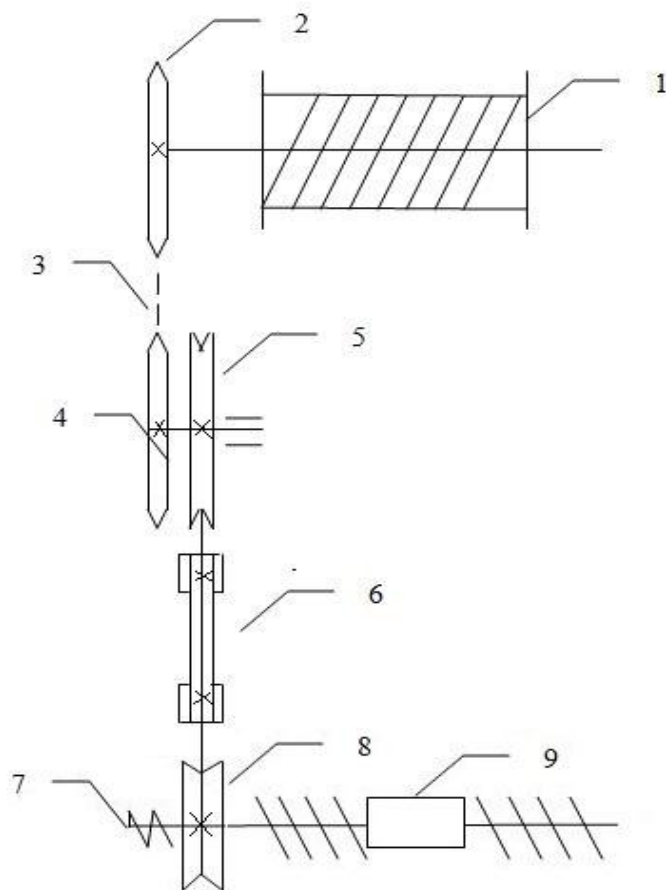


Рис. 1. Кинематическая схема ваероукладчика с вариатором

Принцип действия этого устройства основан на изменении передаточного отношения шкивов ременного привода. Вращение приводного шкива ведется от вала траловой лебедки. Изменяя радиус огибания ремнём управляемого шкива, можно плавно менять передаточное отношение. Для управления вариатором гидравлическое устройство, состоящее из гидравлического насоса (домкрата), маслопровода, штуцеров и других вспомогательных устройств. Непременное требование к промышленным машинам – плавное изменение скорости тяги орудия лова. Гидравлическое управление позволяет осуществить бесступенчатое регулирование скорости вращения рабочего органа механизма в широком диапазоне. Рабочим телом гидравлики являются различные минеральные масла. Для изменения скорости каретки ваероукладчика с помощью гидравлического насоса подается жидкость на вариатор, тем самым происходит прижимание двух частей управляемого шкива, что позволяет повысить передаточное отношение.

На основании ранее выполненных исследований было установлено, что на качество укладки каната влияет такой фактор, как скорость движения каретки ваероукладчика. В связи с этим рассматривается влияние 3 факторов: скорость движения каретки ваероукладчика, скорость выборки троса и тяговое усилие на качество укладки каната на барабан.

Для снижения количества экспериментов и получения зависимости мы воспользовались методом планирования эксперимента. Была составлена матрица трехфакторного эксперимента на двух уровнях, определены диапазоны изменения факторов: скорость движения каретки ваероукладчика (1,2 – 1,6 м/мин), скорость выборки троса (0,8 – 1,2 м/мин), тяговое усилие (2000 – 10000 Н).

После расчета коэффициентов регрессии была получена зависимость  $\Psi = 0.89 + 0.015x_1 + 0.01x_2 - 0.013x_3$ , где  $x_1$  – безразмерная величина скорости движения каретки ваероукладчика,  $x_2$  – безразмерная величина скорости выборки каната,  $x_3$  – безразмерная величина тягового усилия.

Анализ полученной зависимости позволил определить приоритет влияния каждого фактора на коэффициент плотности укладки:

- 1) скорость перемещения каретки ваероукладчика;
- 2) скорость выборки троса;
- 3) тяговое усилие на барабане.

Таким образом, наибольшее влияние на коэффициент плотности укладки оказывает скорость перемещения каретки ваероукладчика.

На основе выполненных работ поставлена задача дальнейшего повышения качества укладки, за счет применения автоматизированной системы управления качеством укладки и разработан алгоритм управления укладочным устройством траловой лебедки (Рис. 2).



Рис. 2. Алгоритм управления укладочным устройством траловой лебедки

Считывающее устройство снимает показание диаметра каната и отправляет показание на управляющее устройство, которое реагирует на уменьшение коэффициента плотности укладки и подбирает необходимое передаточное отношение для повышения коэффициента плотности укладки. С управляющего устройства подается сигнал на вариатор, который изменяя передаточное отношение, изменяет скорость каретки ваероукладчика.

Предложенное устройство позволяет в реальном времени отслеживать и поддерживать на должном уровне коэффициент плотности укладки каната на навивной барабан, что приводит к максимальному использованию полезной вместимости навивного барабана.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карпенко В.П. Механизация и автоматизация процессов промышленного рыболовства. М.: Агропромиздат, 1990. 464 с.

2. Промысловые схемы и механизмы : метод. указ. по вып. лаб. раб. для студ. оч. и заоч. форм обуч. напр. 111000.62 / А. В. Суконнов, А. В. Гусев. Калининград: Изд-во КГТУ, 2008. - 43 с.

### **EXPERIMENTAL ESTIMATION OF THE INFLUENCE OF THE PARAMETERS OF CASING PLANTS ON THE CAPACITY OF NAVIGATIONAL DRUMINGS**

Balchitis Kirill Vatsisovich, postgraduate  
Sukonnov Anatoly Vladimirovich, Candidate of Engineering Sciences,  
Associate Professor

Kalininsrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,  
e-mail: balchitis039@gmail.com; anatoly.sukonnov@klgtu.ru

*Incorrect laying of the rope on the drum of the trawl winch leads to a reduction in the rope capacity of the drum, overruns, wear of the rope, and also to emergency situations. Experimental studies were carried out to assess the effect of factors of real operating conditions on the quality of rope laying, and a dependence was obtained to determine the degree of influence of the factors studied. To improve the quality of rope laying and to provide the maximum rope capacity, a control algorithm has been developed for the rope-laying device.*

УДК 639.2.05

### **ПАСПОРТИЗАЦИЯ ОРУДИЙ РЫБОЛОВСТВА**

Долин Геннадий Макарович, канд.техн. наук, доцент

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,  
Калининград, Россия, e-mail: dolin@klgtu.ru

*Проблема технической паспортизации орудий рыболовства связана с трудностями научного, экономического и управленческого характера. Все эти трудности вполне преодолимы. Паспортизация орудий рыболовства необходима для совершенствования их конструкции и повышения эффективности промысла*

Проблемой технической паспортизации орудий рыболовства и в частности тралов, автор интересовался еще более сорока лет тому назад и периодически возвращался к этой теме [1, 2, 3]. Рыболовный трал это дорогое и сложное инженерное сооружение, которое в процессе эксплуатации меняет свои важнейшие характеристики, так как изготовлено из гибких материалов: сетного полотна, нитей, канатов. Правильное знание промысловых технических характеристик трала и законов их изменения позволяет повышать эффективность его эксплуатации. Различные авторы предлагали разные переч-

ни эксплуатационно-технических характеристик трала, которые необходимо учитывать при его эксплуатации. Не вдаваясь в подробности, отметим, что реальное количество характеристик велико. Поэтому исследование этих характеристик в зависимости от ряда влияющих факторов на натурном трале слишком дорогое занятие. Испытывать необходимо если не каждый трал, то хотя бы один трал каждого проекта. Методов, позволяющих достаточно точно аналитически определить эти характеристики и их зависимости от влияющих факторов, не существует. Автором была предложена методика проведения паспортизации тралов с применением методов планирования экспериментов. Эта методика позволяет произвольно выбирать некоторое количество параметров трала и исследовать зависимость этих параметров от выбранных влияющих факторов, изменяющих свои значения в заданной области. В результате исследования может быть получена математическая модель в виде уравнения регрессии, позволяющая определять параметры трала в зависимости от значений влияющих факторов.

Предлагалось, например, определять такие параметры как:

- R – агрегатное сопротивление трала,
- H – вертикальное раскрытие трала,
- $L_T$  – расстояние между досками,
- H – горизонт хода трала.

В качестве влияющих факторов предлагались следующие характеристики:

- $V_{TR}$  – скорость траления,
- $Q_B$  – оснастка верхней подборы,
- $Q_H$  – оснастка нижней подборы,
- $G_{ГУ}$  – масса грузов углубителей,
- $L_B$  – длина ваеров,
- $L_K$  – длина кабелей с голыми концами,
- $L_{ГК}$  – удлинение голых нижних концов.

Список параметров и факторов может быть изменен в зависимости от условий промысловой работы трала. Необходимые эксперименты могут быть проведены в первый день промысла в качестве настройки трала. Тем не менее, это требует некоторого отвлечения от промысла и проведения ряда кратких экспериментальных тралений с переменными факторами. Потеря промыслового времени, и расход топлива могут быть дорогими. Кроме того, необходим специалист по планированию экспериментов и обработке их результатов.

Некоторые предлагают проводить эксперименты на моделях тралов. Но для этого нужны экспериментальные полигоны и также специалисты. Результаты исследований будут не менее дорогими, и иметь сомнительную достоверность.

За сорок лет автор не увидел ни одного паспорта технических характеристик трала, подготовленного производителями тралов или производителями. Отчасти это объясняется тем, что современные тралы и траулеры имеют аппаратуру, позволяющую в реальном времени отслеживать ряд параметров трала. Но эти приборы не могут предсказывать заранее, какими будут характеристики при изменении влияющих факторов, например оснастки трала. Возможно, промысловики смирились с этим и при наличии опыта работы с данным тралом могут предугадать его параметры. Отсутствие паспортов тралов говорит о том, что без них можно обойтись.

Не будем обсуждать потери промысловиков из-за невозможности оптимизировать параметры тралов. Рассмотрим вопрос существования рыболовных тралов, имеющих стоимость в 10-20 и более миллионов рублей, без паспорта. Новый трал поступает на рыболовное судно с набором его чертежей, на которых могут быть отражены его строительные параметры и возможно с бумажной этикеткой, на которой указана модель трала, производитель и дата производства. Достаточно ли этих документов?

Рассмотрим требования ГОСТ 2.601-2013 «Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Эксплуатационные документы»[4]. Настоящий стандарт устанавливает виды, комплектность и общие требования к выполнению эксплуатационных документов.

Пункт 3.1.1. ГОСТа указывает, что эксплуатационный документ, это: конструкторский документ, который в отдельности или в совокупности с другими документами определяет правила эксплуатации изделия и/или отражает сведения, удостоверяющие гарантированные изготовителем значения основных параметров и характеристик (свойств) изделия, гарантии и сведения по его эксплуатации в течение установленного срока службы.

В соответствии с п.4.1 ГОСТа эксплуатационные документы предназначены: для эксплуатации изделий, ознакомления с их конструкцией, изучения правил эксплуатации (использования по назначению, технического обслуживания, текущего ремонта, хранения и транспортирования), отражения сведений, удостоверяющих гарантированные изготовителем значения основных параметров и характеристик (свойств) изделия, гарантий и сведений по его эксплуатации (длительность и условия работы, техническое обслуживание, ремонт и другие данные), а также сведений по его утилизации.

ГОСТ 2.601-2013 предусматривает различные виды эксплуатационных документов, но стоит рассмотреть только те, которые являются обязательными: формуляр, паспорт, этикетка и ведомость эксплуатационных документов.

Рассмотрим эти документы подробнее. Итак, формуляр это: документ составляют на изделия, в период эксплуатации которых необходимо вносить сведения о значениях основных параметров и характеристиках (свойствах) изделия, отражающих техническое состояние данного изделия и/или данные о процессе эксплуатации (длительности и условиях работы, данные о проведении технического обслуживания, ремонта и другие данные).

Паспорт составляют на изделия, для которых объем необходимых для эксплуатации данных и основных показателей незначителен и в период эксплуатации которого нет необходимости вносить сведения о значениях и/или подтверждении этих показателей.

Этикетку составляют на изделия, для которых данные, необходимые для эксплуатации, не превышают пяти-шести основных показателей, когда для подтверждения этих показателей нет необходимости составлять формуляр/паспорт и технически их невозможно и/или нецелесообразно маркировать на изделии.

Ведомость составляют при наличии комплекта из двух и более эксплуатационных документов. ГОСТ допускает создание одного объединенного эксплуатационного документа, который для удобства будем называть - паспорт.

Из текста ГОСТ 2.601-2013 следует, что паспортизацией должны заниматься производители технических устройств. А пользователи должны вести записи об изменениях, происходящих при эксплуатации изделия. На примере рыболовного трала это могут быть следующие данные: замена тралового мешка или какой-либо части трала, аварийная ситуация и последующий ремонт, и так далее.

Технический паспорт трала необходим не только для грамотной его эксплуатации, но и для целей статистики. Если у каждого трала есть паспорт, то ему можно присвоить инвентаризационный номер. Сейчас, если на судне имеется, например, три трала одного проекта, то в промысловом журнале производится запись о работе тралом такого-то проекта без указания его номера. Тралы одного проекта все-таки могут иметь различия в конструкции или в применении рыболовных материалов. Если у трала нет инвентарного номера, то неизвестно, сколько тралений проведено этим тралом, их продолжительность, сколько выловлено рыбы, какие были проведены ремонты, какова

аварийность трала и в каких его частях, какой срок эксплуатации данного трала. А ведь эта информация необходима для дальнейшего конструктивного совершенствования трала и повышения экономической эффективности его эксплуатации. В какой-то мере исправить эту ситуацию может простое решение об обязательной нумерации тралов и отражении этих номеров в промысловых журналах и отчетах.

Проблема паспортизации рассматривается на примере рыболовных тралов, но она актуальна для всех орудий рыболовства.

В феврале 2018 года в Риме был одобрен проект Добровольных руководств по маркировке орудий лова[5]. Это связано с проблемой по оставленным, утерянным или иным образом брошенным орудиям лова (ОУБОЛ), которая становится мировой проблемой загрязнения мирового океана. Предполагается, что маркировка орудий лова позволит снизить незаконные выбросы орудий лова, повысить ответственность рыбаков за правильную эксплуатацию орудий лова и их утилизацию.

Побочным эффектом является помощь маркировки орудий лова в борьбе с незаконным, несообщаемым и нерегулируемым рыбным промыслом (ННН-промыслом).

Маркировка представляет собой процесс нанесения на орудие лова в нескольких его частях меток-идентификаторов. Метка должна позволить однозначно определить орудие лова и его владельца. Как видим, здесь вполне уместным будет инвентарный номер орудий лова.

В правилах рыболовства Российской Федерации имеется пункт о том, что «при осуществлении добычи (вылова) водных биоресурсов применяются стандартные орудия добычи (вылова), изготовленные в соответствии с технической документацией. Применение иных орудий добычи (вылова) не допускается». Возникает вопрос о том, как определить, что орудие лова является стандартным и соответствует технической документации. Такой ответ может дать паспорт орудия лова, который является техническим документом и подтверждает постройку орудия лова по стандартному проекту.

С 2013 года Федеральное агентство по рыболовству развернуло работу по созданию новых кодов орудий рыболовства, созданию реестра орудий лова. Все рыбаки должны зарегистрировать свои орудия лова в новом реестре[6]. Регистрация в реестре и является подтверждением стандартности и соответствия техническим документам. Наличие паспорта опять не потребовалось. Это не позволяет определить ни количество орудий лова определенного проекта, ни их промысловые параметры. Это делает невозможным собирать статистику промысла и на ее основе совершенствовать конструкции орудий лова и повышать эффективность промысла.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Долин Г.М. Рекомендации по моделированию канатных тралов для их дальнейшей паспортизации. ВНИЦентр, отчет, №Б568415, 1976- 35 с.
2. Рязанова Т.В., Долин Г.М. Опыт технической паспортизации малого рыболовного трала. «Рыбпром», 2009, № 3. – С.62-63
3. ГОСТ 2.601-2013 «Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Эксплуатационные документы». // Электрон. дан. Режим доступа URL: [https://standartgost.ru/g/ГОСТ\\_2.601-](https://standartgost.ru/g/ГОСТ_2.601-) (дата обращения 12.06.2018)
4. Проект Добровольных руководств по маркировке орудий лова. // Электрон. дан. Режим доступа URL: <http://www.fao.org/fishery/nems/40998/es> - (дата обращения 12.06.2018)
5. Справочник орудий лова. // Электрон. дан. Режим доступа URL: <http://cfmc.ru/spravochniki/> - (дата обращения 12.06.2018)

## CERTIFICATION OF FISHING GEAR

Dolin Gennadii Makarovich, candidate of technical sciences, associate Professor

Kalininsrad State Technical University, Kaliningrad, Russia, e-mail: dolin@klgtu.ru

*The problem of technical certification of fishing gear is of a difficult scientific, economic and managerial nature. All of these difficulties is quite surmountable. Certification of fishing gear needed to improve their design and improve the efficiency of fishing.*

УДК 639.2.05

### ПРОБЛЕМЫ СЫРЬЕВОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ РЫБНОЙ ОТРАСЛИ

Долина Валентина Михайловна, канд. пед. наук  
Долин Геннадий Макарович, канд. техн. наук, доцент

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,  
Калининград, Россия, e-mail: valentina.dolina@klgtu.ru; dolin@klgtu.ru

*Рассматриваются проблемы экспортно-сырьевой направленности рыбной отрасли на современном этапе и возможные пути их решения. Важнейшая задача отрасли заключается в заполнении внутреннего рынка достаточным количеством качественной и доступной рыбопродукции. Анализ показывает, что подавляющее число проблем при вводе новых комплексов рыбопереработки связано не с техническими проблемами, а с организационными. И кадровая проблема здесь находится на первом месте*

Рыбная отрасль является составной частью агропромышленного комплекса России и имеет стратегическое значение в обеспечении продовольственной безопасности страны, заселённости её прибрежных территорий и их социально-экономического развития.

Непосредственный промысел водных биоресурсов рыбодобывающим флотом составляет основную часть производственного цикла рыбной отрасли. В стране год от года увеличивается рост добычи и в прошлом 2017 году улов рыбаков составил около 5 млн. тонн рыбы. Россия преодолела чрезвычайно тяжёлые кризисные годы и снова на передовых мировых позициях. Весомый вклад в общероссийскую добычу водных биоресурсов в морских водах традиционно вносит Дальневосточный рыбохозяйственный бассейн – 64,9 % или 3 111,8 тыс. тонн от общего улова[1].

Госпрограммой России на 2018 год установлен плановый показатель добычи водных биоресурсов в объеме 4540 тыс. тонн. Однако с учётом благоприятной промысловой обстановки в районах рыболовства в первом полугодии можно предположить, что объем добычи водных биологических ресурсов российскими рыбаками будет в текущем году значительно перевыполнен. Сырьевая база это вполне допускает. Так, в 2017 году общий допустимый улов водных биологических ресурсов освоен на 90,2% с резервом около 340 тыс. тонн. Рекомендованный объем водных биоресурсов, общий допустимый улов которых не устанавливается, в 2017 году составил 1698,2 тыс. тонн, а



вылов только 454,96 тыс. тонн (27%). Общий резерв сырьевой базы составляет около полутора миллионов тонн рыбы. Это может позволить дополнительно выпустить свыше миллиона тонн рыбопродукции. И это не считая возможностей расширения промысла таких перспективных объектов, как сардина-иваси и скумбрия на Дальнем Востоке.

В 2017 году объем производства рыбы и продуктов рыбных, переработанных и консервированных составил 4 152 тыс. тонн. На экспорт в 2017 году отправлено 2140 тыс. тонн рыбопродукции (более 50%), что позволило заработать 4402 млн. долларов. Таким образом, стоимость тонны экспортной продукции составила примерно две тысячи долларов. И это, включая крабов, икру, лосося. Импорт рыбопродукции достиг почти 600 тыс. тонн на общую сумму в 1905 млн. долларов. Стоимость тонны импортной продукции почти достигает 3200 долларов. В 2017 году экспорт увеличился на 12%, а импорт на 16% по сравнению с 2016 годом.

Эта статистика наглядно подтверждает экспортно-сырьевую направленность рыбной отрасли на современном этапе. Причём за рубеж вывозится рыба свежая или мороженая, со слабой степенью переработки и низкой величиной добавленной стоимости, то есть самое высококачественное сырьё по самым низким ценам, а в Россию ввозятся рыбопродукты с высокой добавленной стоимостью (часто из российского же сырья!). Результатом является упущенная выгода в размере 30-40 млрд. руб. в год. Прирост экспорта российской рыбной продукции, безусловно, свидетельствует о высоком спросе на дешёвую российскую рыбную продукцию на мировом рынке.

На Восточном экономическом форуме глава Росрыболовства Илья Шестаков отмечал, что если с тонны минтая российская отрасль получает \$1,1–1,2 тыс., то китайские компании, работая на российском же сырье, зарабатывают около \$1 тыс. Европейские и американские рыбодобывающие компании, ловя и перерабатывая рыбу в море, перешагнули показатель \$3 тыс. за тонну.

Такая сырьевая направленность российской рыбопромышленной экономики вызывает тревогу у отечественных рыбаков.

Выход на внешний рынок не решает проблем отрасли, так как, располагая значительными водными биологическими ресурсами, рыбная промышленность из-за отсутствия современного оборудования и новейших технологий не в состоянии выступать на мировом рынке в качестве равноправного партнера, ее экспортные возможности ограничиваются поставками сырья и мороженых полуфабрикатов по низким ценам. Опыт создания компаний со смешанным российско-иностраным капиталом показал, что иностранные фирмы не заинтересованы в передаче российской стороне передовых технологий и новой техники, они в первую очередь заинтересованы в приобретении сырья.

За последние годы в обрабатывающей отрасли сформировано новое производство по выработке филе и фарша, но и эта продукция реализуется пока в основном на зарубежных рынках.

Бесспорно, сегодня значение внешней торговли для экономики рыбной отрасли велико. В настоящее время рыбодобывающая отрасль является важнейшим источником дохода в местные и региональные бюджеты, условием выживания и будущего развития экономики многих прибрежных регионов. Рыбная продукция, например, только Дальнего Востока идет на экспорт более чем в 20 стран. Однако сохранение экспортной ситуации в будущем может лишь закрепить экономическое положение отрасли как поставщика первичного сырья из рыбы и морепродуктов для традиционных стран-импортеров: Японии, Республики Корея, стран ЕС, Норвегии и др. с развитой рыбообработывающей промышленностью.

Кроме того, экспортная торговля угнетает развитие регионов в экономическом плане, поскольку теряются отечественные производственные мощности (сокращается количество перерабатывающих судов, разрушаются береговые рыбообрабатывающие предприятия) увеличивается отток населения с уже экономически освоенных географических пространств. Всё это сопровождается недостаточно активным наращиванием производства в рыбном хозяйстве России и усугубляет сырьевую направленность отрасли.

Сложившаяся ситуация заставила руководство нашей страны взглянуть на проблемы отрасли под иным углом. На совещании, проведенном Д.А. Медведевым в Мурманске в апреле этого года, главной проблемой в стратегии развития рыбной отрасли была названа сырьевая модель экспорта[3]. Действительно, только глубокая переработка рыбы может стать основой создания собственной сильной перерабатывающей промышленности с высокой добавленной стоимостью. К 2025 году планируют построить около ста новых рыболовных судов с современным технологическим оборудованием.

К этому году по минтаю и сельди доля продукции с высокой добавленной стоимостью должна составить не менее 50 %, по атлантической треске и пикше доля филе и фарша должна достичь 80-90 % с текущих 40-50%.

Хорошие планы, но возникают вопросы. Если есть современное технологическое оборудование, то почему бы не поставить его на существующие суда? Одна из крупнейших в мире рыболовных компаний американская «Трайидент Сифуд» имеет флот со средним возрастом судов 38 лет. На их судах, добывающих минтай, стоит новейшее технологическое оборудование, а вылов превышает уровень, запланированный для новых траулеров. Конечно, новые суда нужно строить, но на первом месте – технологическое оборудование.

На мурманском совещании отмечено, что, к сожалению, наиболее современные высокопроизводительные и эффективные виды рыбоперерабатывающего и морозильного оборудования, как в судовом, так и в береговом исполнении сегодня закупаются за рубежом (это страны Скандинавии, ЕС, Япония, Китай, Корея), и степень локализации очень низка. Необходимо срочно организовать производство данного оборудования на территории Российской Федерации. Это касается и промыслового оборудования, как для новых траулеров, так и для развития маломерного флота.

Существует и ряд экономико-управленческих проблем развития российского рыболовства. Чем выше уровень переработки сырья, тем выше стоимость продукции. А она и так запредельна для внутреннего потребителя. Повышение стоимости барреля нефти будет способствовать поднятию стоимости рыбы, выловленной рыбаками. Доля топлива очень высока в себестоимости улова. В основном, новые суда будут строить для Дальнего Востока, а как потом рыба попадет на внутренний рынок? Или она пойдет на экспорт? А кто будет ловить рыбу для внутреннего рынка?

Правительство планирует ряд мероприятий для решения этих проблем. Это стимулирование прибрежного рыболовства на поставки продукции на внутренний рынок, снижение затрат на транспортировку продукции с Дальнего Востока. Возможно создание в отрасли такого элемента, как оптовое звено, трейдеры. Это позволит повысить устойчивость внутреннего рынка, обеспечить доступность сырья и продукции для российского весьма обширного рынка, на котором рыба должна продаваться в основном в формате B2B. Представляет интерес инициатива создания государственных рыбных магазинов. Указанные решения могут снизить чрезмерную разницу между ценой рыбы для рыбака и покупателя в магазине.

Проведенное исследование затрагивает только самые «болевые» точки развития отрасли. Задержка с решением переориентировки сырьевой направленности не способствует улучшению экономической ситуации в отрасли. В результате внутренний

рынок теряет ежегодно сотни тысяч тонн традиционного для россиян ценного белкового продукта питания и десятки миллиардов рублей недополученной прибыли.

И, конечно, немаловажно вести работу по стимулированию спроса на отечественную рыбную продукцию – как на внутреннем, так и на внешних рынках. Это системная работа, направленная на повышение качества и доступности продукции, в том числе за счет создания прозрачной и технологичной товаропроводящей цепи, и, конечно, информирование о пользе продукта потребителя.

Видимо, стоит напомнить, что дикая рыба имеет несопоставимо более высокую пищевую ценность по сравнению с рыбой выращенной в искусственных условиях. С улучшением качества жизни рыба становится отличной альтернативой мясу, а с ростом доходов предпочтения смещаются в сторону более дорогих видов морепродуктов.

Новый подход к организации рыбопромышленного производства ставит перед рыбохозяйственной наукой задачу разработки новых технологий переработки водных биоресурсов и объектов аквакультуры. Целью являются: повышение доли качественной пищевой продукции на отечественном продовольственном рынке; соблюдение международных правил торговли и требований национального законодательства; повышение конкурентоспособности отечественной рыбной продукции, обладающей высокими потребительскими свойствами; обеспечение рационального использования рыбного сырья.

Необходимо учитывать, что морской рыбный промысел последующая рыбообработка базируются на сложной производственной и технологической базе, нуждающейся в компетентных, хорошо подготовленных морских специалистах.

В настоящее время, когда российские рыбохозяйственные предприятия наращивают объемы, как добычи, так и переработки водных биоресурсов, возникает необходимость обеспечения постоянного притока квалифицированных кадров в отрасль, подготовленных в соответствии с международными и национальными требованиями, под контролем со стороны Росрыболовства. Проблема качественной переработки рыбы также напрямую связана с наличием хорошо подготовленных квалифицированных кадров. Сегодня эта проблема уже крайне обострилась.

Старые инженерные кадры уходят из отрасли, а пополнения новыми не происходит. Да и технологии на новых заводах заметно отличаются от привычных упрощенных. Между тем в скором времени под инвестиционные квоты начнут строиться новые предприятия глубокой переработки, и поэтому специалистов высокого технического уровня понадобится гораздо больше.

Проблема, вчера ещё казавшаяся призрачной, с каждым годом становится всё серьезнее. Она требует незамедлительных конкретных решений в сфере образовательных программ. Отход образовательной системы от подготовки инженерных технологических кадров для рыбной отрасли в пользу общей пищеперерабатывающей промышленности завтра уже отзовется крайне негативными явлениями дефицита кадров.

Тенденция прослеживается уже сегодня. Но совсем скоро, с началом реализации проектов современной рыбопереработки, кадровая проблема в отрасли проявится с новой силой.

Глобальная задача здесь заключается в том, чтобы максимально приблизить производство к конечному потребителю и сделать это с оптимизацией расходов для производителя.

Уровень российского рыбохозяйственного образования подтверждается итогами проверки эффективности деятельности вузов, ежегодно проводимой Минобрнауки России, начиная с 2012 года, по результатам которого все вузы Росрыболовства ежегодно признаются эффективными, а также результатами проверок, проведенных Минтранс

России, подтвердивших соответствие образовательных организаций Росрыболовства международным требованиям в области подготовки членов экипажей морских судов.

Внешне действительно всё выглядит достаточно благополучно. Но внутренние процессы указывают на отрыв теоретической подготовки наших бакалавров и магистрантов от решения отраслевых задач.

Как показывает сегодняшний опыт, подавляющее число проблем при вводе новых рыбоперерабатывающих комплексов в эксплуатацию, основанных на углублённой переработке рыбного сырья, связано не с техническими проблемами, а с организационными. И кадровая проблема здесь находится на первом месте.

Единственный путь решения затронутых нами проблем – подготовка квалифицированных кадров для отрасли. Современные технологии и современные кадры – это звенья одной цепи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Итоги деятельности федерального агентства по рыболовству в 2017 году и задачи на 2018 год. //Электрон. дан. Режим доступа URL: [fishcom.ru/files/ documents/ ob\\_agentstve/kollegiya/itogi\\_2017\\_zadachi\\_2018.pdf](http://fishcom.ru/files/documents/ob_agentstve/kollegiya/itogi_2017_zadachi_2018.pdf) (дата обращения 04.07.2018)

2. О развитии рыбоперерабатывающей промышленности. Совещание в Мурманской области (20.04.2018) //Электрон. дан. Режим доступа URL: <http://government.ru/news/32356/> (дата обращения 04.07.2018)

## **PROBLEMS OF COMMODITY ORIENTATION IN FISHING INDUSTRY**

Dolina Valentina Mikhailovna, candidate of pedagogical sciences, associate Professor  
Dolin Gennadii Makarovich, candidate of technical sciences, associate Professor

Kalininsrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,  
e-mail: [valentina.dolina@klgtu.ru](mailto:valentina.dolina@klgtu.ru); e-mail: [dolin@klgtu.ru](mailto:dolin@klgtu.ru)

*This article discusses the problem of raw material and export orientation of the fishing industry at the current stage and possible ways of their solution. The most important task of the branch is to populate the internal market with a sufficient number of high-quality and affordable fish products. The analysis shows that the overwhelming number of problems when entering new complex-owls, fish processing is not technical and institutional problems. And staffing problem here is in the first place.*

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЫБОЛОВНЫХ НИТЕЙ ОТ ИХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Львова Екатерина Евгеньевна, аспирант

Суконнов Анатолий Владимирович, канд. техн. наук, доцент

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,  
Калининград, Россия, e-mail: ekaterina.lvova@klgtu.ru

*Прочность орудия лова в большей степени зависит от прочностных характеристик его составляющих – ниток, веревок, канатов и т.д. В свою очередь определены разрывного усилия составляющих в промысловых условиях практически невозможно из-за отсутствия надлежащего оборудования. Выполненная серия экспериментальных исследований позволила получить математическую зависимость разрывного усилия от диаметра для полиамидных ниток в диапазоне от 0,6 мм до 3,0 мм*

Как известно, долговечность и работоспособность орудия лова зависит в большей степени от правильного подбора рыболовных материалов. Для любого вида рыболовных материалов одной из главных характеристик определяющей их эксплуатационные качества является разрывная прочность [1].

Определение разрывной прочности возможно с помощью справочной литературы, либо посредством разрывного оборудования. Одним из основополагающих геометрических параметров, характеризующим прочность и работоспособность орудий рыболовства является диаметр рыболовных материалов, из которых оно изготовлено. В свою очередь установлено, что с увеличением диаметра нитевидных рыболовных изделий возрастает их прочность и износостойкость к различным внешним воздействиям (механическим, химическим и т.д.) [2]

Зачастую на практике на имеющийся ассортимент рыболовных материалов отсутствует нормативно-техническая документация, а наличие разрывного оборудования вообще проблематично, что не позволяет иметь данные о таком физико-механическом показателе, как разрывное усилие. Данное обстоятельство не позволяет решать вопросы оценки работоспособности и долговечности орудий рыболовства. Для решения этого вопроса перед нами была поставлена задача: экспериментальным путем установить математическую зависимость величины разрывного усилия нитевидных материалов от их диаметра.

Объектом экспериментальных исследований нами выбраны рыболовные полиамидные крученые нитки из комплексных нитей в диапазоне диаметров от 0,6 мм до 3,0 мм. Полиамидные крученые нитки наиболее широко применяются для постройки и ремонта орудий лова, и к тому же отечественные сетевязальные фабрики выпускают большой ассортимент крученых полиамидных ниток.

Отбор и подготовка рыболовных ниток проводилась по стандартной методике [3].

В первую очередь были определены фактические диаметры образцов, которые определялись с помощью измерительного микроскопа с ценой деления 0,1 мм. Все измерения проводились по 10 раз.

Коэффициенты вариации по диаметру, рассчитанные для каждого диаметра ниток, подтвердили, что отобранные образцы укладываются в требования технических условий по этому параметру, следовательно, эти образцы являются стандартными.

Достоверность полученных данных в серии измерений, подтверждается расчетом относительной погрешности, которая составляет менее 1,5 %.

Для проведения испытаний по определению разрывной нагрузки применялись имеющиеся в лаборатории рычажные и прессовые машины, обеспечивающие интервал измерения от 0 до 500 кг. В лаборатории машины такого типа представлены следующими моделями разрывных машин: ИР-5061 и Р-0,5. Однако, для проведения исследований это оборудование прошло соответствующую модернизацию, включающую в себя эскизную проработку и изготовление крепёжных элементов в виде улиток, с соблюдением условия – диаметр улитки больше в 10 раз максимального диаметра образца.

Величины разрывной нагрузки и удлинения для ниток для одного и того же диаметра (0,6 мм; 1,0 мм; 2,2 мм) определялись при разных скоростях опускания нижнего зажима ( $\max = 100$  мм/мин,  $\min = 50$  мм/мин), при этом было установлено, что значение разрывной нагрузки при таком диапазоне скоростей не зависит от скорости разрыва, что объясняется небольшими значениями фактической разрывной нагрузки и скорости движения нижнего зажима. Поэтому последующие испытания ниток проводились уже на постоянной максимальной скорости, что позволило сократить время испытаний.

С целью оценки неравномерности значений величины разрывной нагрузки, нами был проведен расчет коэффициент вариации по разрывному усилию ( $C$ ). Коэффициенты имеют значительный разброс, но при этом они удовлетворяют требованиям к этому показателю нормативно-технической документации (по ТУ на нитки крученые полиамидные коэффициент вариации по разрывной нагрузке должен быть не более 6 %), т.е. наши изделия являются стандартными.

Также с целью подтверждения достоверности полученных данных в серии экспериментов, был проведен расчет относительной погрешности измерения разрывной нагрузки, которая не превышает 3%. Полученные экспериментальные данные и оценка точности измерений приведены в таблице 1

Таблица 1

**Расчетные данные для полиамидных ниток в сухом виде**

$d$ , мм	Среднее значение разрывной нагрузки $\bar{R}$ , Н	Среднее квадратичное отклонение, $\delta$ , Н	Коэффициент вариации по разрывной нагрузке $C$ , %	Относительное разрывное удлинение $\varepsilon_p$ , %	Относительная погрешность измерения, $\varepsilon_R$ , %
0,6	65,6	1,93	2,940	25,80	2,10
1,0	202,8	9,14	4,500	34,65	3,22
2,2	818,0	10,04	1,300	40,85	0,87
2,5	927,0	9,13	0,985	49,58	0,70
3,0	1269,0	20,04	1,580	57,67	1,13

Из таблицы видно, что с увеличением диаметра в 5 раз, разрывная нагрузка увеличивается примерно в 20 раз, также с увеличением диаметра увеличивается относительное разрывное удлинение.

Аналогичные экспериментальные исследования также проводились для полиамидных ниток в мокром виде, что соответствует режиму работы орудий лова. Испытания проводились в том же порядке и по тем же требованиям, что и испытания ниток в сухом виде. В процессе испытаний было подтверждено стабильное расхождение показателей разрывной прочности в сухом и мокром виде в сторону уменьшения, поэтому в мокром виде было исследовано только три вида образцов (нитка  $d = 0,6$  мм,  $d = 1,0$  мм,  $d = 2,2$  мм). Полученные данные сведены в таблице 2.

Таблица 2

**Расчетные данные для полиамидных ниток в мокром виде**

$d$ , мм	Среднее значение разрывной нагрузки $\bar{R}_m$ , Н	Среднее квадратичное отклонение, $\delta_m$ , Н	Коэффициент вариации по разрывной нагрузке $C_m$ , %	Относительное разрывное удлинение $\varepsilon_{pm}$ , %	Относительная погрешность измерения, $\varepsilon_R$ , %
0,6	64,3	2,81	4,37	27,9	3,13
1,0	185,2	6,55	3,53	34,35	2,53
2,2	756,0	13,4	1,77	44,57	1,27

Было установлено, что прочность мокрых ниток по сравнению с сухими ниже на 6%.

Более наглядное сравнение разрывных нагрузок полиамидной нитки в сухом и в мокром состоянии представлено на Рис. 1

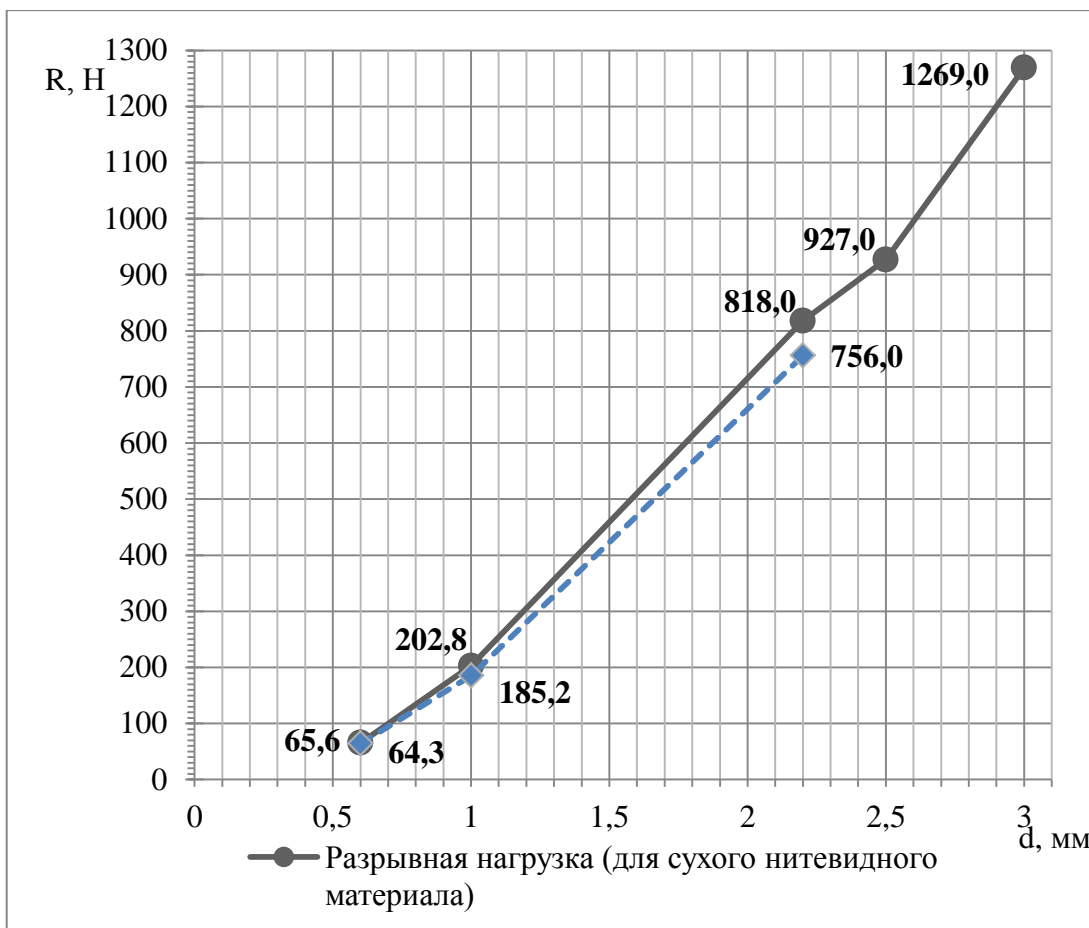


Рис. 1. Графики зависимости разрывной нагрузки от диаметра нитевидных материалов в сухом и мокром виде (полиамид)

Далее с целью получения математической зависимости была проведена аппроксимация полученных экспериментальных данных. Аппроксимация проводилась следующими методами:

- «методом наименьших квадратов».
- «полиномом третьей степени».
- и сглаживанием с использованием функции linfit (аппроксимация набором кривых, заданных вектором  $f$ ).

Отклонения экспериментальных данных от величин, полученных с помощью аппроксимирующих зависимостей, приведены в таблице 3.



**Отклонение экспериментальных данных от расчетных  
(полиамидные нитки в сухом виде)**

№ зависимости	метод аппроксимации	Отклонение, $\Delta_{гр}, \%$	Зависимость, Н
1.	метод наименьших квадратов	$\frac{R - R_x}{R_x} = \begin{pmatrix} 11.13 \\ -11.67 \\ -0.88 \\ -4.84 \\ 3.82 \end{pmatrix} \%$	$R = 496,4 * d - 266,8$
2.	полином третьей степени	$\frac{R - R_{x1}}{R_{x1}} = \begin{pmatrix} 7.594 \\ -4.422 \\ 3.718 \\ -3.297 \\ 0.558 \end{pmatrix} \%$	$R = -122.9 + 261.3 * d + 77.3 * d^2 - 3.5 * d^3$
3.	Функция linfit	$\frac{R - R_{x2}}{R_{x2}} = \begin{pmatrix} 0.149 \\ -0.45 \\ 3.873 \\ -4.947 \\ 1.484 \end{pmatrix} \%$	$R = 3536 - 9472 * \frac{1}{d} + 8698 * \frac{1}{d^2} - 2559 * \frac{1}{d^3}$

Чтобы оценить точность расчета разрывной нагрузки по полученной зависимости, необходимо учитывать относительные погрешности при измерении диаметра и разрывной нагрузки. Ошибка в расчетной величине разрывной нагрузки рассчитывается по формуле:

$$\delta_{апр} = \sqrt{(\varepsilon_{dmax})^2 + (\varepsilon_{Rmax})^2 + (\delta_{грmax})^2},$$

где  $\varepsilon_{dmax}$  - максимальная относительная погрешность измерения диаметра, %,

$\varepsilon_{Rmax}$  - максимальная относительная погрешность измерения разрывной нагрузки, %,

$\delta_{грmax}$  - максимальное отклонение при аппроксимации, %

Ошибка расчета разрывной нагрузки для каждой полученной зависимости составила:

- 12,1% для зависимости №1;

- 8,3% для зависимости №2;

- 6,1% для зависимости №3.

Наиболее близкие значениям разрывной нагрузки к реальным рассчитываются по зависимости, полученной при аппроксимации «функцией linfit» (зависимость № 3), но описывающая ее формула громоздкая и пользоваться этой формулой будет достаточно сложно.

Для практического применения, мы рекомендуем использовать зависимость №1, которая дает менее высокую точность расчета (но в то же время достаточную для

определения ориентировочной прочности изделий), и при этом отличается простотой расчета. Для полиамидной нитки точность составляет примерно 88%.

$$R = 496,4 * d - 266,8 ,$$

где  $R$  – разрывное усилие, Н;

$d$  – диаметр нитевидного материала, мм;

496,4 – коэффициент с размерностью Н/мм;

266,8 – коэффициент с размерностью Н.

Подводя итог выполненной работы можно сделать следующие выводы:

- зависимость разрывного усилия от диаметра, для ниток носит возрастающий характер;
- полиамидная нитка в мокром виде теряет в прочности в среднем 6 % по сравнению с сухой полиамидной ниткой того же диаметра.
- установлена зависимость для полиамидных крученых ниток из комплексных нитей, которая позволяет при известном фактическом диаметре оценить с достаточно высокой точностью, разрывную прочность.

Следует отметить, что полученные нами зависимости распространяются на достаточно узкий ассортимент нитевидных материалов, а именно нитки крученые полиамидные.

В дальнейшем планируется провести такие исследования с более широким ассортиментом рыболовных нитевидных материалов, такие как веревки, канаты, шнуры из полиамидных и других видов волокон, что является актуальным в отсутствии надлежащего разрывного оборудования.

Считаем, что проведенные нами исследования полезны для качественного подбора рыболовных ниток при постройке и ремонте орудий рыболовства.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Войниканис-Мирский В.Н. Рыболовные материалы, сетные и такелажные работы. – М.: ВО «Агропромиздат», 1985. 325 с.
2. Перепелкин К.Е. Химические волокна: развитие производства, методы получения, свойства, перспективы.- Спб. :РИО СПГУТД, 2008. - 315 с.
3. ГОСТ 25552-82. Изделия крученые и плетеные. Методы испытания. - Введ. 01.01.84.- М.: Гос. Комитет СССР по стандартам. – 1984. – 52 с.

#### **EXPERIMENTAL EVALUATION OF STRENGTH CHARACTERISTICS OF FISHING YARNS FROM THEIR GEOMETRICAL PARAMETERS**

Lvova Ekaterina Evgenievna, Postgraduate Student

Sukonnov Anatoliy Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor

Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,

e-mail: ekaterina.lvova@klgtu.ru

*The strength of the fishing gear as a whole depends largely on the strength characteristics of its components – threads, ropes, ropes, etc. In turn, the definition of the breaking force of the components in the field conditions is almost impossible due to the lack of appropriate equipment. A series of experimental studies allowed us to obtain a mathematical de-*

pendence of the breaking strength of the diameter for nylon thread in the range from 0.6 mm to 3.0 mm. By using this dependence can be calculated by determining the breaking strength of nylon fishing thread with different diameters.

УДК 639.2.081.7

### АППРОКСИМАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПОГРУЖЕНИЯ И СМЕЩЕНИЯ СТЕНКИ МОДЕЛИ КОШЕЛЬКОВОГО НЕВОДА

Макаров Вячеслав Валерьевич, аспирант  
Недоступ Александр Алексеевич, доцент, канд. техн. наук

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,  
Калининград, Россия, e-mail: vyacheslav.makarov@klgtu.ru; nedostup@klgtu.ru

*Описаны результаты аппроксимации экспериментальных данных, проводимых в гидроканале ОАО «МариНПО». Аппроксимация выполнялась экспоненциальной функцией. Представлены примеры расчетов аппроксимации для значений относительной глубины погружения и относительного смещения невода*

Ранее были представлены результаты экспериментов с моделями кошелькового невода[1]. Эксперименты проводились в гидроканале ОАО «МариНПО», для экспериментов было построено 3 модели кошелькового невода с различной загрузкой нижней подборы: 0Т (0 кг), 1Т (0,248 кг), 1,5Т (0,338 кг). Экспериментальные заметы проводились без течения, а так же на течении при скорости потока – 0,2 м/с, 0,3 м/с, 0,4 м/с. В ходе экспериментов определялось время погружения, высота погружения и смещение по оси ОХ нижней подборы.

Таблица 1

#### Характеристики моделей кошелькового невода

Модель	$L_{жс}, м$	$H_{жс}, м$	$L_{онс}, м$	$H_{нс}, м$	$a, мм$	$d, мм$	$u_x$	$u_y$	$F_0$
1	10	2,1	7	1,5	10,0	1,16	0,7	0,714	0,210
2					6,0	0,4			0,133
3					10,0	0,95			0,190

Схема погружения стенки невода и силы влияющие при погружении:

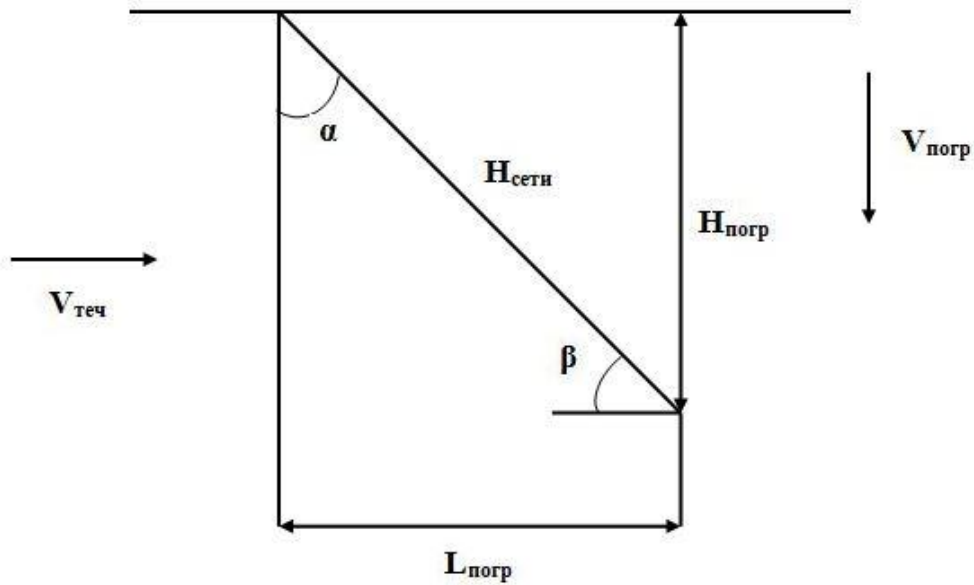


Рис. 1 Схема погружения стенки кошелькового невода

Где  $V_{\text{теч}}$  – скорость течения [м/с],  
 $V_{\text{погр}}$  – скорость погружения стенки кошелькового невода [м],  
 $H_{\text{погр}}$  – высота погружения стенки кошелькового невода [м],  
 $L_{\text{погр}}$  – длина смещения невода от точки замата [м],  
 $H_{\text{сети}}$  – длина перемещенной части невода [м],  
 $\alpha$  – угол между ОХ и перемещенной частью невода (рад),  
 $\beta$  – угол атаки невода, угол между стенкой невода при погружении и направлением течения (рад).

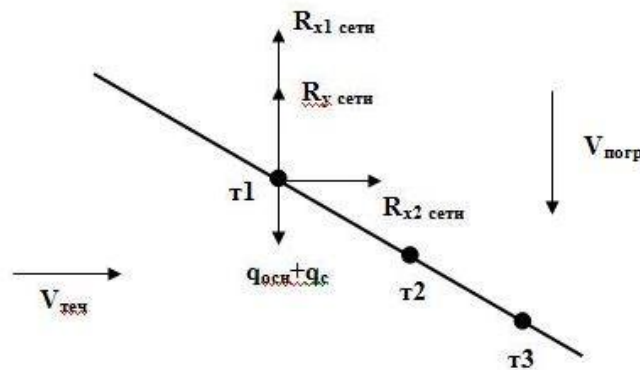


Рис. 2 Схема сил действующих на стенку невода при погружении

$\tau_1, \tau_2, \tau_3$  – точки погружения нижней подборы в каждый момент времени,  
 $R_{\text{сети}}$  – распорная сила сети [Н],  
 $R_{\text{хсети}}$  – сопротивление сети [Н],  
 $q_{\text{осн}}$  – вес оснастки нижней подборы [Н],  
 $q_{\text{с}}$  – вес сети в воде [Н].  
 По результатам опытов были рассчитаны безразмерные величины согласно рабочей теории [2]:  
 $\tau$  – относительное время погружения невода:

$$\tau = \frac{t_{\text{погр}}}{t_{\text{max}}}$$

где  $t_{\text{погр}}$  – время погружения невода каждую секунду,  
 $t_{\text{max}}$  – максимальное время погружения невода

$\lambda$  – относительная глубина погружения невода:

$$\lambda = \frac{H_{\text{погр}}}{H_{\text{сети}}}$$

$\omega$  – относительное смещение невода по оси ОХ:

$$\omega = \frac{L_{\text{погр}}}{H_{\text{сети}}}$$

Обработка проводилась с помощью компьютерной программы Mathcad.

Рассмотрим аппроксимирующую функцию для относительной глубины погружения и относительного смещения модели кошелькового невода.

Для примеров возьмем: 1 – модель 1 при загрузке 1Т и  $V_{\text{теч}} = 0,2$  м/с; 0,3 м/с; 0,4 м/с; 2 - модель 1 при загрузке 0Т; 1Т; 1,5Т и  $V_{\text{теч}} = 0,2$  м/с.

Расчитанные безразмерные величины для примера 1:

Модель 1								
$V_{\text{теч}} = 0,2$ м/с			$V_{\text{теч}} = 0,3$ м/с			$V_{\text{теч}} = 0,4$ м/с		
$\tau$	$\lambda$	$\omega$	$\tau$	$\lambda$	$\omega$	$\tau$	$\lambda$	$\omega$
0,25	0,938	0,347	0,25	0,755	0,656	0,25	0,367	0,93
0,5	0,87	0,493	0,5	0,663	0,748	0,5	0,347	0,938
0,75	0,848	0,53	0,75	0,595	0,804	0,75	0,35	0,937
1	0,861	0,509	1	0,677	0,736	1	0,427	0,904

Для аппроксимации была выбрана экспоненциальная функция вида:

$$\lambda = ae^{-b\tau} \text{ и } \omega = 1 - ae^{-b\tau}$$

Результаты расчета аппроксимации  $\lambda=f(\tau)$ :

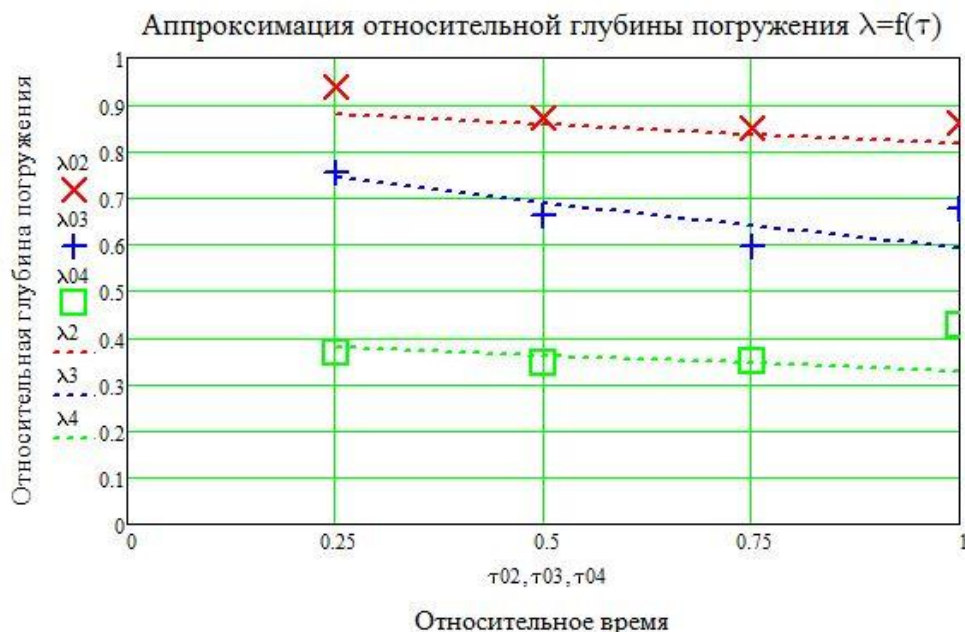


Рис.3. График аппроксимации  $\lambda=f(\tau)$  для модели 1 при загрузке 1Т и  $V_{\text{теч}} = 0,2$  м/с; 0,3 м/с; 0,4 м/с.

Аппроксимирующие формулы функции  $\lambda=f(\tau)$ :

Скорость течения 0.2м/с

$$\lambda_2 := \overrightarrow{(0.9e^{-0.1\tau02})} = \begin{pmatrix} 0.878 \\ 0.856 \\ 0.835 \\ 0.814 \end{pmatrix}$$

Скорость течения 0.3м/с

$$\lambda_3 := \overrightarrow{(0.8e^{-0.3\tau03})} = \begin{pmatrix} 0.742 \\ 0.689 \\ 0.639 \\ 0.593 \end{pmatrix}$$

Скорость течения 0.4м/с

$$\lambda_4 := \overrightarrow{(0.4e^{-0.2\tau04})} = \begin{pmatrix} 0.38 \\ 0.362 \\ 0.344 \\ 0.327 \end{pmatrix}$$

Результаты расчета аппроксимации  $\omega=f(\tau)$ :

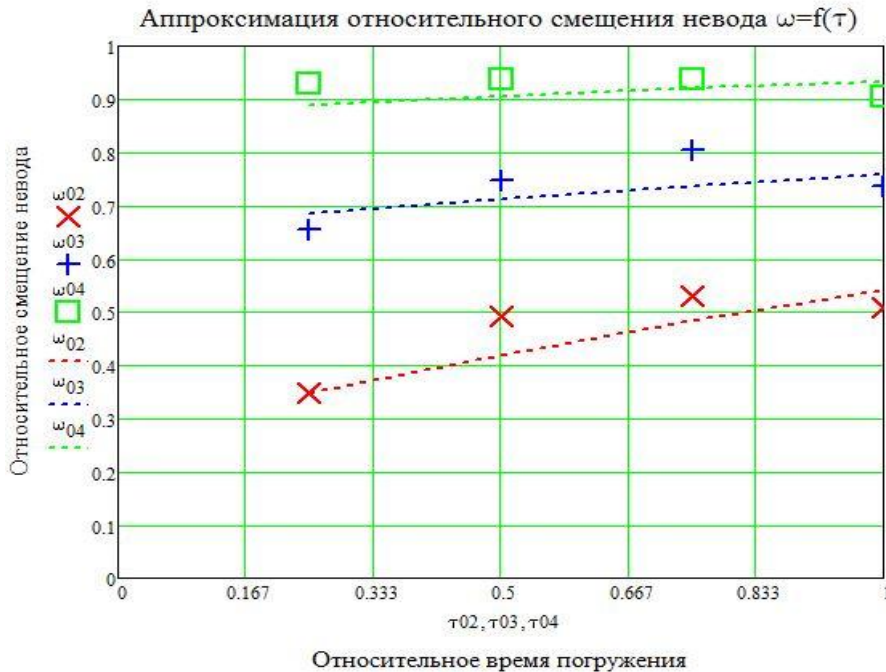


Рис.4. График аппроксимации  $\omega=f(\tau)$  для модели 1 при загрузке 1Т и  $V_{теч} = 0,2$  м/с; 0,3 м/с; 0,4 м/с.

Аппроксимирующие формулы функции  $\omega=f(\tau)$ :

Скорость течения 0.2м/с

$$\omega_{02} := \overrightarrow{[1 - (0.8e)^{-0.4-0.6\tau02}]} = \begin{pmatrix} 0.348 \\ 0.419 \\ 0.483 \\ 0.54 \end{pmatrix}$$

Скорость течения 0.3м/с

$$\omega_{03} := \overrightarrow{[1 - (1.2e)^{-0.9-0.3\tau03}]} = \begin{pmatrix} 0.684 \\ 0.711 \\ 0.736 \\ 0.758 \end{pmatrix}$$

Скорость течения 0.4м/с

$$\omega_{04} := \overrightarrow{[1 - (3.5e)^{-0.9-0.3\tau04}]} = \begin{pmatrix} 0.889 \\ 0.906 \\ 0.921 \\ 0.933 \end{pmatrix}$$

Расчитанные безразмерные величины для примера 2 модель 1 при  $V_{теч} = 0,2$ м/с и загрузке 0Т, 1Т, 1,5Т:

Модель 1, при $V_{теч} = 0,2$ м/с								
0T			1T			1,5T		
$\tau$	$\lambda$	$\omega$	$\tau$	$\lambda$	$\omega$	$\tau$	$\lambda$	$\omega$
0,167	0,707	0,707	0,25	0,938	0,347	0,25	0,832	0,555
0,333	0,707	0,707	0,5	0,87	0,493	0,5	0,828	0,561
0,5	0,651	0,759	0,75	0,848	0,53	0,75	0,851	0,525
0,667	0,577	0,817	1	0,861	0,509	1	0,857	0,516
0,833	0,596	0,803						
1	0,555	0,832						

Результаты расчета аппроксимации  $\lambda=f(\tau)$ :

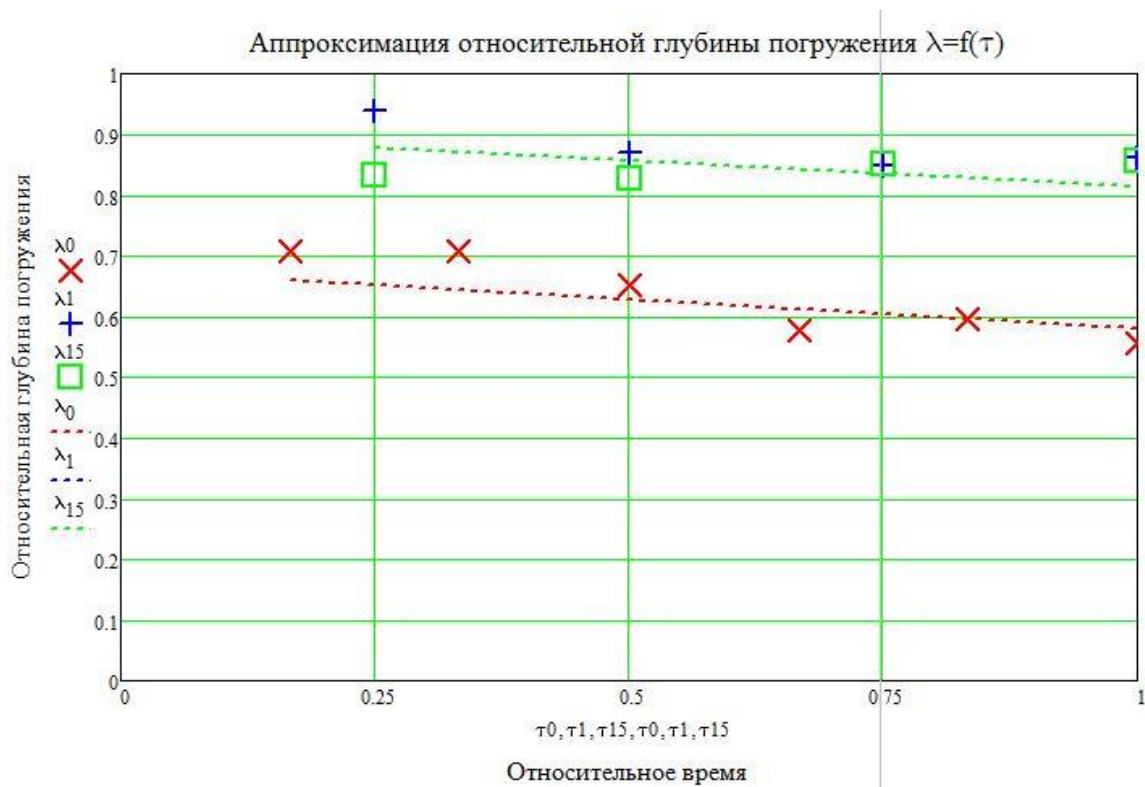


Рис.5. График аппроксимации  $\lambda=f(\tau)$  для модели 1 при  $V_{теч} = 0,2$  м/с и нагрузке 0T, 1T, 1,5T

Аппроксимирующие формулы функции  $\lambda=f(\tau)$ :

Загрузка 0T

$$\lambda_0 := (0,8)^{-0,5-0,2 \cdot \tau_0} = \begin{pmatrix} 0,661 \\ 0,644 \\ 0,627 \\ 0,611 \\ 0,596 \\ 0,581 \end{pmatrix}$$

Загрузка 1T

$$\lambda_{1T} := (0,9)^{-0,1 \cdot \tau_1} = \begin{pmatrix} 0,878 \\ 0,856 \\ 0,835 \\ 0,814 \end{pmatrix}$$

Загрузка 1.5T

$$\lambda_{1.5} := \overrightarrow{(0.9e^{-0.1\tau_{15}})} = \begin{pmatrix} 0.878 \\ 0.856 \\ 0.835 \\ 0.814 \end{pmatrix}$$

Результаты расчета аппроксимации  $\omega=f(\tau)$ :

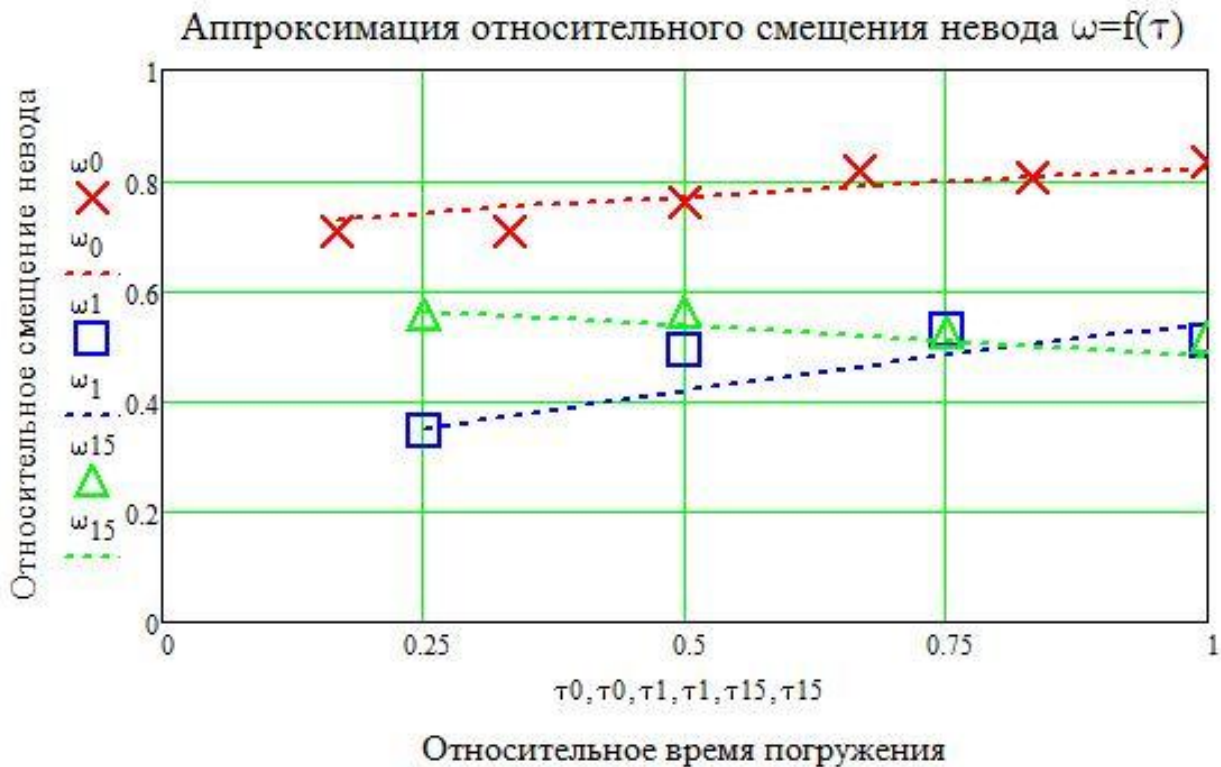


Рис. 6. График аппроксимации  $\omega=f(\tau)$  для модели 1 при  $V_{меч} = 0,2$  м/с и нагрузке 0T, 1T, 1,5T

Аппроксимирующие формулы функции  $\omega=f(\tau)$ :

Загрузка 0T

$$\omega_0 := \overrightarrow{[1 - (0.47e)^{-5-2 \cdot \tau_0}]} = \begin{pmatrix} 0.729 \\ 0.75 \\ 0.77 \\ 0.788 \\ 0.805 \\ 0.82 \end{pmatrix}$$

Загрузка 1T

$$\omega_1 := \overrightarrow{[1 - (0.8)^{-0.4-0.6\tau_1}]} = \begin{pmatrix} 0.348 \\ 0.419 \\ 0.483 \\ 0.54 \end{pmatrix}$$

Загрузка 1.5T

$$\omega_{1.5} := \overrightarrow{[1 - (1.1e)^{-0.8+0.2\tau_{15}}]} = \begin{pmatrix} 0.56 \\ 0.535 \\ 0.509 \\ 0.482 \end{pmatrix}$$



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Недоступ А.А., Экспериментальные исследования процесса погружения нижней подборы моделей кошелькового невода в гидроканале ОАО «МариНПО» / А.А. Недоступ, В.В. Макаров // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер.: Рыбное хозяйство. 2015. №3. С. 78-85

2. Недоступ, А. А. Постановка задачи вывода безразмерных зависимостей процесса погружения сетной стенки кошелькового невода / А. А. Недоступ, В. В. Макаров // Известия Калининградского государственного технического университета. – 2015. – № 39. – С. 55-62

### **APPROXIMATION OF EXPERIMENTAL DATA OF IMMERSION AND OFFSET OF THE WALL OF THE WALLNESS PURSE SEINE MODEL**

Makarov Vyacheslav Valeryevich, graduate student  
Nedostup Aleksandr Alekseevich, associate professor, PhD in Technical Sciences

Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,  
e-mail: vyacheslav.makarov@klgtu.ru; nedostup@klgtu.ru

This article describes the results of approximation of experimental data conducted in the hydro-channel of ОАО "MariNPO". Approximation was performed by an exponential function. Also in the article are examples of approximation calculations for the values of the relative depth of immersion and the relative displacement of the seine.

УДК 639.2.081.7

### **АППРОКСИМАЦИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ СКОРОСТИ СМЕЩЕНИЯ СТЕНКИ МОДЕЛИ КОШЕЛЬКОВОГО НЕВОДА**

Макаров Вячеслав Валерьевич, аспирант  
Недоступ Александр Алексеевич, доцент, канд. техн. наук

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,  
Калининград, Россия, e-mail: vyacheslav.makarov@klgtu.ru; nedostup@klgtu.ru

*Описаны результаты аппроксимации экспериментальных данных, проводимых в гидроканале ОАО «МариНПО». Аппроксимация выполнялась полиномиальной функцией 3 степени. Представлены примеры расчетов аппроксимации для значений относительной скорости смещения невода*

Ранее были представлены результаты экспериментов с моделями кошелькового невода.[1] Эксперименты проводились в гидроканале ОАО «МариНПО», для экспериментов было построено 3 модели кошелькового невода с различной загрузкой нижней подборы: 0Т (0 кг), 1Т (0,248 кг), 1,5Т (0,338 кг). Экспериментальные заметы проводились без течения, а так же на течении при скорости потока – 0,2 м/с, 0,3 м/с, 0,4 м/с.

В ходе экспериментов определялось время погружения, высота погружения и смещение по оси ОХ нижней подборы.

Таблица 1

Характеристики моделей кошелькового невода

Модель	$L_{экс}$ , м	$H_{экс}$ , м	$L_{виз}$ , м	$H_{пз}$ , м	$a$ , мм	$d$ , мм	$u_x$	$u_y$	$F_0$
1	10	2,1	7	1,5	10,0	1,16	0,7	0,714	0,210
2					6,0	0,4			0,133
3					10,0	0,95			0,190

Схема погружения стенки невода и силы влияющие при погружении:

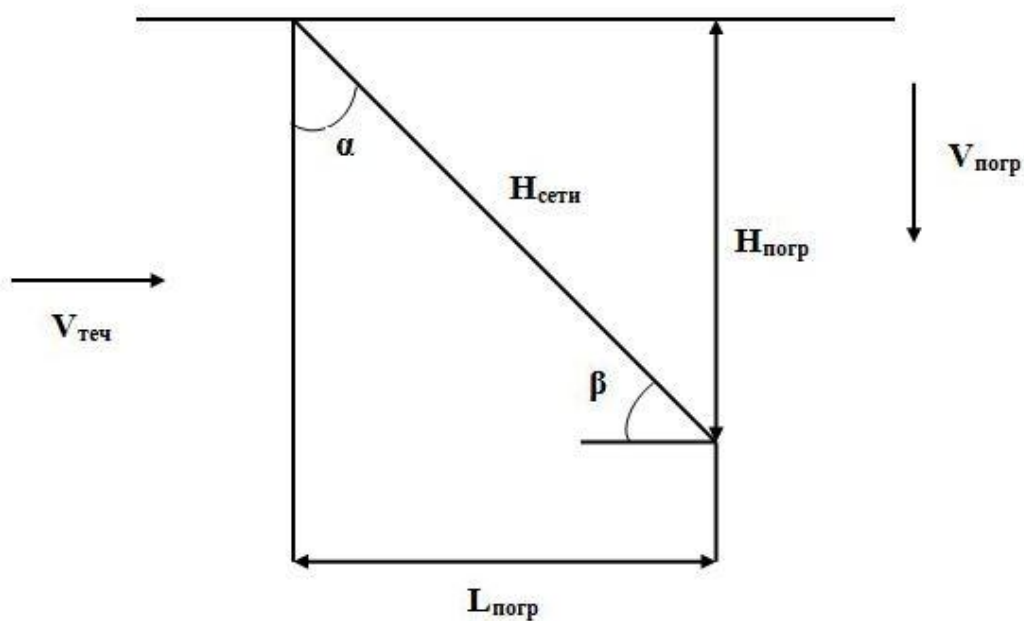


Рис. 1 Схема погружения стенки кошелькового невода

Где  $V_{теч}$  – скорость течения [м/с],  
 $V_{погр}$  – скорость погружения стенки кошелькового невода [м],  
 $H_{погр}$  – высота погружения стенки кошелькового невода [м],  
 $L_{погр}$  – длина смещения невода от точки замата [м],  
 $H_{сети}$  – длина перемещенной части невода [м],  
 $\alpha$  – угол между ОХ и перемещенной частью невода (рад),  
 $\beta$  – угол атаки невода, угол между стенкой невода при погружении и направлением течения (рад).

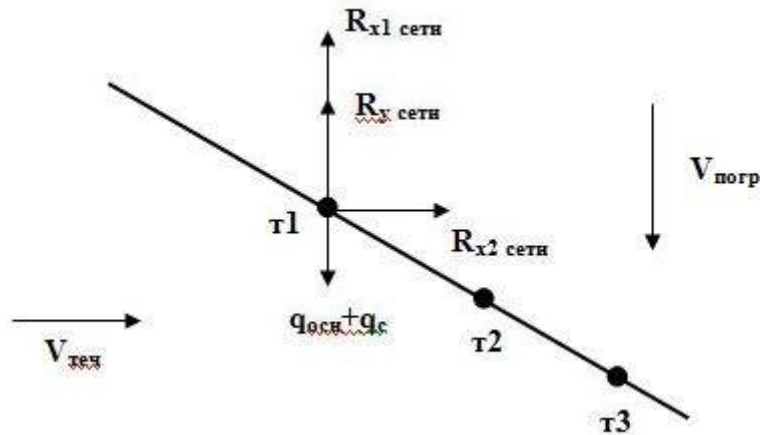


Рис. 2 Схема сил действующих на стенку невода при погружении

$\tau_1, \tau_2, \tau_3$  – точки погружения нижней подборы в каждый момент времени,  
 $R_{усети}$  – распорная сила сети [Н],  
 $R_{хсети}$  – сопротивление сети [Н],  
 $q_{осн}$  – вес оснастки нижней подборы [Н],  
 $q_c$  – вес сети в воде [Н].

По результатам опытов были рассчитаны безразмерные величины согласно ра-  
 бочей теории [2]:

$\tau$  – относительное время погружения невода:

$$\tau = \frac{t_{погр}}{t_{max}}$$

где  $t_{погр}$  – время погружения невода каждую секунду,  
 $t_{max}$  – максимальное время погружения невода

$v$  – относительная скорость смещения невода:

$$v = \frac{V_{погр}}{V_{теч}}$$

Обработка проводилась с помощью компьютерной программы Mathcad.

Рассмотрим аппроксимирующую функцию для относительной скорости смеще-  
 ния невода.

Для примеров возьмем: 1 – модель 1 при загрузке 1Т и  $V_{теч} = 0,2$  м/с; 0,3 м/с;  
 0,4 м/с; 2 - модель 1 при загрузке 0Т; 1Т; 1,5Т и  $V_{теч} = 0,2$  м/с.

Рассчитанные безразмерные величины для примера 1:

Модель 1					
$V_{теч} = 0,2$ м/с		$V_{теч} = 0,3$ м/с		$V_{теч} = 0,4$ м/с	
$\tau$	$v$	$\tau$	$v$	$\tau$	$v$
0	0	0	0	0	0
0,25	1.35	0,25	0.767	0,25	0.325
0,5	1.325	0,5	0.783	0,5	0.338
0,75	1.333	0,75	0.633	0,75	0.333
1	1.375	1	0.667	1	0.375

Для аппроксимации была выбрана полиномиальная функция 3 степени вида:

$$v = a\tau^3 + b\tau^2 + c\tau + d$$

Результаты расчета аппроксимации  $v=f(\tau)$ :

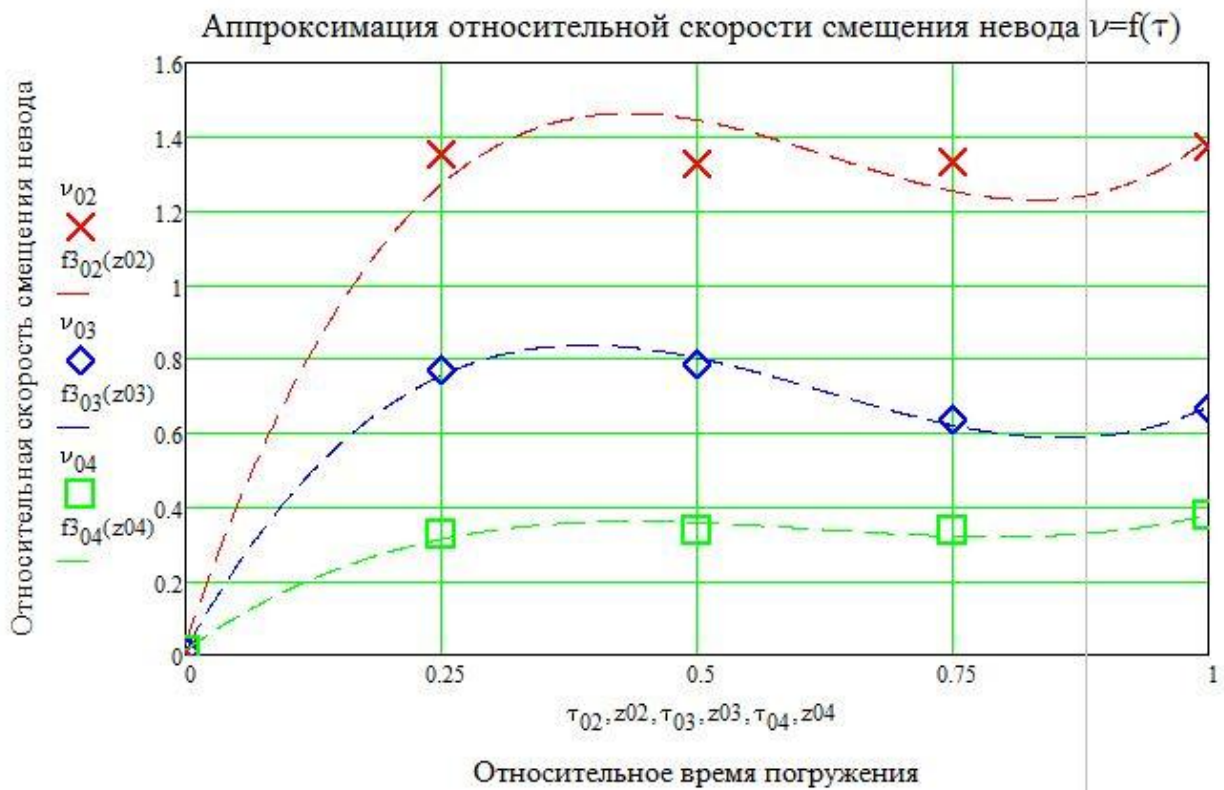


Рис.3. График аппроксимации  $v=f(\tau)$  для модели 1 при нагрузке 1Т и  $V_{теч} = 0,2$  м/с; 0,3 м/с; 0,4 м/с.

Аппроксимирующие формулы функции  $v=f(\tau)$ :

$V_{теч} = 0,2$ м/с	$7.461\tau^3 - 14.12\tau^2 + 8.025\tau + 0.03 =$	$\left( \begin{array}{l} 0.03 \\ 1.27 \\ 1.445 \\ 1.253 \\ 1.395 \end{array} \right)$
$V_{теч} = 0,3$ м/с	$4.933\tau^3 - 9.242\tau^2 + 4.966\tau + 0.013 =$	$\left( \begin{array}{l} 0.013 \\ 0.754 \\ 0.802 \\ 0.62 \\ 0.67 \end{array} \right)$
$V_{теч} = 0,4$ м/с	$1.861\tau^3 - 3.437\tau^2 + 1.94\tau + 0.013 =$	$\left( \begin{array}{l} 0.013 \\ 0.312 \\ 0.356 \\ 0.32 \\ 0.377 \end{array} \right)$

Расчитанные безразмерные величины для примера 2 модель 1 при  $V_{теч} = 0,2$  м/с и нагрузке 0Т, 1Т, 1,5Т:

Модель 1, при $V_{теч} = 0,2$ м/с					
0Т		1Т		1,5Т	
$\tau$	$v$	$\tau$	$v$	$\tau$	$v$
0	0.01	0	0.01	0	0.01

0,167	0,5	0,25	1,35	0,25	1,5
0,333	0,5	0,5	1,325	0,5	1,35
0,5	0,5	0,75	1,333	0,75	2,15
0,667	0,335	1	1,375	1	1,5
0,833	0,5				
1	0,165				

Результаты расчета аппроксимации  $v=f(\tau)$ :

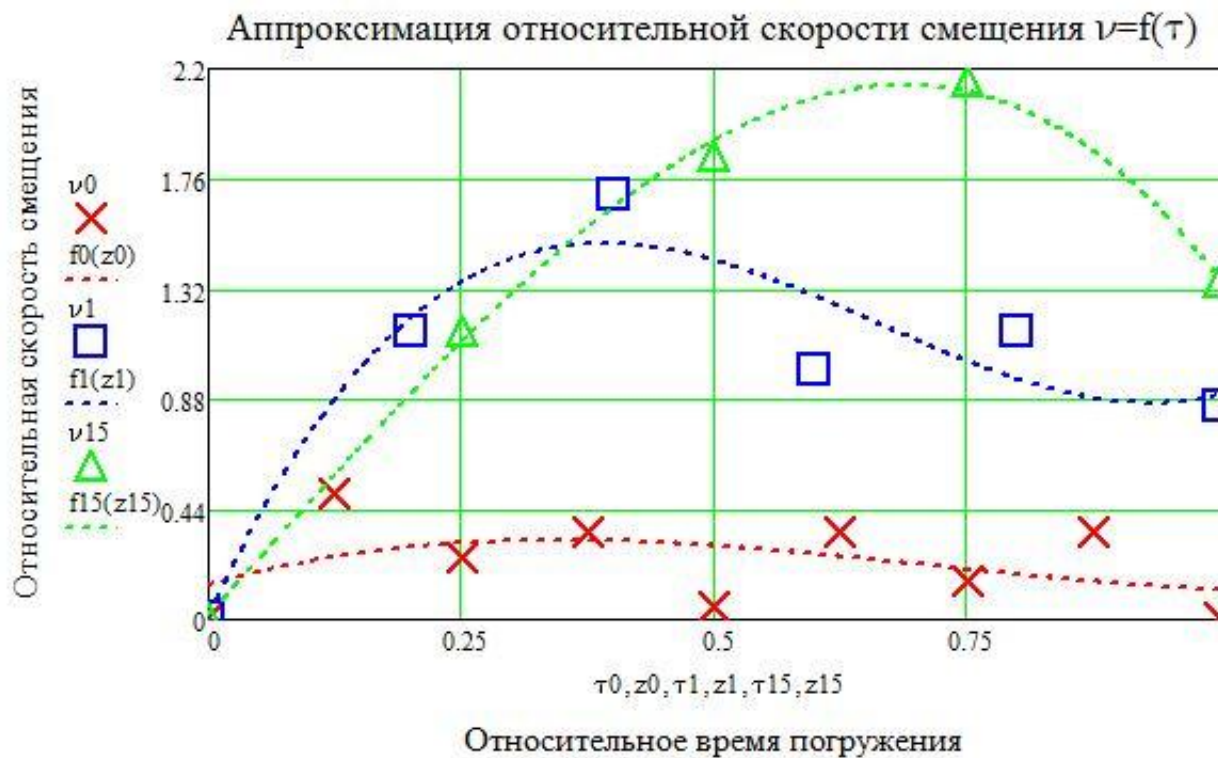


Рис.5. График аппроксимации  $v=f(\tau)$  для модели 1 при  $V_{меч} = 0,2$  м/с и нагрузке 0Т, 1Т, 1,5Т

Аппроксимирующие формулы функции  $v=f(\tau)$ :

Загрузка 0Т	$1.918\tau^3 - 4.434\tau^2 + 2.687\tau + 0.057 =$	$\begin{pmatrix} 0.057 \\ 0.391 \\ 0.531 \\ 0.532 \\ 0.446 \\ 0.327 \\ 0.228 \end{pmatrix}$
Загрузка 1Т	$7.461\tau^3 - 14.12\tau^2 + 8.025\tau + 0.03 =$	$\begin{pmatrix} 0.03 \\ 1.27 \\ 1.445 \\ 1.253 \\ 1.395 \end{pmatrix}$

Загрузка 1.5Т

$$1.013\tau 15^3 - 5.324\tau 15^2 + 5.802\tau 15 + 0.081 = \begin{pmatrix} 0.081 \\ 1.215 \\ 1.778 \\ 1.865 \\ 1.572 \end{pmatrix}$$

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Недоступ А.А., Экспериментальные исследования процесса погружения нижней подборы моделей кошелькового невода в гидроканале ОАО «МариНПО» / А.А. Недоступ, В.В. Макаров // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер.: Рыбное хозяйство. 2015. №3. С. 78-85

2. Недоступ, А. А. Постановка задачи вывода безразмерных зависимостей процесса погружения сетной стенки кошелькового невода / А. А. Недоступ, В. В. Макаров // Известия Калининградского государственного технического университета. – 2015. – № 39. – С. 55-62

## APPROXIMATION OF THE RELATIVE VELOCITY SPEED REMOVAL OF THE WALLET PURSE SEINE MODEL

Makarov Vyacheslav Valeryevich, graduate student  
Nedostup Aleksandr Alekseyevich, associate professor, PhD in Technical Sciences

Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,  
e-mail: vyacheslav.makarov@klgtu.ru; nedostup@klgtu.ru

*This article describes the results of approximation of experimental data conducted in the hydro-channel of JSC "MariNPO". The approximation was carried out by a polynomial function of degree 3. Also in the article are examples of approximation calculations for the values of the relative rate of displacement of the seine.*

УДК 639.2.081.1

## СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ РАЗРЫВНОЙ НАГРУЗКИ НИТЕВИДНЫХ ИЗДЕЛИЙ С УЧЕТОМ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ УЛИТОЧНЫХ КРЕПЛЕНИЙ

Насенков Павел Владимирович, аспирант

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,  
Калининград, Россия, e-mail: pavel.nasenkov@klgtu.ru

*Представлено экспериментальное исследование и сравнительный анализ данных разрывного усилия нитевидных изделий, применяемых для постройки орудий промышленного рыболовства, с учетом применения двух видов улиточных креплений. Эксперименты были проведены в лаборатории экспертизы рыболовных материалов кафедры «Промышленного рыболовства» ФГБОУ ВО «КГТУ»*

Определение прочностных характеристик нитевидных материалов, применяемых для постройки орудий промышленного рыболовства, в настоящее время имеет очень большую значимость за счет создания новых искусственных материалов. Прочность нитевидных материалов является одной из самых важных физико-механических характеристик рыболовных материалов. От прочности материала, из которого изготовлено орудие лова, зависит прочность всего орудия лова и способность его к большей уловистости.

Для определения разрывной нагрузки (прочности) используют разрывные машины со специальными захватными устройствами в виде кольцевых или винтовых улиток. Данные типы улиток выбираются в зависимости от номинальной результирующей линейной плотности нитевидного материала согласно требованиям таблицы 1.

Таблица 1

**Выбор типа улитки**

Номинальная результирующая линейная плотность, текс	Тип улитки
До 200	Рис. 1
1000 5000 Св. 5000 до 25000	Рис. 2
25000 до 100000	Рис. 3

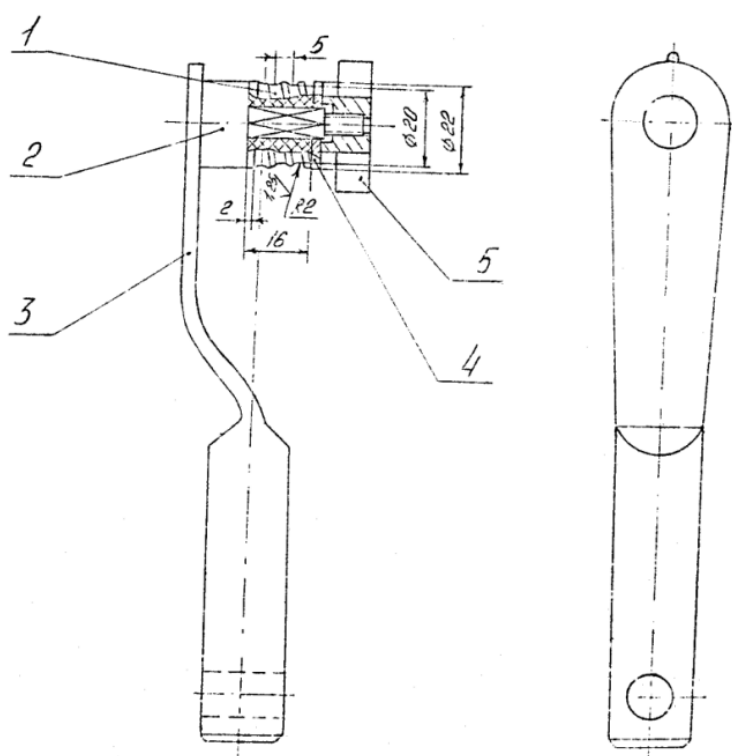


Рис. 1. Винтовая улитка

1 – втулка; 2 – ось; 3 – кронштейн; 4 – шайба; 5 – барашек

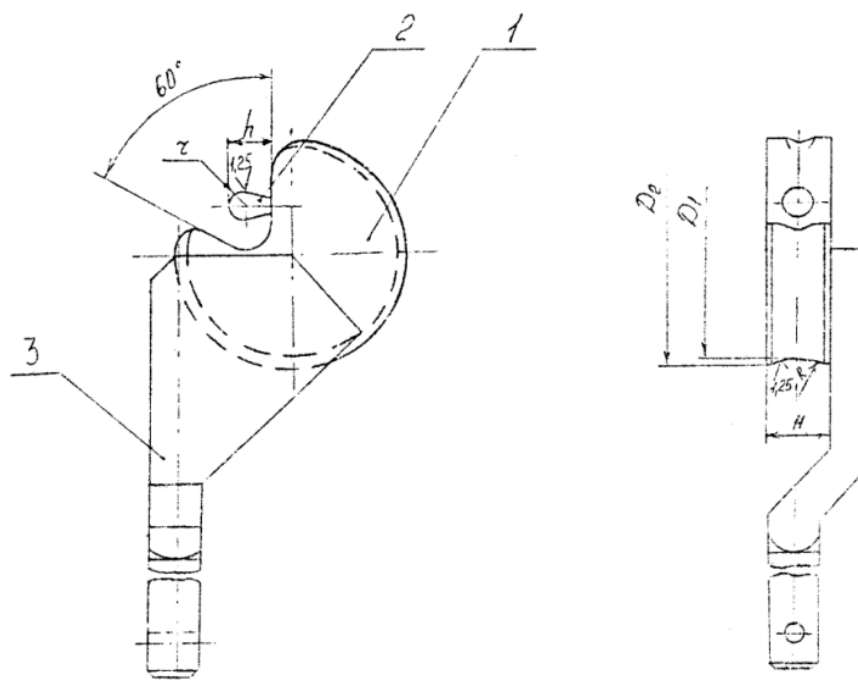


Рис. 2. Кольцевая улитка  
1 – улитка; 2 – штифт; 3 – кронштейн

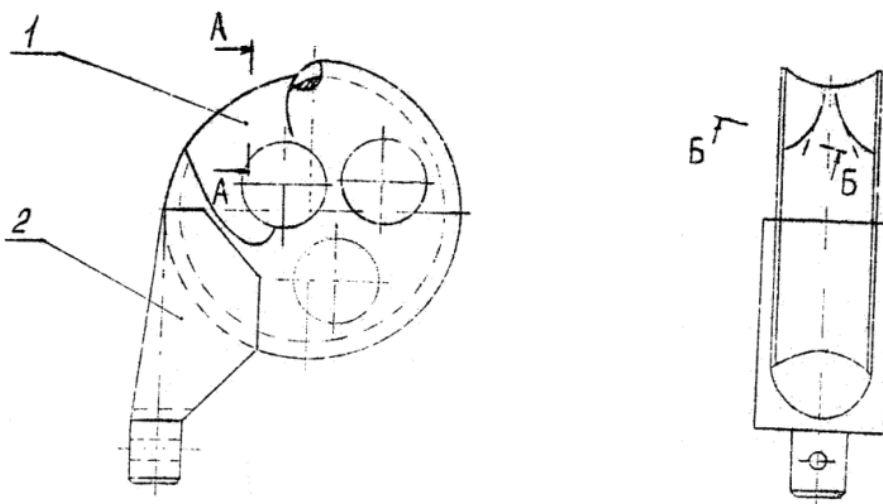


Рис. 3. Кольцевая улитка:  
1 – улитка; 2 – кронштейн

Для проведения исследования физико-механических свойств канатно-веревочных изделий, используемых для постройки орудий промышленного рыболовства, были изготовлены улиточные крепления с измененной конструкцией, однако диаметр был соблюден (диаметр улиток в 7 раз больше диаметра нитей) (рис. 4).





*Рис. 4. Крепления с измененной конструкцией*

Проведение исследований на данных улитках требует уточнения достоверности получаемых данных. В связи с этим необходим ряд пробных испытаний одного вида нитевидного материала на улитках правильной конструкции и измененной.

Для проведения испытаний был выбран наработанный нитевидный материал на ООО "Фишеринг-Сервис", а именно полиамидная нитка диаметром 2,5 мм, 187 Текс × 12.

Отбор образцов и проведение испытаний по определению разрывной нагрузки осуществлялись в соответствии с ТУ 15-08-31 -89 "Нитки рыболовные крученые капроновые".

Испытания проводились в лаборатории экспертизы рыболовных материалов кафедры промышленного рыболовства ФГБОУ ВО "КГТУ" на разрывной машине модели Р - 5 с максимальным разрывным усилием 5 тонн.

Сначала были проведены испытания нитей на улитках правильного вида (рис. 5).



*Рис. 5. Испытания на улитках правильного вида*

Испытания проводились не менее 10 раз. После заправки образца в улиточные крепления разрывной машины, на границе участка, который должен подвергаться растяжению (участок между точками касания с улиткой), наносились метки. При этом расстояние между зажимами было не менее 250 мм.

Результаты испытаний, при которых место разрыва образца находилось за пределами участка, ограниченного метками, не учитывались.

Скорость движения траверсы разрывной машины составляла 10 см/мин.

Полученные результаты испытаний представлены в таблице 2.

Кроме того, для оценки неравномерности был подсчитан коэффициент вариации и среднееквадратичное отклонение полученных данных.

Коэффициент вариации  $C$  в процентах вычисляют по формуле (1):

$$C = \frac{\sigma}{\bar{M}} \times 100 \quad (1)$$

где  $\bar{M}$  - среднее арифметическое результатов испытаний одиночных образцов;

$\sigma$  - среднее квадратичное отклонение, которое вычисляется по формуле (2):

$$\sigma = \sqrt{\sum(M - \bar{M})^2 / (n - 1)} \quad (2)$$

где  $M$  - испытания одиночных образцов;

$n$  - общее число испытаний.

Таблица 2

### Результаты испытаний

№	Р, Н
1	1780
2	1750
3	1770
4	1750
5	1780
6	1765
7	1755
8	1750
9	1770
10	1775
Среднее	1765
Кэф. вариации, %	0,7
Среднее квадратичное отклонение	12,4

После были проведены аналогичные испытания и расчеты с использованием изготовленных улиточных креплений. Данные испытаний представлены в таблице 3.

## Результаты испытаний

№	Р, Н
1	1770
2	1775
3	1780
4	1750
5	1790
6	1775
7	1780
8	1760
9	1780
10	1770
Среднее	1773
Коеф. вариации, %	0,6
Среднее квадратичное отклонение	11,2

Проведя анализ полученных данных можно сделать вывод, что испытания, проведенные на данных типах улиточных креплений, практически идентичны, т.к. среднее отклонение составляет 0,4 %.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ломакина Л. М. Технология постройки орудий лова. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. 207 с.
2. Министерство рыбного хозяйства СССР, технические условия "Нитки рыболовные крученые капроновые", ТУ 15-08-31-69. М., 1989. 42 с.

**COMPARATIVE DATA OF BREAKING LOAD OF THREADLIKE PRODUCTS  
TAKING INTO ACCOUNT THE USE OF DIFFERENT CONSTRUCTIONS  
OF SNAIL ATTACHMENTS**

Nasenkov Pavel Vladimirovich, phdstudent

Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,  
e-mail: pavel.nasenkov@klgtu.ru

*In the article, from an experimental study and a comparative analysis of the data of the destructive impact of threadlike articles used for the construction of industrial fishing tools, taking into account the application of two types of snap fasteners. The experiments were conducted in the laboratory for the examination of fishing materials of the Department of Commercial Fisheries of the FGBOU VO " KSTU".*

## **ИСПЫТАНИЕ НИТЕВИДНО-ВЕРЕВОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ В ЛАБОРАТОРИИ РЫБОЛОВНЫХ МАТЕРИАЛОВ «ДАЛЬРЫБВТУЗА»**

Насенков Павел Владимирович, аспирант  
Недоступ Александр Алексеевич, канд. техн. наук, доцент

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,  
Калининград, Россия, e-mail: pavel.nasenkov@klgtu.ru; nedostup@klgtu.ru

*Представлено экспериментальное исследование основных физико-механических свойств (разрывное усилие и удлинение) нитевидно-веревочных изделий для изготовления конструкций орудий промышленного рыболовства. Эксперименты проведены в лаборатории рыболовных материалов кафедры «Промышленное рыболовство» Института рыболовства и аквакультуры ФГБОУ ВО «Дальрыбвтуз»*

В настоящее время испытания нитевидно-веревочных изделий (НВИ) находятся на этапе интенсивного развития конструкций орудий промышленного рыболовства. Это связано не только с разработкой новых конструкций орудий промышленного рыболовства, но и с созданием новых материалов для НВИ, физико-механических характеристик которых нет в ГОСТах, т.к. практически все фабрики по изготовлению НВИ перешли на ТУ, которое отличается на каждом предприятии в меру своих способов и механизмов по изготовлению НВИ. Поэтому каждое новое НВИ должно проходить ряд исследований на разрывных машинах в целях определения физико-механических характеристик для дальнейшего внедрения его в конструкцию орудия промышленного рыболовства.

Исследования НВИ на разрывных машинах становится эффективным инструментом в решении многообразных проблем деформации и разрушения, прогноза надежности и ресурса НВИ, работающих в условиях износа, усталости, динамических и ударных нагрузок, в условиях низких температур и хрупкого разрушения широкого круга материалов, используемых при конструировании орудий промышленного рыболовства.

В XX столетии массовые испытания НВИ на разрывных машинах ограничивались, как правило, измерениями разрывной нагрузки. Если сравнить такое испытание с испытанием на растяжение, то разрывная нагрузка фиксирует лишь одну точку на диаграмме с координатой деформации. Характер диаграммы растяжения остается неизвестным.

Все известные на сегодняшний день методы и технические средства оценки состояния исследуемых НВИ не соответствуют современным требованиям. Для решения этих проблем требуется использовать программно-аппаратные средства разрывных машин, позволяющих в широком диапазоне нагрузок, свойств НВИ и времени воздействия на исследуемый материал проводить исследования.

Подобные исследования возможны на базе лаборатории рыболовных материалов Дальневосточного Государственного Технического Рыбохозяйственного Университета (ФГБОУ ВО Дальрыбвтуз). Данная лаборатория имеет универсальные разрывные машины Shimadzu Autograph AGS-X10 настольного типа для физико-механических испытаний различных материалов (Рисунок 1). Эти машины имеют возможность проведения стандартных испытаний по контролю качества, механических испытаний общего

назначения и научных исследований. Погрешность точности испытаний составляет  $\pm 0,5\%$  от полученных данных, согласно паспортным данным машин.



Рис. 1. Универсальные разрывные машины Shimadzu Autograph AGS-X10

Основной задачей проводимых исследований является получение явных зависимостей разрывной нагрузки НВИ, позволяющей оценивать физико-механические свойства НВИ, адекватность которых подтверждена экспериментами, проведенными на модельных материалах, свойства которых известны.

В период с 22.01. по 2.02. 2018 года при прохождении научно-исследовательской практики в ФГБОУ ВО «Дальрыбвтуз», г. Владивосток, были проведены экспериментальные исследования физико-механических свойств нитевидных и веревочных элементов орудий промышленного рыболовства по определению прочности (определению разрывных усилий и удлинения) на разрывных машинах в лаборатории рыболовных материалов кафедры «Промышленное рыболовство» Института рыболовства и аквакультуры.

В целях подготовки к научно-исследовательской командировки, были отобраны образцы ниток и веревок трех материалов, таких как ПА, ПП и ПЭФ различных диаметров (Рисунок 2).



а б в  
Рис. 2. Отобранные образцы (а - ПА, б - ПП, в - ПЭФ)

По прибытию в Дальрыбвтуз все образцы материалов были помещены на сутки в помещении лаборатории в расплавленном виде, для разглаживания и принятия исходной текстуры. На следующий день, предварительно измерив температуру и влажность воздуха помещения, в котором проводятся эксперименты, началось проведение испытаний, которые заключались в определении разрывного усилия и удлинения образцов при различных скоростях траверсы разрывной машины: 10 см/мин, 50 см/мин и 100 см/мин. Все эксперименты проводились согласно ОСТ 15-83-74, однако расстояние между зажимами составляло менее 250 мм в виду того, что рабочий участок разрывной машины был не более 500 мм. Однако данное изменение проведения эксперимента позволяет провести анализ разрывного усилия и удлинения материалов менее 250 мм, которые используются в сетных элементах орудий промышленного рыболовства, а также изучить сам процесс влияния скорости на разрывное усилие и удлинение нитевидных материалов. Все эксперименты запечатлены в фото и видео съемке (Рисунок 3).

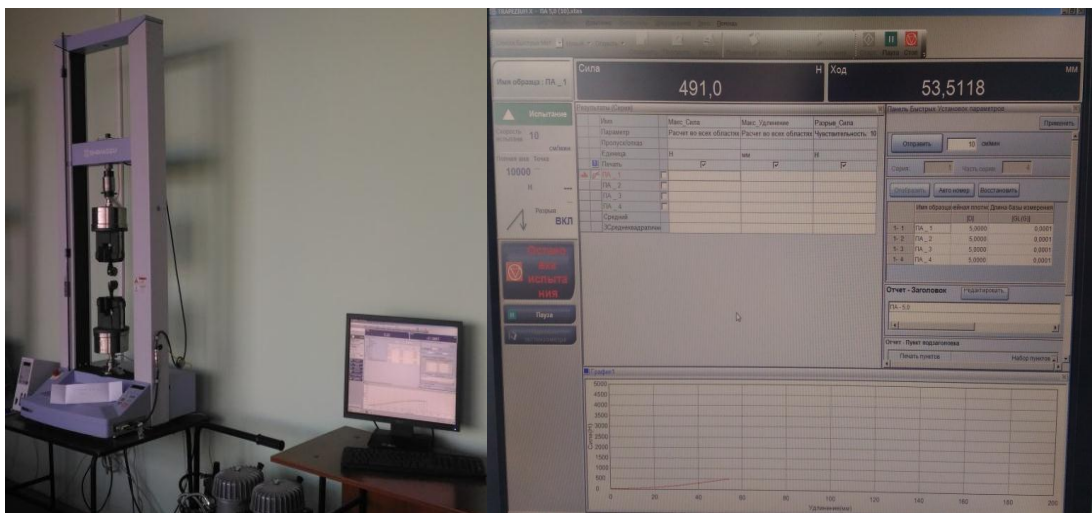


Рис. 3. Проведение экспериментов

Программным обеспечением разрывной машины были построены графики зависимости разрывного усилия от удлинения при различных скоростях движения траверсы (Рисунок 4).

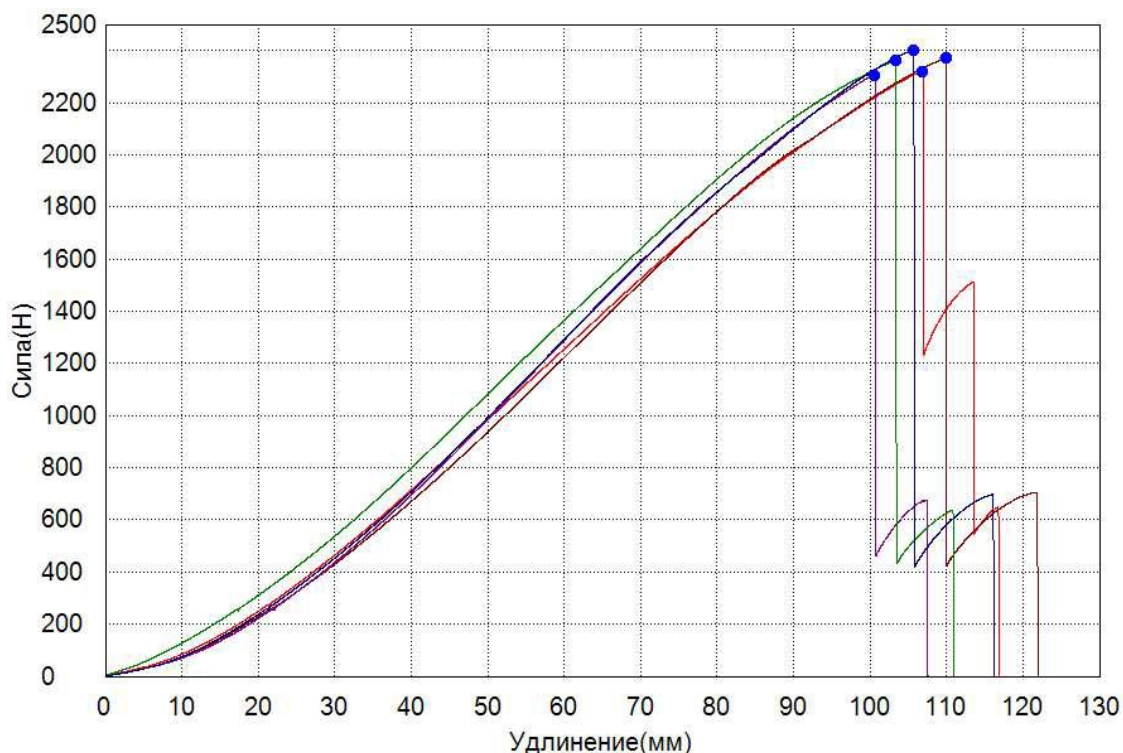


Рис. 4. График зависимости разрывного усилия от удлинения

В ходе изучения и анализа полученных графиков и данных по разрывному усилию и удлинению отобранных образцов была выявлена зависимость поведения каждого материала относительно разрывного усилия и удлинения.

- ПА образцы с большей скоростью движения траверсы разрывной машины, имеют увеличение разрывного усилия в среднем до 10%, также как и удлинения.

- Разрывное усилие ПП образцов в среднем увеличивается на 6%, а удлинение уменьшается на 20%.

- Разрывное усилие ПЭФ образцов в среднем остается неизменным, а удлинение может увеличиться до 7%.

Полученные результаты позволяют проследить процесс поведения материалов при различных скоростях проведения испытаний и увидеть, что удлинение имеет не малые изменения относительно разрывного усилия. Поэтому при построении движущихся орудий лова ограничиваться одним основным параметром, таким как прочность, нельзя, т.к. удлинение может повлечь за собой изменение конструкции орудия лова, вследствие чего, его использование может стать невозможным.

Все образцы, с которыми были проведены испытания, собраны для дальнейшего изучения поведения материала после действия на них нагрузок при различной скорости, а также для спектрального анализа, в целях уточнения исходного материала, из которых они изготовлены и их структуры.

В дальнейшем будет необходимо сопоставить физико-механические свойства модельных материалов полученные экспериментальным путем и известными данными, предоставленными изготовителем образцов, которые приняты за истинные, и провести сравнительный характеристику данных, для разработки методики и программы расчета паспортизации НВИ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ломакина Л. М. Технология постройки орудий лова. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. 207 с.
2. Пакшвера А. Б. Свойства и особенности волокон. М.: 1975. 496 с.
3. Государственный стандарт союза ССР “Изделия крученые и плетеные” методы испытаний ГОСТ 25552 – 82. М.: ИПК Издательство стандартов, 1997. 27 с.

### **THE TEST OF THREADLIKE-STRING PRODUCTS IN THE LABORATORY OF FISHING MATERIALS OF "DALRYBVTUZ"**

Nasenkov Pavel Vladimirovich, phd student  
Nedostup Aleksander Alekseyevich, Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor

Kalininsrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,  
e-mail: pavel.nasenkov@klgtu.ru; nedostup@klgtu.ru

*In the article presents an experimental study of the main physical and mechanical properties (breaking force and elongation) of thread and string manufacture for the manufacture of structures for commercial fishing gear. The experiments were carried out in the laboratory of fishing materials of the Department of Commercial Fisheries of the Commercial of Fisheries and Aquaculture of the FGBOU VO “Dalrybvtuz”.*

УДК 639.2.081.7:681.883.4

### **ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ТРАЛОВОГО ЗОНДА FURUNO CN-14 ДЛЯ ЗАДАЧ КОМПЬЮТЕРНОЙ ИМИТАЦИИ**

Недоступ Александр Алексеевич, доцент, канд.техн.наук  
Ражев Алексей Олегович, соискатель

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,  
Калининград, Россия, e-mail: nedostup@klgtu.ru; progacpp@live.ru

*Описаны основные характеристики и принципы работы тралового зонда при отражении эхосигнала от пологого и наклонного дна водоема, косяка рыбы, отдельно стоящих рыб, а также при различной солености воды, температуре и давлении на примере FURUNO CN-14. Описаны основные режимы визуализации по верхнему и нижнему направлению зондирования, варианты управления при имитации и режимы работы*

В траловых комплексах широко используются такие системы мониторинга, как визуальное зондирование трала и подводной обстановки в зоне действия трала в процессе траления. В связи с этим при компьютерной имитации необходимо не только моделировать поведение канатно-сетной части трала и траектории движения судна в про-



цессе траления, но и гидролокационное оборудование зондирования – траловый зонд (см. рис. 1).

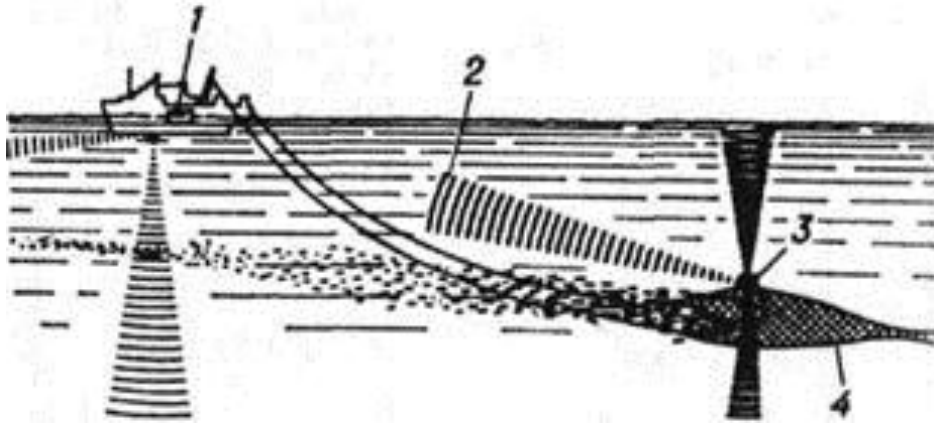


Рис. 1. Траловый зонд с гидроакустической линией связи

На рисунке 1 цифрами обозначены:

- 1 – бортовая приёмно-регистрирующая аппаратура;
- 2 – линия связи;
- 3 – подводная измерительно-передающая аппаратура;
- 4 – трал.

Рассмотрим принцип функционирования и общие параметры траловых зондов. Траловый зонд предназначен для визуализации процесса тралового лова. В процессе работы зонд передает информацию по каналу связи о своем положении относительно дна и поверхности водоема, видеоинформацию о раскрытии устья трала и заходе объекта лова в трал. Для определения границ объектов зонд использует эхолокацию.

На примере тралового зонда FURUNO CN-14A (см. рис. 2) [1] указанная информация отображается на цветном дисплее размером 14". Кроме этого на дисплее в виде цветовой шкалы также отображается мощность эхо-сигналов от объекта лова, поверхности и дна водоема, и нижней подборы трала. Зонд имеет четыре режима визуализации гидроакустической информации по верхнему и нижнему направлению зондирования.



Рис. 2. Внешний вид тралового зонда FURUNO CN-14A

При имитации тралового зонда возможно использование двух вариантов управления режимами работы:

- с помощью функциональной панели управления, имитирующей реальные органы управления, размещенные на панели управления дисплейного блока CN-14A (см. рис. 3);

- с помощью взаимодействия компьютерного манипулятора типа мышь с изображением органов управления на экране монитора тренажера.

Управление режимами работы осуществляется:

- четырехпозиционным переключателем **MODE** выбора режимов отображения гидроакустической информации;
- двумя переключателями независимого переключения режимов зондирования верхнего и нижнего направлений;
- четырехпозиционным переключателем установки скорости протяжки изображения в горизонтальном направлении;
- четырехпозиционным переключателем **TX PRR** сопряжения режимов бортовой части аппаратуры с установленным в траловом блоке периодом следования зондирующих импульсов и аналогичного сопряжения аппаратуры при работе дисплея CN-14A в составе траловых зондов типа FNR-700 МК-III или FNR-80;
- шестипозиционным переключателем **CATCH MONITOR** установки режимов сигнализации степени заполнения кутка трала;
- тумблером **TEMP MARKER** включения и отключения вывода на экран шкалы и графика температуры воды на горизонте хода трала;
- тумблером **MARKER** включения и отключения на дисплее сопрягаемых с траловым зондом эхолотов фирмы "FURUNO" маркера глубины нахождения трала;
- трехпозиционным тумблером **VRM** управления положением на экране дисплея тралового зонда горизонтального визира глубины, обеспечивающего отсчет глубины залегания подводного объекта, зафиксированного в любой точке рабочего поля экрана;
- тумблером включения и отключения режима подавления интерференционных помех от других рыбопоисковых приборов;
- двух плавных регуляторов независимой установки коэффициентов усиления для нижнего и верхнего направлений зондирования;
- двух плавных регуляторов установки порога отсечки шумов для нижнего и верхнего направлений зондирования;
- трехразрядного табло установки и индикации величины фазировки диапазонов.

Основные характеристики FURUNO CN-14A:

- частота каналов зондирования - 75 кГц;
- частота канала связи 50 кГц;
- ширина направленности антенн - 28°;
- длительность зондирующего импульса - 1 мс;
- диапазоны эхолота верхнего направления 10, 60, 120, 180, 280, 400, 500 и 600 м, нижнего – 5, 10, 20, 40, 60, 120, 180 и 400 м с шагом в 1 м;
- минимальная глубина погружения подводного блока - 10 м, максимальная - 1800 м.

Во время работы излучатель периодически посылает в водную среду мощные кратковременные звуковые сигналы определенной частоты [2]. Объекты, находящиеся

на пути звуковой волны, отражают ее. По мере распространения волны ко дну и ее отражения обратно плотность энергии волны уменьшается. При отражении от дна водоема либо от большого косяка рыб зависимость площади покрытия волны от пройденного ею пути квадратичная. Считается, что волна распространяется по закону  $ВАРУ\ 20\log R$ .

При отражении волны от отдельно стоящих рыб зависимость другая. Отраженная от поверхности дна волна на пути к рыбе также, как и от излучателя до дна распространяется по квадратичному закону. При достижении волной рыбы ее плавательный пузырь рассеивает поступающую энергию, превращая рыбу в своего рода ретранслятор. При обратном прохождении от рыбы до приемника рассеянная волна так же, как и от излучателя распространяется по квадратичному закону. В общей сложности волна от излучателя до приемника распространяется по закону четвертой степени  $ВАРУ\ 40\log R$ .

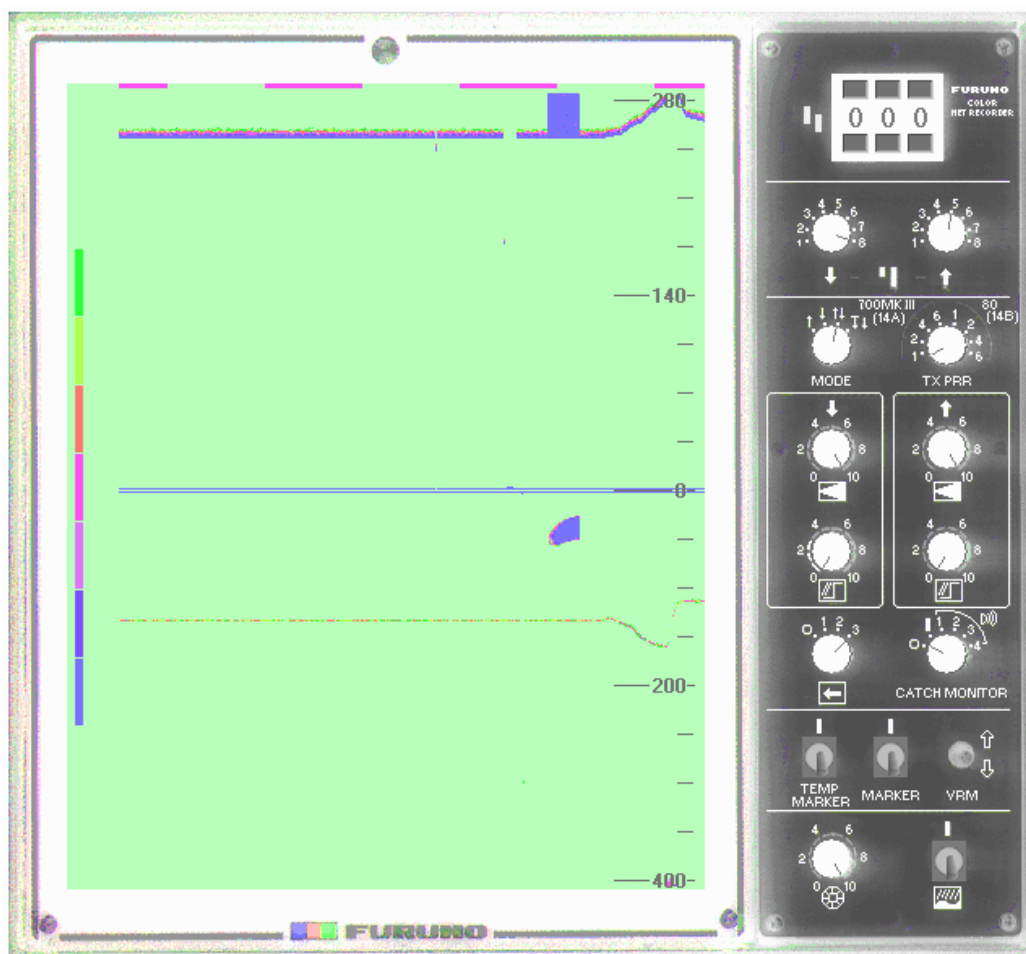


Рис. 3. Экран тралового зонда CN-14A

В разных средах скорость распространения звуковых волн различна и зависит от температуры и давления среды. В морской воде скорость распространения также зависит от солености. Например,

- на мелководье скорость обычно находится в пределах от 1440 до 1520 м/с;
- на глубине 1000 м ее значение может увеличиваться до 1480 м/с;
- в реках и пресных озерах скорость распространения приблизительно 1430 м/с.

При распространении звуковой волны ее мощность также уменьшается из-за потерь вследствие поглощения, которые в соленой воде значительно больше, чем в пресной и зависят от частоты волновых колебаний. При увеличении частоты потери увеличиваются. Например,

- при частоте 38 кГц поглощение составляет 0,5 дБ/км в пресной воде;
- при частоте 38 кГц поглощение составляет 10 дБ/км в соленой воде;
- при частоте 200 кГц поглощение составляет 10 дБ/км в пресной воде;
- при частоте 200 кГц поглощение составляет 50 дБ/км в соленой воде.

С учетом вышесказанного для компенсации энергетических потерь эхолот должен определять характеристики водной среды в текущий момент времени.

Отраженный от поверхности пологого дна сигнал, доходящий до приемника эхолота имеет такие же параметры по длительности и частоте, как и исходящий от излучателя, но ослаблен по мощности. В случае наклонного дна эхосигнал имеет увеличенную длительность импульса с более пологим фронтом и спадом. Это связано с тем, что доходящая до дна звуковая волна доходит до точки отражения *A* раньше, чем до точки *B*. В большинстве случаев дно представляет собой сочетание слоев с различными свойствами (глина, ил, песок и др.). Из-за такой неравномерности дно отображается в виде цветных полос на дисплее.

В статье рассмотрены основные характеристики, принципы и режимы работы и визуализации тралового зонда, необходимые для разработки математической модели и алгоритмов компьютерной имитации в составе тралового комплекса на примере FURUNO CN-14. Разработанные алгоритмы в дальнейшем будут использованы при разработке программного обеспечения симуляторов траловых комплексов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. [https://www.furunousa.com/-/media/sites/furuno/document\\_library/documents/manuals/operation\\_manuals/cn14a\\_cn14b\\_operators\\_manual\\_g\\_\\_12596.pdf](https://www.furunousa.com/-/media/sites/furuno/document_library/documents/manuals/operation_manuals/cn14a_cn14b_operators_manual_g__12596.pdf) (открытый доступ)
2. [https://www.simrad.com/www/01/NOKBG0397.nsf/AllWeb/476DD263FD01A618C12570D100630F2B/\\$file/160970ah\\_es60\\_reference\\_manual\\_english.pdf?OpenElement](https://www.simrad.com/www/01/NOKBG0397.nsf/AllWeb/476DD263FD01A618C12570D100630F2B/$file/160970ah_es60_reference_manual_english.pdf?OpenElement) (открытый доступ)

#### **PRINCIPLES OF WORK OF FURUNO CN-14 TRUNK PROBE FOR COMPUTER IMITATION PROBLEMS**

Nedostup Aleksandr Alekseevich, associate professor, PhD in Technical Sciences  
Razhev Aleksey Olegovich, research scholar

Kalininsrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,  
e-mail: nedostup@klgtu.ru; progacpp@live.ru

*This paper discusses the main characteristics and operation principles of the trawl probe when reflecting echo signals from the shallow and inclined bottom of the reservoir, the school of fish, separate fish, as well as for different water salinity, temperature and pressure using the example of FURUNO CN-14. The main rendering modes on upper and lower probing directions, control options and operating modes are described.*

## ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОМЫСЛОВЫХ СКОПЛЕНИЙ КИЛЕК В СРЕДНЕМ КАСПИИ В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД

Помогаева Татьяна Васильевна, науч. сотр.

ФГБНУ «КаспНИРХ», г. Астрахань, Россия,  
e-mail: pomogatyana@mail.ru

*В настоящее время состояние запасов и районы формирования скоплений каспийских килек вызывают большой интерес промышленности. Гидроакустические исследования помогают решать эту задачу. Каспийская килька является резервным объектом промысла. В течение ряда лет во время проведения гидроакустических съемок изучался район Среднего Каспия у дагестанского побережья, где отмечаются скопления килек восемь месяцев в году. Неизученной до недавних пор оставалась глубоководная часть Среднего Каспия*

**Цель работы** – определение нового перспективного района для промысла килек – глубоководной части Среднего Каспия.

**Методы исследований.** Исследования каспийских килек проводятся на НИС «Исследователь Каспия» гидроакустическим комплексом ЕК-60 фирмы «Simrad» (Норвегия) со стационарно установленными антеннами с расщепленным лучом на 38 и 120 кГц. Приоритетными значениями эхоинтенсивности при работе до 100-метровой глубины считались показатели антенны с частотой 120 кГц, свыше 100-метровой глубины – показатели антенны с частотой 38 кГц. Видовую идентификацию каспийских килек проводили как по результатам тралений разноглубинным тралом, донным тралом 24,7м, обловам конусным подхватом на электросвет, так и по типичным эхограммам при работе с так называемыми «сырыми» данными (raw-files), и в программе постобработки «Simrad BI-60».

Промысловыми скоплениями принято считать скопления килек с плотностью свыше 50 т/миля<sup>2</sup> [1]. В этих скоплениях должна отсутствовать молодь. Съемки по учету каспийских килек, проведенные в период с 2012 по 2017 гг, показали, что в летний период (июнь-июль) наибольшая масса каспийских килек, совершая нагульные миграции, концентрируется в средней части Каспийского моря, над глубинами от 100 до 700 метров. На рисунке 1 показано распределение килек в июне 2015 года. Скопление с плотностью свыше 100 т/миля<sup>2</sup> отмечено у берегов Дагестана, на глубинах до 50 метров.

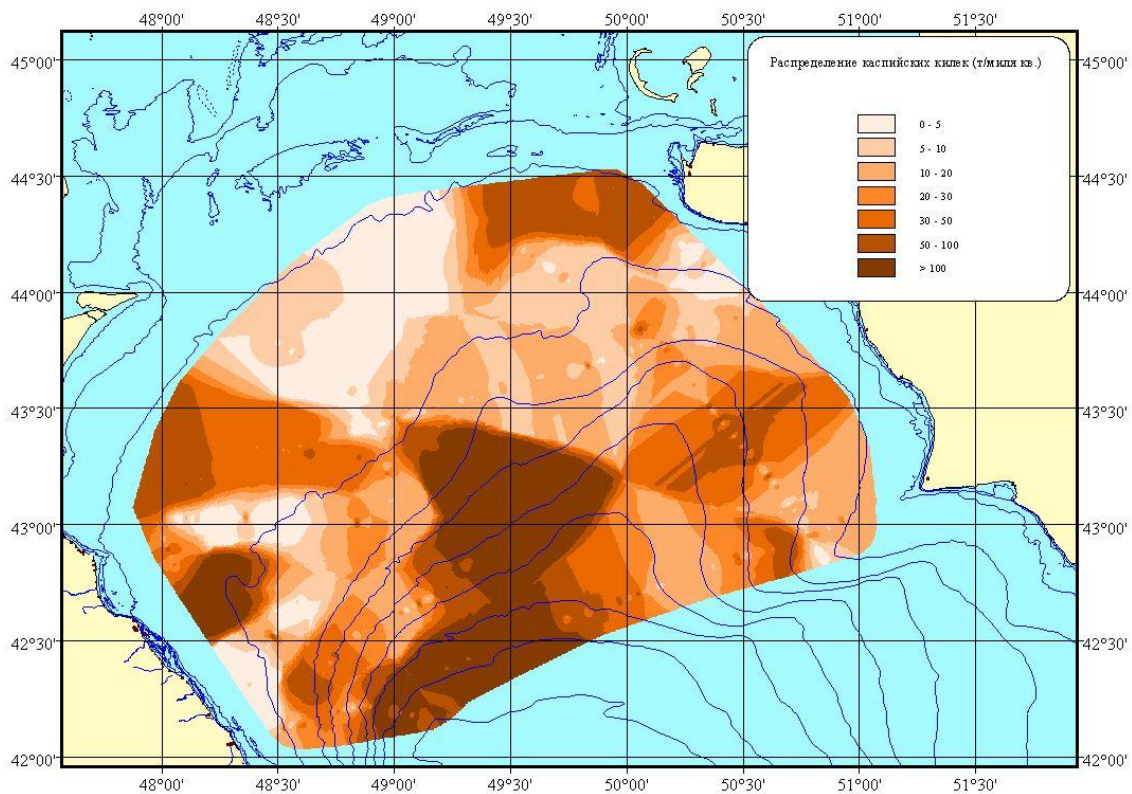


Рис.1. Распределение каспийских килек, июнь 2015 г.

В июле 2015 года особое внимание было обращено на район северо-западной части Среднего Каспия, где в июне 2015 года отмечались самые плотные концентрации килек. Этот район можно условно оконтурить по широте от 42°с.ш. до 43°30'с.ш и по долготе от 49°в.д. до 50°в.д. (рис.2). Концентрации свыше 100 т/милля<sup>2</sup> характеризовали очень плотные концентрации.

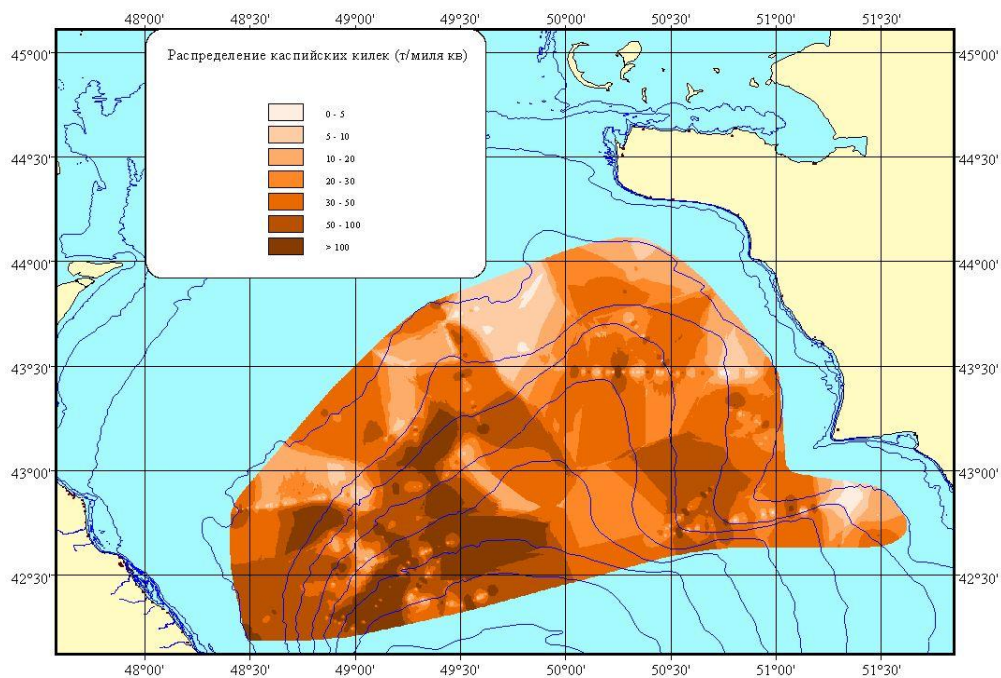


Рис. 2. Распределение каспийских килек, июль 2015 г.

На рисунке 3 подробно рассмотрена часть акватории с очень плотными концентрациями, где максимальное значение достигало 650 т/миля<sup>2</sup>.

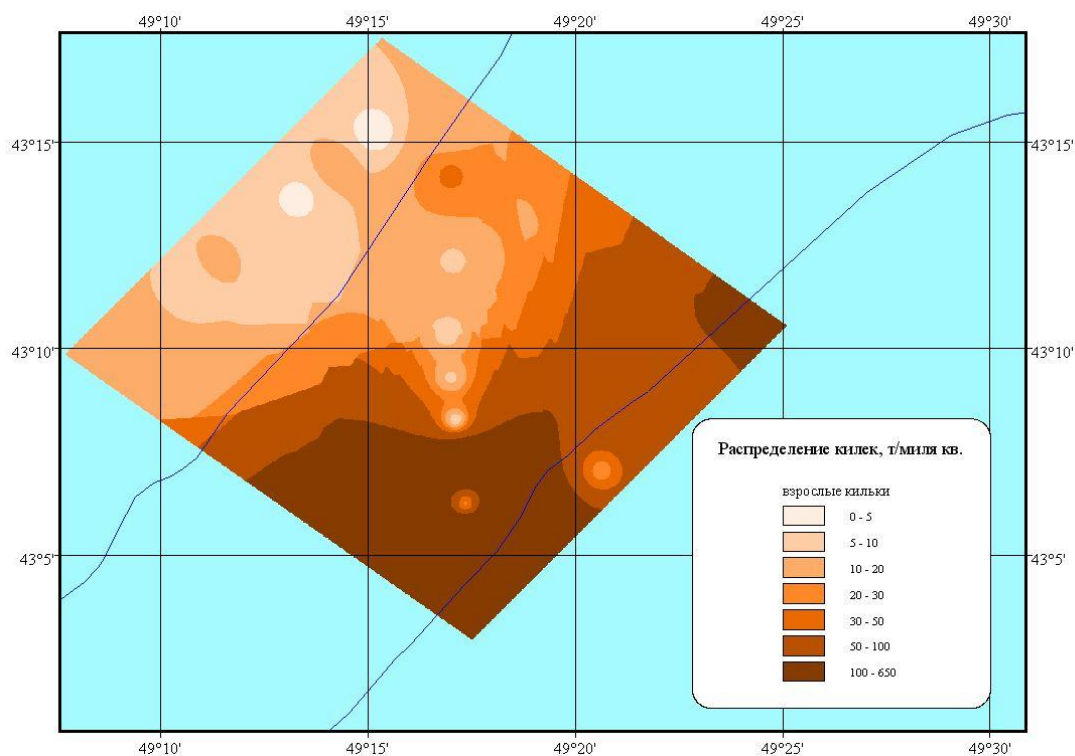


Рис. 3. Распределение каспийских килек на выбранной акватории, июль 2015 г.

Уловы разноглубинного трала, проведенные на данной акватории в июле 2015 года показали амплитуду от 72 до 490 кг за час траления, составив в среднем 307 кг за час траления. Траления проводились в верхнем 50 метровом слое над глубинами от 80 до 230 метров.

По характеру записей на эхограммах в летний период косяки килек концентрируются в средней части моря над большими глубинами преимущественно в верхнем 100-метровом слое (рис.4). Можно с уверенностью утверждать, что это эхозаписи обыкновенной кильки, отличающейся как по характеру скоплений, так и по особенностям отображения на эхограммах. В сумеречное время скопления формируются в плотную дорожку, не заходя глубже 50-метровой изобаты, и большей частью распределяясь в слое от 20 до 30 метров от поверхности воды (рис.5).

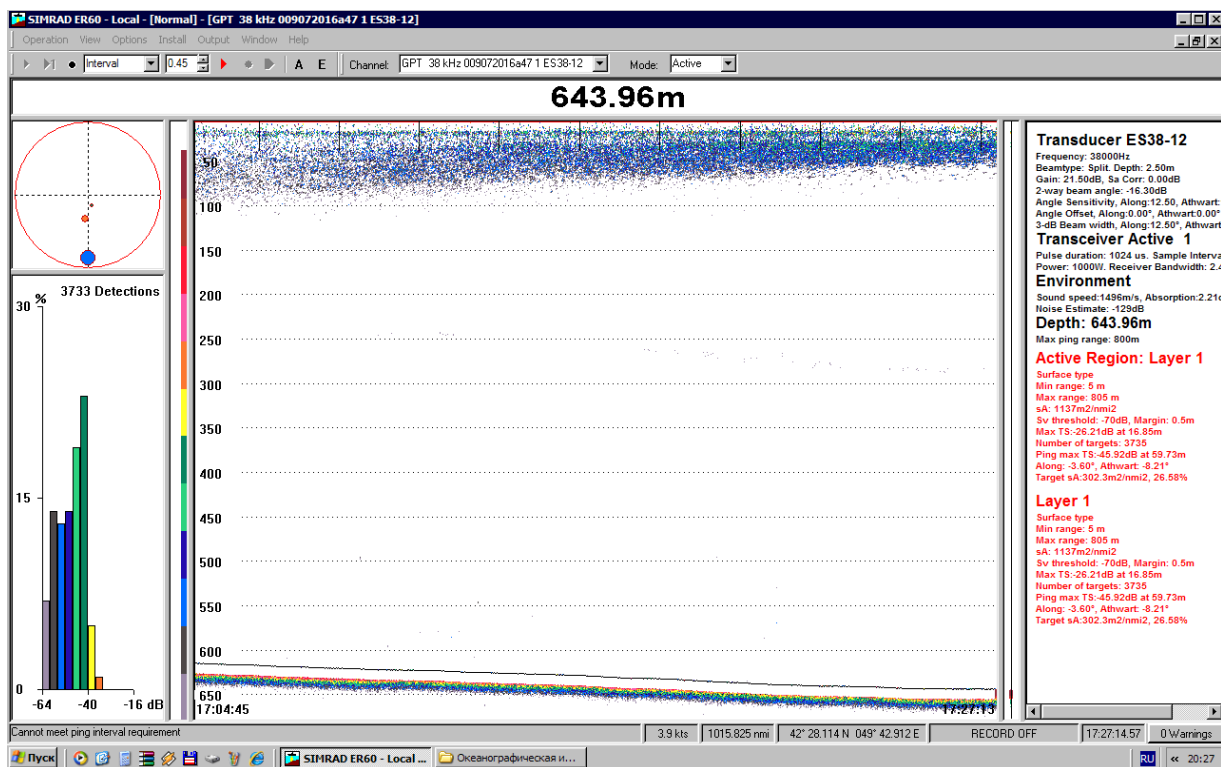


Рис. 4. Эхограмма записи килек, 16 июня 2015 г.

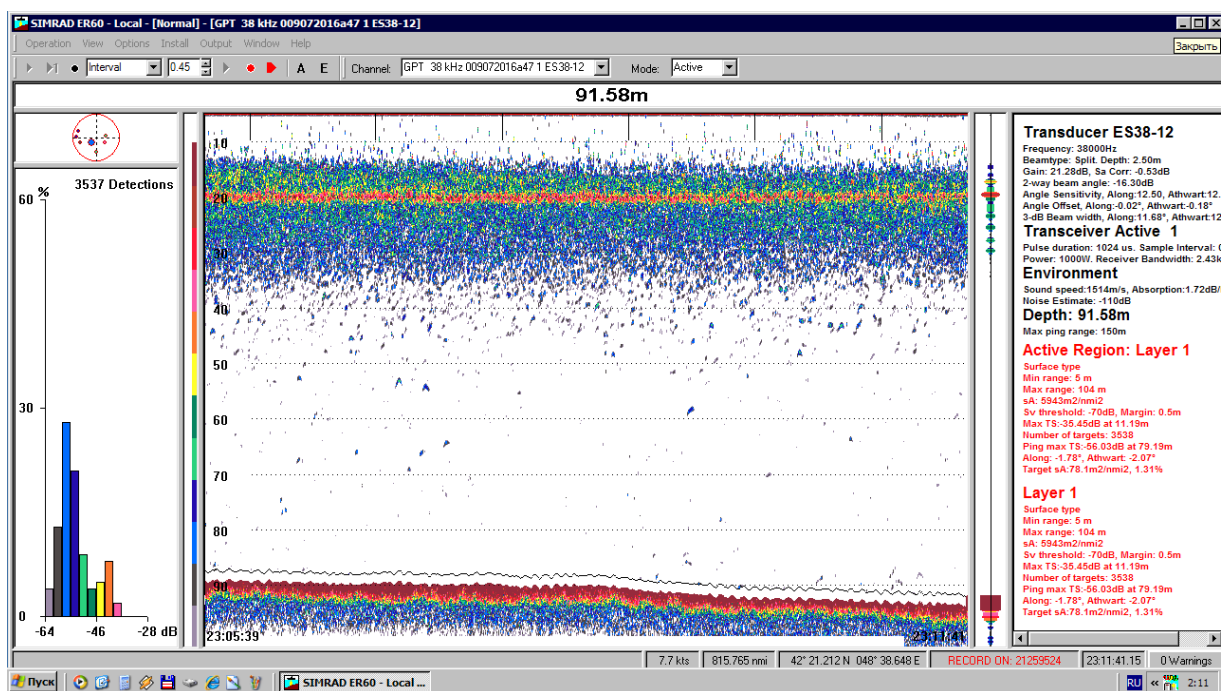


Рис. 5. Эхограмма записи килек, 29 июля 2017 г.

Используемая для обработки гидроакустических файлов постпроцессинговая программа VI-60 (Simrad) как на глубинах до 100 метров[2], так и в обработке данных над большими глубинами [3] дает подробную детализацию распределения каспийских килек в различных горизонтах.



Коэффициент пересчета от эхоинтенсивности к плотности скоплений, варьировал от 0,1 до 0,2, в среднем составляя 0,17, в зависимости от размерно-весовых характеристик рыб. Например, на рисунке 4 значение эхоинтенсивности  $1100 \text{ m}^2/\text{nm}^2$ , можно представить как плотность в  $180 \text{ т/миля}^2$ . На рисунке 5 значение эхоинтеграла достигало почти  $6000 \text{ m}^2/\text{nm}^2$ , что будет соответствовать  $1000 \text{ т/миля}^2$ .

Для успешного ведения промысла следует учитывать особенности биологии килек, температурный режим и другие факторы. В связи с этим плотность  $200 \text{ т/миля}^2$  в летний период не равна аналогичной в осенний период.

Осенью плотность скоплений килек над глубинами до 100 метров достигает  $200 - 300 \text{ т/миля}^2$ , и уловы на данных скоплениях достигают тонны. Летом над 200-метровой изобатой плотность скоплений достигает  $500 \text{ т/миля}^2$ , хотя уловы при этих плотностях не превышают 500 кг.

Таким образом, как показано выше, наиболее перспективным районом промысла килек является район Среднего Каспия вдоль Дагестанского побережья. В весенний [4] и осенний [5] периоды уловы килек разноглубинным тралом в этом районе достигают 1,5 – 2 тонн за час траления. В летний период, когда у берегов Дагестана концентрации килек снижаются, районом максимальных концентраций килек является глубоководная часть Среднего Каспия.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методические рекомендации по проведению гидроакустических съемок запасов килек в Каспийском море.- Мурманск: ПИНРО - КаспНИРХ, 1990. – 90 с.
2. Помогаева Т.В., Балченков И.Б., Смирнов А.В. - Особенности использования постпроцессинговой программы VI-60 (SIMRAD) для определения биомассы каспийских килек по горизонтам в северо-западной части Каспийского моря.- Современное состояние биоресурсов внутренних вод // Мат-лы докл. II Всерос. конф. с межд. участием. 6-9 ноября 2014 г., Борок, Россия: В 2 т. М.: ПОЛИГРАФ-ПЛЮС, 2014.– Т. 2. – С. 458-463.
3. Помогаева Т.В. Особенности пространственного распределения каспийских килек в глубоководной части Каспийского моря по результатам гидроакустических исследований в 2016 г. // Мат-лы XIX международной практической конференции с элементами научной школы молодых ученых «Биологическое разнообразие Кавказа и юга России». 2017. с. 644-645.
4. Канатъев С.В., Помогаева Т.В., Разинков В.П. Перспективы морского тралового промысла обыкновенной кильки в российской части Северного Каспия // Сохранение биологических ресурсов Каспия // Межд. науч.-практ. конф. Астрахань, 18-19 сентября 2014 г.: Материалы и доклады. Изд-во АГТУ, 2014, с. 62-71.
5. Современное состояние и перспективы развития промысла каспийских килек. Парицкий Ю.А., Асейнова А.А., Разинков В.П., Помогаева Т.В. /Вестник АГТУ №1/2018, с. 69-75.

#### **ALLOCATION OF FISHING FEATURES CLUSTERS OF SPRATS AND AN AVERAGE OF CASPIAN SEA IN SUMMER**

Pomogaeva Tatiana Vasilyevna, scientific sotr.

FGBNU "CaspNIRKh", Astrakhan, Russia,  
e-mail: pomogtatyana@mail.ru

*At present, the state of the reserves and the areas of formation of the accumulations of Caspian sprat are of great industrial interest. Hydroacoustic research helps to solve this problem. The Caspian sprat is a reserve target of the fishery. For a number of years during the hydroacoustic surveys, the region of the Middle Caspian was studied from the Dagestan coast, where clusters of sprat are observed eight months a year. Until recently, the deep-water part of the Middle Caspian remained unexplored.*

УДК 639.2.081.117.4

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИЗА КИДНОГО НЕВОДА В ГИДРОКАНАЛЕ ОАО «МАРИНПО»**

Соколова Елена Валерьевна, ассистент  
 Недоступ Александр Алексеевич, канд. техн. наук, доцент  
 Ботов Василий Владимирович, студент  
 Головин Евгений Романович, студент

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,  
 Калининград, Россия, e-mail: sokolovahelena@mail.ru

*Экспериментально исследовано влияние формы модели закидного невода на силу сопротивления  $R_x$  и коэффициент гидродинамического сопротивления  $c_x$  в зависимости от числа Рейнольдса  $Re$ . Получены экспериментальные данные натяжения крыла модели закидного невода, силы и коэффициента гидродинамического сопротивления от формы невода при разных числах Рейнольдса*

### **Введение**

Открытое акционерное общество «Морское научно-производственное объединение по промышленному рыболовству» (ОАО «МариНПО») является собственником гидроканала – сложного технического сооружения, заполненного водой и предназначенного для гидродинамических испытаний моделей активных орудий рыболовства (тралов, кошельковых и закидных неводов, сетей и др.) [1].

Исследование влияния геометрических параметров модели:

- отношения стрелы прогиба модели в горизонтальной плоскости к расстоянию между крыльями модели  $f/L$  (провис модели в горизонтальной плоскости);

- отношения расстояния между подборками модели к высоте сетной стенки модели в посадке  $\theta$  (провис модели в вертикальной плоскости);

а также числа Рейнольдса  $Re$  приводилось ранее в работе [2]. При этом отношение  $\theta$  равнялось 0,8.

*Таблица 1*

### **Характеристики модели закидного невода**

Параметр	Значение
Сплошность $F_0$	0,202
Длина модели в жгуте $l_{жс}$ , м	4,5
Высота модели в жгуте $h_{жс}$ , м	0,93
Длина модели в посадке $l$ , м	3

Параметр	Значение
Высота модели посадки $h$ , м	0,69
Диаметр нитки $d$ , м	$0,8 \cdot 10^{-3}$
Шаг ячеей $a$ , м	$8 \cdot 10^{-3}$
Количество ячеей по длине $n$ , шт.	280
Количество ячеей по высоте $m$ , шт.	58
Горизонтальный посадочный коэффициент $U_x$	0,67
Вертикальный посадочный коэффициент $U_y$	0,74

### Материалы и методика

Сначала измерения проводились при первом значении  $\theta$ .

Модель устанавливалась в гидроканале при первом значении отношения  $f/L$  (рис. 1). Поток воды разгонялся до скорости 0,35 м/с и затем постепенно замедлялся. Когда скорость потока снижалась до значений 0,3, затем 0,25 и 0,2 м/с фиксировалось значение натяжения  $T$ . Данный этап повторялся еще два раза.

Затем модель устанавливалась во второе, третье и четвертое значение отношения  $f/L$ . Значения натяжения при каждом отношении  $f/L$  фиксировалось тем же образом.

Затем эксперимент тем же образом проводился при втором и третьем значении отношения  $\theta$ .



Рис. 1. Общий вид модели, установленной в гидроканале

### Результаты

Получены экспериментальные данные натяжения крыла модели  $T$  в зависимости от отношения  $f/L$  и числа Рейнольдса (см. рис. 2 – рис. 4). Числам Рейнольдса 123; 153 и 184 для данной модели соответствуют значения скорости потока воды в гидроканале 0,2; 0,25 и 0,3 м/с.

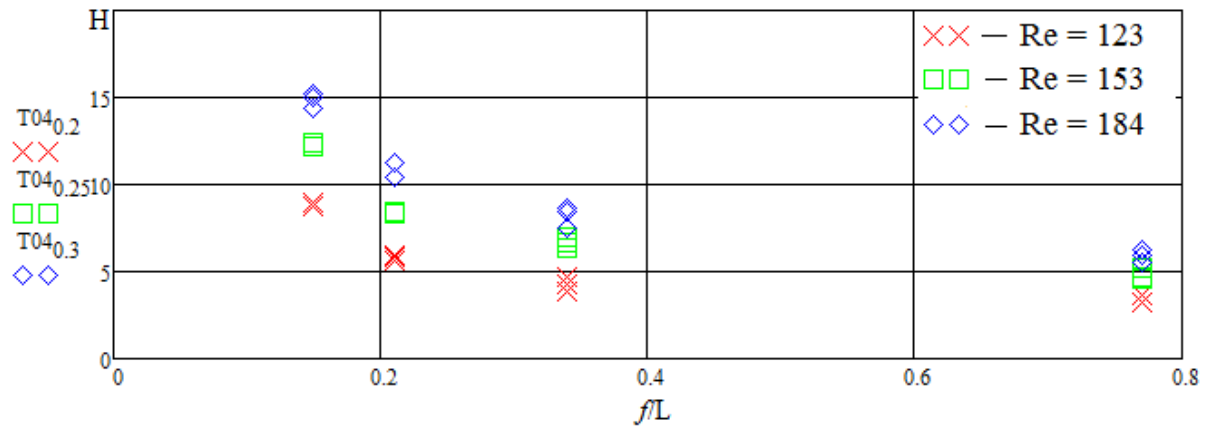


Рис. 2. Экспериментальные данные натяжения в зависимости от отношения  $f/L$  при вертикальном провисе  $\theta = 0,4$  и при числах Рейнольдса 123; 153 и 184

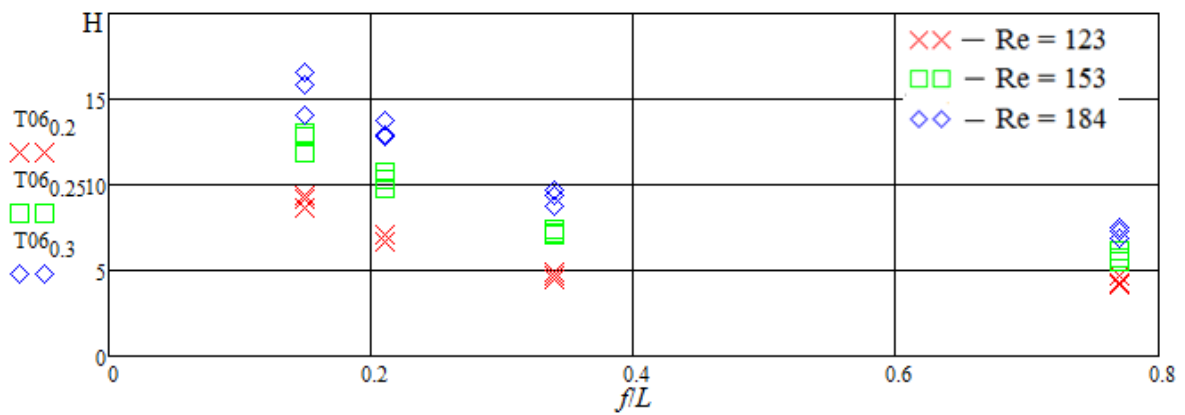


Рис. 3. Экспериментальные данные натяжения в зависимости от отношения  $f/L$  при вертикальном провисе  $\theta = 0,6$  и при числах Рейнольдса 123; 153 и 184

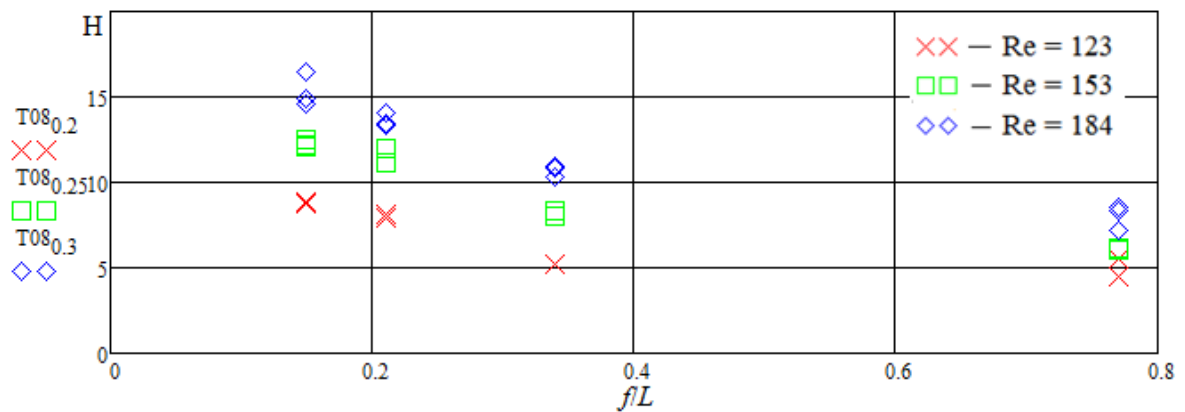


Рис. 4. Экспериментальные данные натяжения в зависимости от отношения  $f/L$  при вертикальном провисе  $\theta = 0,8$  и при числах Рейнольдса 123; 153 и 184

### Обработка экспериментальных данных

Полученные экспериментальные данные использовались для расчета силы сопротивления и коэффициента гидродинамического сопротивления модели.

Сила гидродинамического сопротивления модели определялась по формуле

$$R = 2T_{\text{пят.пр}}, \quad (1)$$

где:  $T_{\text{пят.пр}}$  – проекция натяжения в пятом крыле, которая определялась по формуле

$$T_{\text{пят.пр}} = T_{\text{пят}} \cdot \cos \alpha_{\text{пят}}, \quad (2)$$

где  $\alpha_{\text{пят}}$  – угол атаки пятого крыла в горизонтальной плоскости.

Угол атаки пятого крыла в горизонтальной плоскости показан на рис. 5. В таблице 2 представлены значения углов атаки модели закидного невода.

Коэффициент гидродинамического сопротивления определялся по формуле

$$c_x = \frac{2R}{\rho v^2 F_{\text{ниток}}}, \quad (3)$$

где:  $\rho$  – плотность воды в гидроканале  $1023 \text{ кг/м}^3$ ;

$v$  – скорость потока воды в гидроканале;

$F_{\text{ниток}}$  – площадь ниток модели  $0,416 \text{ м}^2$ .

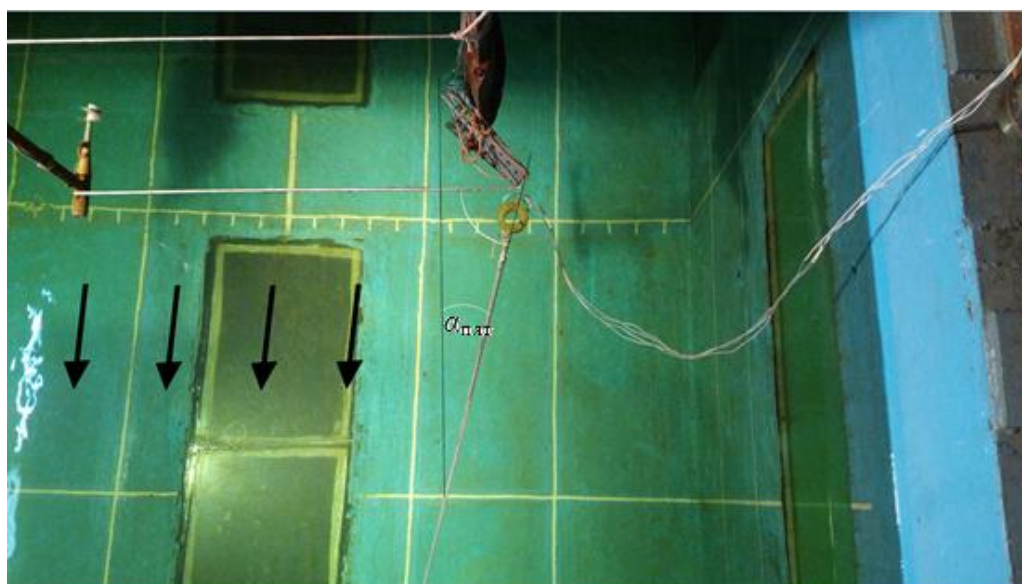


Рис. 5. Угол атаки пятого крыла в горизонтальной плоскости  $\alpha_{\text{пят}}$

Таблица 2

Значения углов атаки пятого крыла в горизонтальной плоскости  $\alpha_{\text{пят}}$   
(в градусах)

$v$ , м/с	$f/L = 0,15$			$f/L = 0,21$			$f/L = 0,34$			$f/L = 0,77$		
	$\theta=0,4$	$\theta=0,6$	$\theta=0,8$	$\theta=0,4$	$\theta=0,6$	$\theta=0,8$	$\theta=0,4$	$\theta=0,6$	$\theta=0,8$	$\theta=0,4$	$\theta=0,6$	$\theta=0,8$
0,20	64,5	53	51	48	51,5	55	34	31,5	28,5	14	12	14
0,25	63	52	50	48	49	50	33	31	28	14	12	13
0,30	61,5	50,5	48,5	47,5	46,5	45,5	32	30,5	27,5	13	12	12

На рис. 6 – рис.11 показаны расчетные значения силы и коэффициента гидродинамического сопротивления в зависимости от отношения  $f/L$  при вертикальном провисе  $\theta = 0,8$  и при числах Рейнольдса 123; 153 и 184.

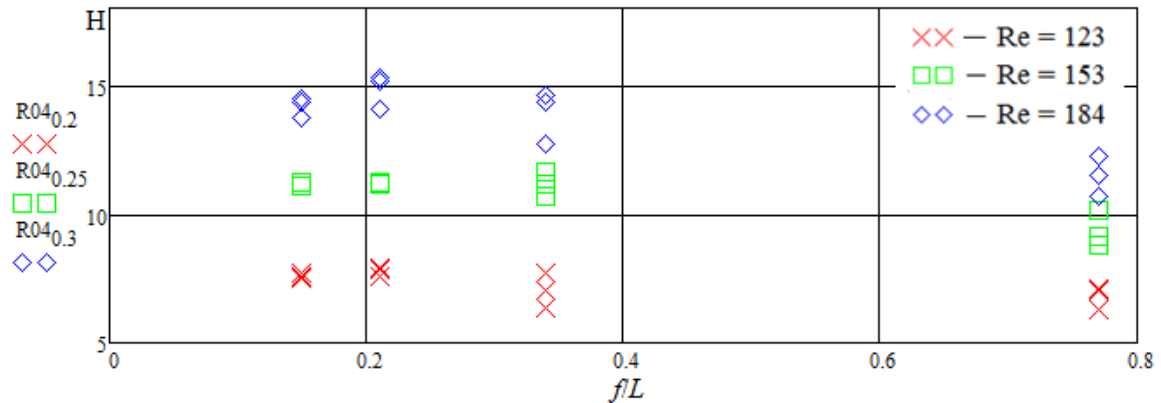


Рис.6. Расчетные значения силы гидродинамического сопротивления в зависимости от отношения  $f/L$  при вертикальном провисе  $\theta = 0,4$  и при числах Рейнольдса 123; 153 и 184

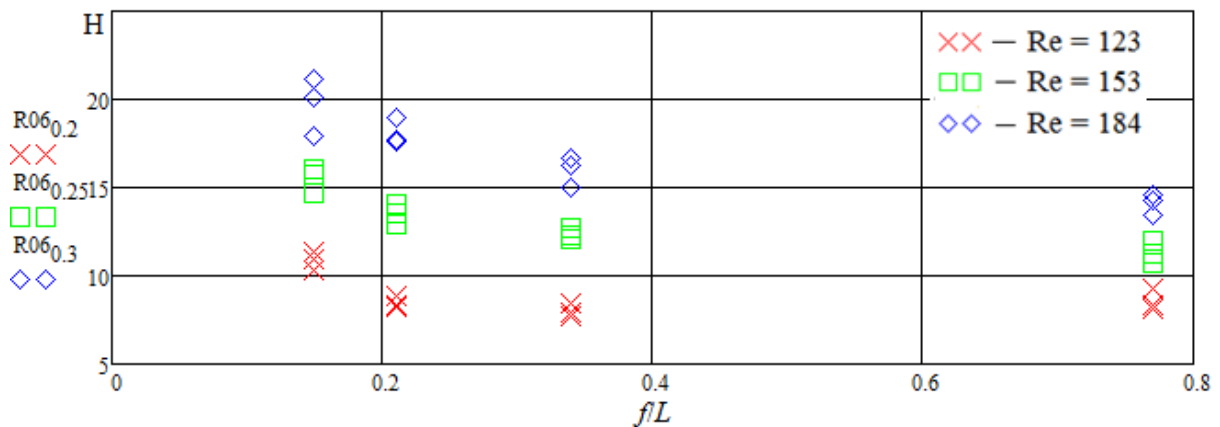


Рис.7. Расчетные значения силы гидродинамического сопротивления в зависимости от отношения  $f/L$  при вертикальном провисе  $\theta = 0,6$  и при числах Рейнольдса 123; 153 и 184

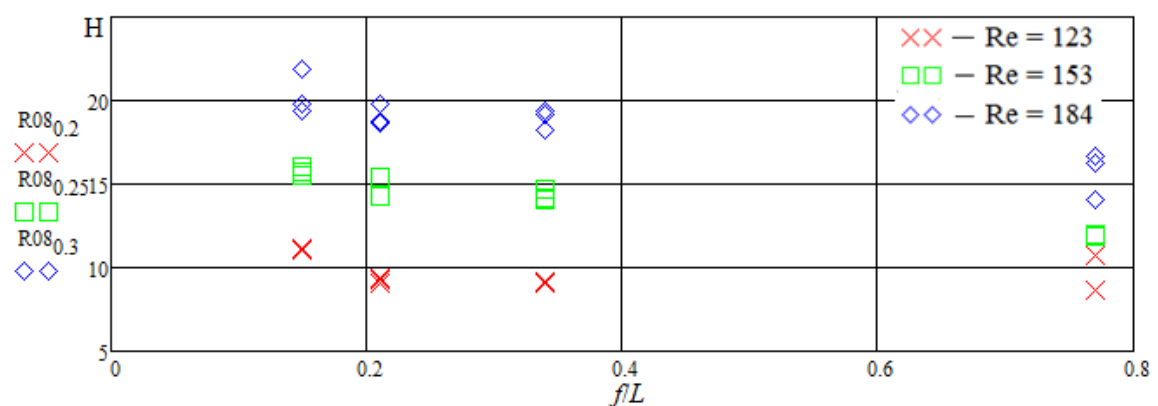


Рис.8. Расчетные значения силы гидродинамического сопротивления в зависимости от отношения  $f/L$  при вертикальном провисе  $\theta = 0,8$  и при числах Рейнольдса 123; 153 и 184

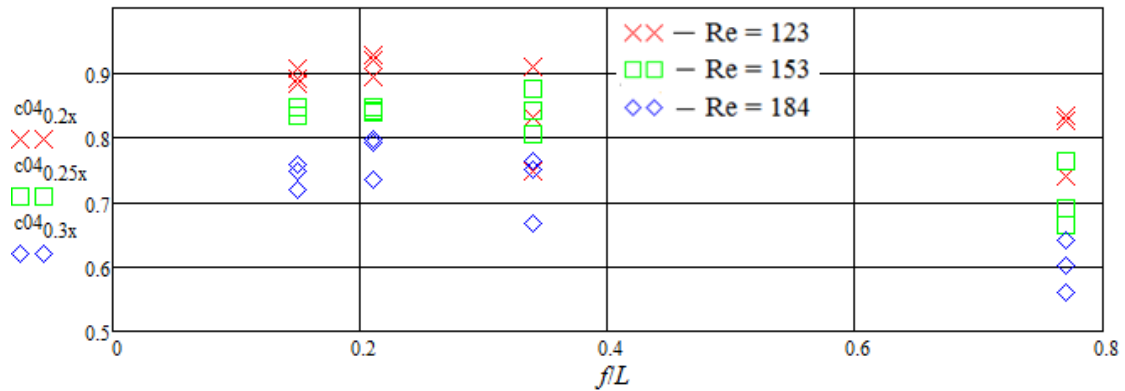


Рис.9. Расчетные значения коэффициента гидродинамического сопротивления в зависимости от отношения  $f/L$  при вертикальном провисе  $\theta = 0,4$  и при числах Рейнольдса 123; 153 и 184

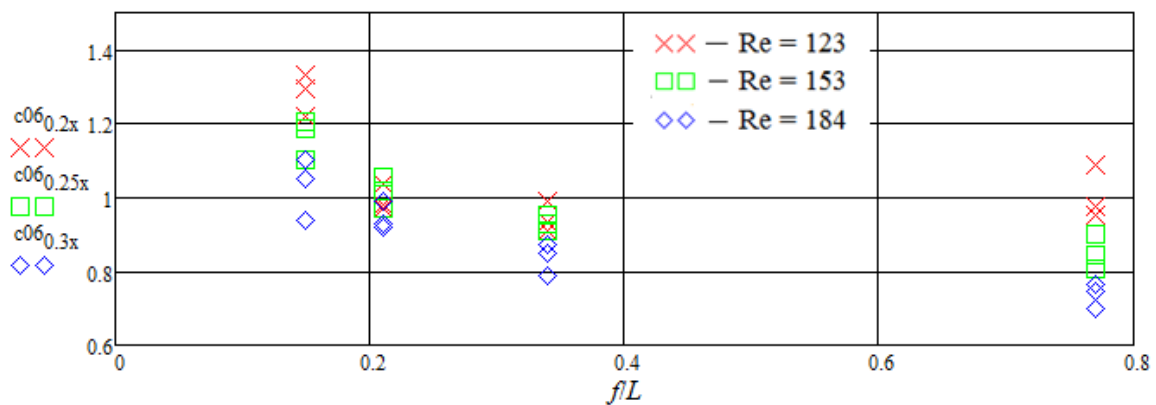


Рис.10. Расчетные значения коэффициента гидродинамического сопротивления в зависимости от отношения  $f/L$  при вертикальном провисе  $\theta = 0,6$  и при числах Рейнольдса 123; 153 и 184

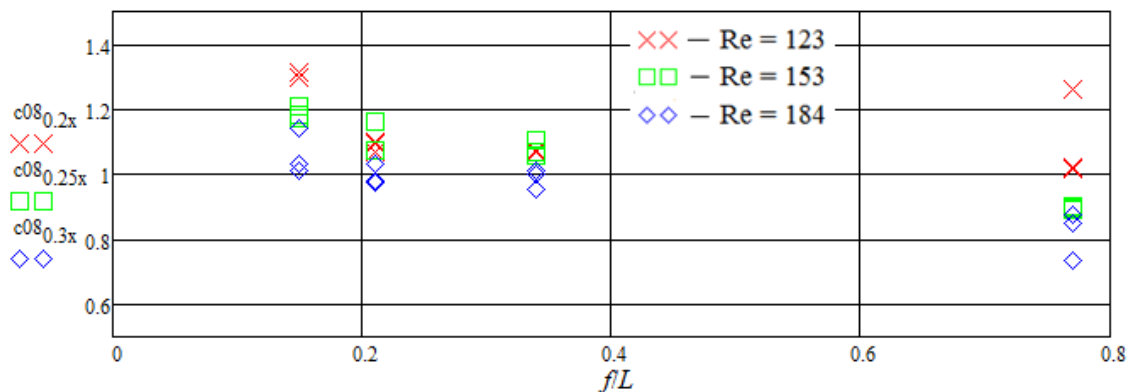


Рис.11. Расчетные значения коэффициента гидродинамического сопротивления в зависимости от отношения  $f/L$  при вертикальном провисе  $\theta = 0,8$  и при числах Рейнольдса 123; 153 и 184

## Выводы

В результате эксперимента с моделью закидного невода:

1 Получены экспериментальные значения натяжения в крыле модели в зависимости от отношения  $f/L$  и значения вертикального провиса  $\theta$  и при числах Рейнольдса 123; 153 и 184.

2 Проведена обработка полученных экспериментальных значений натяжений. Получены значения силы и коэффициента гидродинамического сопротивления в зависимости от отношения  $f/L$  и значения вертикального провиса  $\theta$  и при числах Рейнольдса 123; 153 и 184.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курляндский, Ю.М. Гидроканал ОАО «МариНПО» / Ю.М. Курляндский // Международная научно-практическая конференция, посвященная 85-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки и техники Российской Федерации Фридмана Александра Львовича и 95-летию со дня основания кафедры промышленного рыболовства (20-21 мая): материалы / ФГБОУ ВПО «КГТУ». – Калининград, 2010. – С.344-350.
2. Недоступ, А.А. Экспериментальные исследования геометрических и силовых характеристик модели закидного невода / А.А. Недоступ, Е.В. Соколова // Вестник АГТУ. Серия: Рыбное хозяйство. – 2013. - № 2. – С. 122 – 129.

### **EXPERIMENTAL RESEARCH OF BEACH SEINE MODEL IN THE HYDROCANAL OF OPEN JOINT STOCK COMPANY "MARINE SCIENTIFIC INDUSTRIAL ASSOCIATION FOR INDUSTRIAL FISHERIES"**

Sokolova Elena Valeriyevna, assistant  
Nedostup Aleksandr Alekseyevich, PhD, docent  
Botov Vasilii Vladimirovich, student  
Golovin Evgeniy Romanovich, student

Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,  
e-mail: sokolovahelena@mail.ru

*The influence of the shape of the beach seine model on the resistance force  $R_x$  and the coefficient of hydrodynamic resistance  $c_x$  as a function of the Reynolds number  $Re$  is studied experimentally. Experimental data are obtained for the wing tension of the beach seine model, the force and the coefficient of hydrodynamic resistance from the shape of the seine at different Reynolds numbers.*



**СЕКЦИЯ «РАДИОФИЗИКА, РАДИОТЕХНИКА  
И ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ»**

**SECTION "APPLIED RADIOPHYSICS, RADIO ENGINEERING  
AND INFORMATION SECURITY"**

УДК 621.396

**РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛА  
С НЕИЗВЕСТНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ**

Власова Ксения Валерьевна, канд. физ.-мат. наук, доцент  
Пахотин Валерий Анатольевич, д-р физ.-мат. наук, профессор  
Молостова Светлана Валерьевна, канд. физ.-мат. наук, доцент  
Симонов Роман Валерьевич, аспирант

Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота  
ФГБОУ ВО «КГТУ», Калининград, Россия, e-mail: p\_ksenia@mail.ru  
ФГАОУ «Балтийский федеральный университет им. И. Канта»,  
Калининград, Россия, e-mail: VPakhotin@kantiana.ru; SMolostova@kantiana.ru;  
rsvv20@yandex.ru

*Представлена оригинальная методика решения задачи обнаружения сигнала с неизвестными параметрами. Порог обнаружения устанавливается по критерию Неймана-Пирсона, основываясь на знании дисперсии шума в принятой реализации. Дисперсия шума оценивается по значению функционала правдоподобия в минимуме. Представлен алгоритм решения, основные аналитические выражения, а также результаты модельных исследований*

В системах локации задача обнаружения сигналов, отраженных от цели, решается математически точно при полностью известных параметрах сигналов. Неизвестен лишь факт наличия сигнала в принятом сообщении [1-6]. Согласно теории, в этом случае вероятность обнаружения сигнала зависит от отношения сигнал/шум. Кривые обнаружения позволяют сравнивать различные алгоритмы обнаружения по эффективности. Однако такое решение является теоретическим, и его трудно использовать в системах локации, когда параметры сигналов являются неизвестными. В настоящей работе предлагается новый алгоритм решения задачи обнаружения сигналов. Он характеризуется тем, что меняется структура оптимального приемника. В результате дисперсия выходной функции оказывается зависящей лишь от дисперсии шума, и пороговый уровень может быть установлен по критерию Неймана-Пирсона в условиях отсутствия сигнала в принятом сообщении. Это позволяет для решения задачи обнаружения использовать результат корреляционной обработки принятого сообщения. Превышение максимума корреляционной функции установленного порогового уровня является условием обнаружения как одного, так и совокупности сигналов. При этом необходимое значение дисперсии шума оценивается по значению минимума функционала правдоподобия.

Запишем принятую реализацию в виде

$$\hat{y}(t) = \hat{U}_0 e^{i\omega_0(t-t_0)} + \hat{U}_{\text{ш}}(t), \quad (1)$$

где  $\hat{U}_0$  – комплексная амплитуда сигнала;

$\omega_0$  – круговая частота сигнала;

$t_0$  – время приема сигнала;

$\hat{U}_{\text{ш}}(t)$  – аддитивный шум, с нормальным распределением квадратурных компонент, дисперсией  $\sigma^2$  и интервалом корреляции  $\tau_k$ .

Запишем логарифм функции правдоподобия на основании (1)

$$\ln(L(\hat{U}'_0, t'_0)) = -\frac{1}{2\sigma^2\tau_k} \int_0^T |\hat{y}(t) - \hat{U}'_0 e^{i\omega_0(t-t'_0)}|^2 dt. \quad (2)$$

Дифференцируя (2) по  $\hat{U}'_0$  и приравнявая дифференциал к нулю, получим функциональную зависимость

$$q(t'_0) = \hat{U}(t) = \frac{1}{T} \int_0^T \hat{y}(t) e^{i\omega_0(t-t'_0)} dt, \quad (3)$$

где  $q(t'_0)$  – выходная функция корреляционного приемника обнаружителя сигнала, зависящая от оценки времени приема.

Процесс минимизации функции риска в этом случае сводится к перебору оценки времени приема  $t'_0$ . В точке  $t'_0 = t_0$  математическое ожидание  $M(q(t'_0)) = \hat{U}$ . Достигается максимум корреляционной функции, и функция риска будет минимальной. Выходная функция в (3) отличается от подобной ей в (2) отсутствием в выражении амплитуды сигнала. Это изменение существенно в связи с тем, что случайная величина  $q(t'_0)$  в (3) в точке  $t'_0 = t_0$  имеет дисперсию, не зависящую от амплитуды сигнала

$$D_q = M(q(t'_0 = t_0) - M(q(t'_0 = t_0)))^2 = \frac{\sigma^2}{N}, \quad (4)$$

где  $N$  – количество некоррелированных отсчетов шума на интервале обработки.

Дисперсия выходной функции  $q(t'_0)$  зависит лишь от дисперсии шума. Следовательно, пороговый уровень может быть определен без знания энергии сигнала (амплитуды сигнала) при использовании критерия Неймана-Пирсона

$$h_q = \frac{\sigma}{N} \Phi^{-1}(P_{\text{л.гр}} = A). \quad (5)$$

Структура выражения (5) вполне понятна:

$\sigma$  – среднеквадратическое значение шума (СКО) на входе приемника;

$\frac{\sigma}{N}$  – СКО шума на выходе приемника;

обратная функция  $\Phi^{-1}(x)$  определяет необходимое увеличение значения порога над уровнем шума.

Если установить два пороговых уровня  $h_{1q} = \frac{3\sigma}{N}$  и  $h_{2q} = \frac{4\sigma}{N}$ , то вероятность ложной тревоги, то есть превышения шумовых максимумов второго порогового уровня, будет практически исключена. В максимуме корреляционной функции значение  $q$  равно оценке амплитуды сигнала  $\hat{U}'_0$ . При приеме одной реализации и превышении максимума корреляционной функции второго порогового уровня, можно говорить о факте обнаружения сигнала. Термин вероятность обнаружения можно использовать лишь при наличии множества принятых реализаций. Однако вероятность обнаружения относительно множества принятых реализаций практического смысла не имеет. При наличии двух, трех и так далее принятых реализаций их совместная обработка уменьшает СКО шума в  $\sqrt{N}$  раз. Следовательно, факт обнаружения сигнала при обработке  $N$  реализаций увеличивается.

Отметим, что дисперсия шума  $\sigma^2$  определяется по минимуму преобразованного функционала правдоподобия (6)

$$\Delta(t'_0) = \int_0^T |\hat{y}(t)|^2 dt - \hat{U}'_0(t'_0) \int_0^T \hat{y}^*(t) e^{-i\omega_0(t-t'_0)} dt. \quad (6)$$

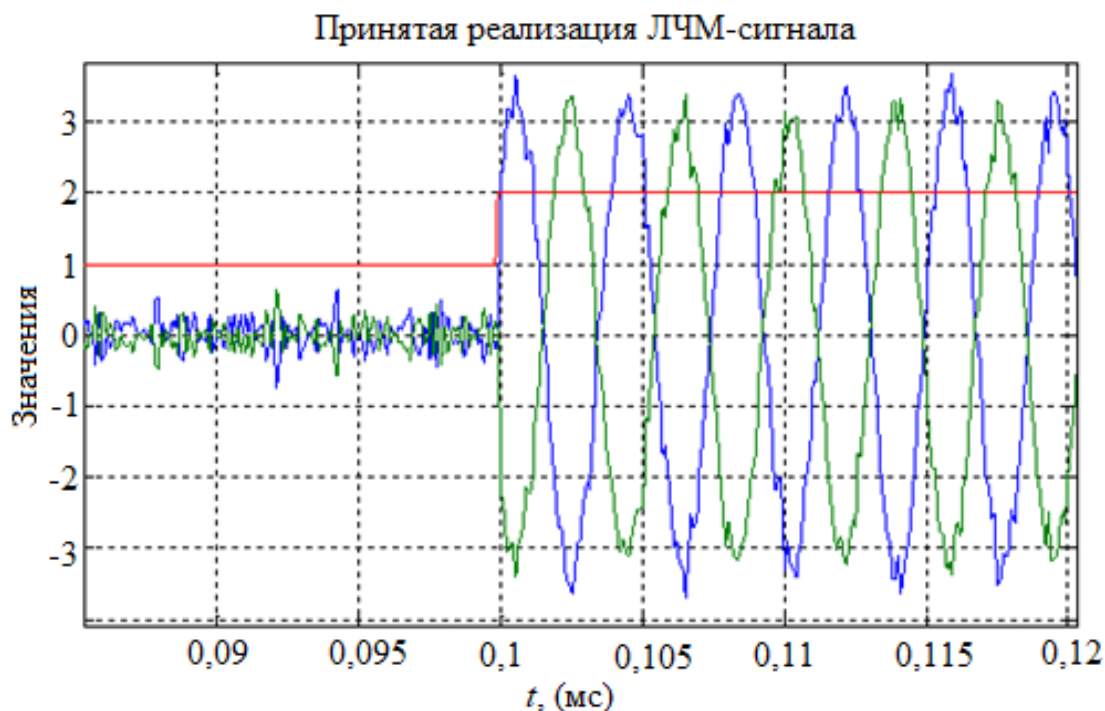
Математическое ожидание

$$M(\Delta(t'_0 = t_0)) = \int_0^T M|\hat{y}(t)|^2 dt - \hat{U}'_0(t'_0 = t_0) \int_0^T M(\hat{y}^*(t)) e^{-i\omega_0(t-t'_0)} dt = \sigma^2 T. \quad (7)$$

В системах локации, как правило, используются сложные антенные решетки, состоящие из большого количества элементарных вибраторов. Считая предыдущее изложение теории относящимся к обработке данных на одном вибраторе, представим пространственную обработку сигнала. Максимумы корреляционных функций определяют распределение комплексных амплитуд на вибраторах и время приема ЛЧМ-сигнала  $t'_0$ . Однако для решения задачи обнаружения сигнала этот максимум может оказаться недостаточным. Он может быть меньше или на уровне шумовых максимумов. В связи с этим, выделим модуль корреляционной функции. Максимум модуля корреляционной функции определяет время приема ЛЧМ-сигнала и практически не меняется от вибратора к вибратору. С другой стороны, модуль определяет амплитуды на вибраторах. Следовательно, модули корреляционных функций на вибраторах можно складывать. В результате, при некоррелированных шумах на разных вибраторах, отношение сигнал/шум возрастает в  $\sqrt{N}$  раз ( $N$  – количество вибраторов). После суммирования запишем выражение, нормированное на количество вибраторов  $N$

$$\hat{U}'_1(t'_0) = \frac{1}{N} \frac{1}{T} \left| \int_{t'_0}^{t'_0+T} \hat{Y}(t, x_n, y_n) e^{-i(\omega_0 + A(t-t'_0))(t-t'_0)} dt \right|. \quad (8)$$

Модельные расчеты подтверждают вышеприведенное. На рисунке 1 показана принятая реализация, полученная с помощью первого и восьмого вибраторов вертикальной линейки. Время приема ЛЧМ-сигнала равно 0,1 мс.



*Рис. 1. Сравнение реализаций первого и восьмого вибраторов. Разность фаз при угле места  $20^{\circ}$  изменилась на  $180^{\circ}$ . Однако время приема ЛЧМ сигнала на первом и восьмом вибраторах практически одинаковое*

Как видно из рисунка, фазовые значения сигналов на первом и восьмом вибраторах различны, однако время приема одинаково. Это позволяет суммировать модули принятых сообщений на совокупности вибраторов.

На рисунке 2 сопоставлены две корреляционные функции принятого сообщения. Первая корреляционная функция относится к первому вибратору. Вторая корреляционная функция относится к сумме восьми корреляционных функций, полученных на восьми вибраторах вертикальной линейки. Отмечается уменьшение СКО шума на 6,4 дБ (в 2,1 раза). Согласно теории, должно быть уменьшение в  $\sqrt{8}$  раз  $\sim 2,8$  (8,9 дБ). Небольшое несоответствие можно объяснить малым интервалом обработки. Таким образом, получен важный новый результат. Доказано с помощью модельных расчетов, что в системах локации можно суммировать модули корреляционных функций, полученных на  $N$  вибраторах антенной системы. Эта операция выполняется «вслепую», то есть без определения местоположения отдельного модуля корреляционной функции. Это в свою очередь позволяет кардинально изменить схему обработки. Вместо решения задачи обнаружения в отдельных объемах разрешения, суммируются модули корреляционных функций принятых сообщений, относящихся к  $N$  вибраторам. В результате в  $\sqrt{N}$  раз возрастает отношение сигнал/шум и вполне возможно обнаружение максимума корреляционной функции.

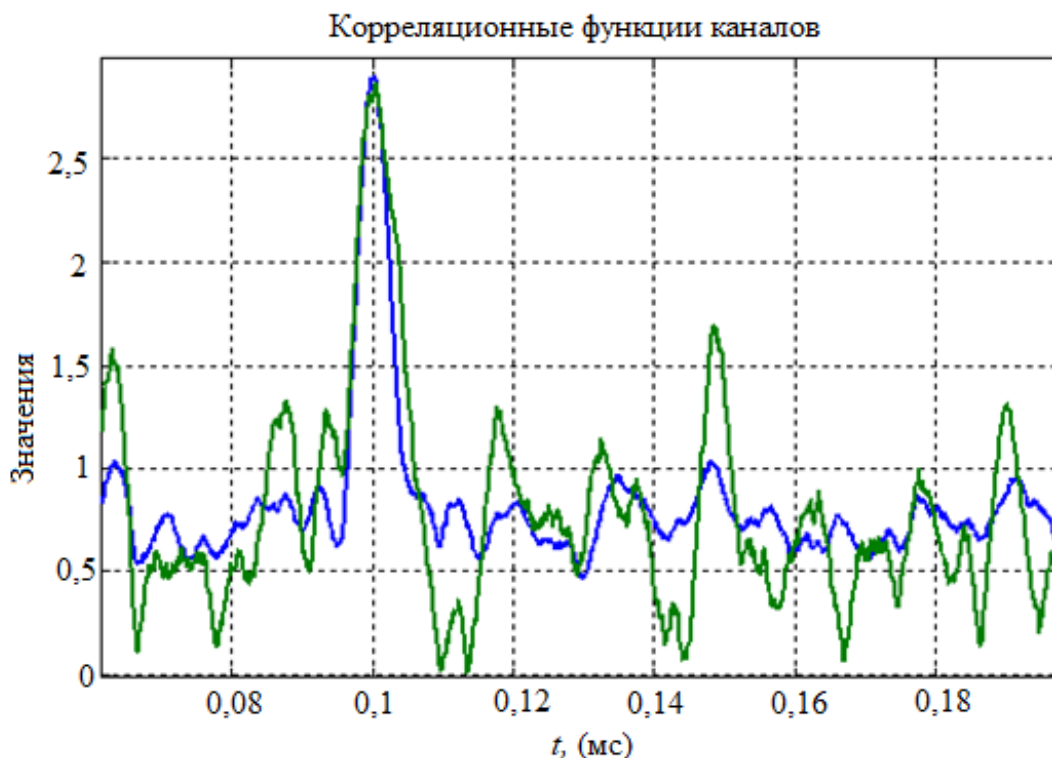


Рис. 2. Сопоставление модулей двух корреляционных функций: модуль корреляционной функции 1-го канала и модуль суммарной корреляционной функции всех 8-ми каналов

На рисунке 3 показан результат сложения модулей корреляционных функций принятых сообщений на восьми вибраторах вертикальной линейки. Отношение сигнал/шум равно -35 дБ. Шум в каждом канале (отдельные вибраторы) независим. Коэффициенты взаимной корреляции шума между каналами равны нулю. Корреляционная обработка в каждом канале сигнала ЛЧМ создает узкие корреляционные функции с полушириной 5 мкс. Модули корреляционных функций в каналах суммируются. В результате создается реализация шума с тремя суммарными модулями корреляционных функций (время приема 0,1 мс; 0,2 мс; 0,5 мс). На рисунке отмечено среднее значение шума, пороговый уровень, равный , и второй пороговый уровень .

Корреляционные функции трех сигналов с временами приема 0,1 мс, 0,2 мс, 0,5 мс значительно превышают второй пороговый уровень. Следовательно, три сигнала обнаружены. В отдельных каналах максимумы корреляционных функций уменьшаются более чем в два раза. Они не превышают даже первый пороговый уровень. Исходя из данного рисунка, фиксируется время приема трех сигналов и дальнейшая обработка для оценки азимута и угла места сигналов проводится при учете оценок времени приема этих сигналов. В дальнейшем операцию сложения модулей корреляционных функций на вибраторах будем называть технологией сложения модулей. Она позволяет максимально увеличить отношение сигнал/шум при использовании  $N$  вибраторов антенной системы.

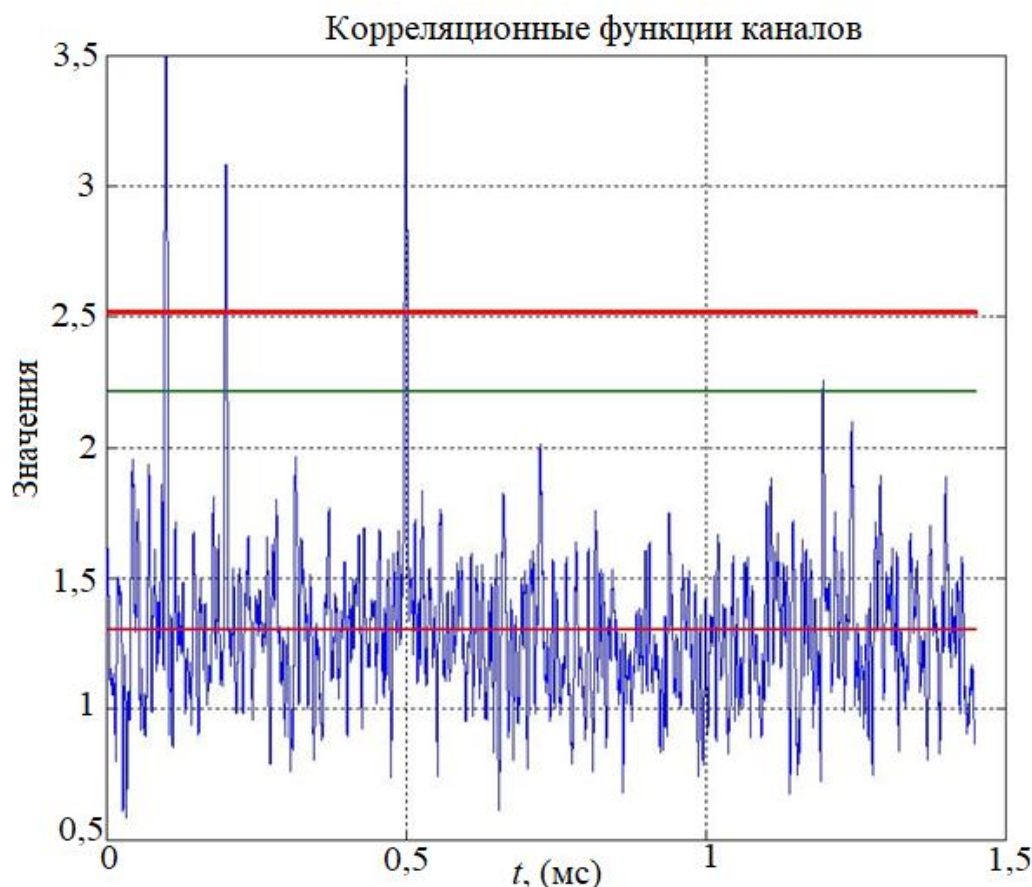


Рис.3. Результат решения задачи обнаружения трех сигналов с одинаковыми амплитудами  $U = 2$

Таким образом, в настоящей работе была представлена новая технология решения задачи обнаружения сигнала с неизвестными параметрами. Основой является определение порогового уровня в отсутствии сигнала в принятом сообщении и использование метода суммирования модулей корреляционных функций в каналах получения информации на вибраторах. Указанная технология может быть применена не только к каналам антенной системы, но и к последовательностям принятых реализаций, и к разным поляризационным каналам.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перов А.И. Статистическая теория радиотехнических систем. М.: Радиотехника, 2003. – 400 с.
2. Тихонов В. И. Оптимальный прием сигналов. М.: Радио и связь, 1983.-320 с.
3. Хелстром К. Статистическая теория обнаружения сигналов. К.; Изд-во: М.: Иностранной литературы, 1963. - 432 с.
4. Левин Б.Р. Теория случайных процессов и ее применение в радиотехнике, М.: Советское радио, 1957. - 664 с.
5. Трифонов А.П. Приём сигнала с неизвестной длительностью на фоне белого шума. Радиотехника и электроника. 1977. Т.22. № 1. С.435–438
6. Трифонов А. П., Шинаков Ю.С. Совместное различение сигналов и оценка их параметров на фоне помех. М.: Радио и связь, 1986. - 264 с.

## THE SOLUTION TO THE PROBLEM OF SIGNAL DETECTION WITH UNKNOWN PARAMETERS

Vlasov Kseniya Valerievna, Candidate of Physico-Mathematical Sciences,  
associate Professor  
Pakhotin Valery Anatolyevich, Doctor of physical and mathematical sciences, Professor  
Molostova Svetlana Valerievna, candidate of Physico-Mathematical Sciences,  
associate Professor  
Simonov Roman Valerievich, postgraduate student

Baltic fishing fleet state academy FSBEI HE "KSTU", Kaliningrad, Russia,  
e-mail: p\_ksenia@mail.ru  
Baltic federal university of I. Kant, Kaliningrad, Russia,  
e-mail: VPakhotin@kantiana.ru; SMolostova@kantiana.ru; rsvv20@yandex.ru

*In this paper we present an original technique for solving the problem of detecting a signal with unknown parameters. The detection threshold is determined by the Neumann-Pearson criterion, based on the knowledge of the variance of noise in the adopted implementation. The noise variance is estimated from the value of the Likelihood functional at the minimum. The paper presents a solution algorithm, basic analytical expressions, and also results of model studies.*

УДК: 621.396.677

## МОДЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПОЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ДВУХЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ КАССЕГРЕНА В РАМКАХ АПЕРТУРНОГО И ТОКОВОГО МЕТОДОВ

Волхонская Елена Вячеславовна, доцент, д-р техн. наук  
Коротей Евгений Владимирович, доцент

Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота  
ФГБОУ ВО «КГТУ», Калининград, Россия,  
email: volkhonskaya\_e@mail.ru; eugeny\_korotey@mail.ru

*Представлены результаты имитационного моделирования поля излучения и расчета характеристик излучения двухзеркальной антенны Кассегрена с логопериодическим облучателем в рамках апертурного и токового методов. Впервые применен метод поверхностных токов к расчету антенн двухзеркальной структуры. Установлено, что апертурный метод дает завышенные результаты при определении КНД, КИП и максимального УБЛ и заниженные результаты для ширины ДН*

Антенные системы зеркального типа находят широкое применение в составе комплексов радиолокации, радиотелеметрии, спутниковой радиосвязи и радионавигации, радиовещания и телевидения. Качество разрешения сигналов от отдельных объектов и уровень принимаемого сигнала напрямую зависят от характеристик данных антенн и, в частности, от формы пространственной амплитудной характеристики направленности (АХН).

В зависимости от области применения зеркальные антенны могут иметь различную форму зеркала (параболоид вращения, усеченный парабоид, параболический цилиндр, цилиндр специального профиля, сферический сегмент), быть однозеркальными или двухзеркальными (Кассегрена или Грегори), прямофокусными или офсетными, иметь различный диаметр зеркала (от 0,4 – 0,6 м для систем спутникового телевидения и радиолокационных станций до 30 – 32 м для систем спутниковой и космической связи) и широкий набор облучателей (вибраторные, рупорные, открытые излучающие концы волноводов и пр.). Столь широкий спектр конструктивного исполнения зеркальных антенн и многообразия типов облучателей диктует необходимость проведения предварительных модельных исследований их параметров на первом этапе опытно-конструкторских разработок.

К антенным системам предъявляют стандартизованные требования. Так к антеннам земных станций спутниковой связи с диаметром зеркала  $D_0$ , работающим на длине волны  $\lambda$ , предъявляются следующие предельно допустимые значения основных параметров [1]:

- коэффициент усиления  $G \geq 20 \cdot \lg\left(\frac{D_0}{\lambda}\right) + 7$ , дБи;
- ширина главного лепестка диаграммы направленности (ДН) по уровню половинной мощности  $\Delta\theta_{0,5} \leq \frac{68\lambda}{D_0}$ , град;
- относительный уровень первого бокового лепестка – не более -14 дБ.

При выборе диаметра зеркала от 6 до 16 м верхняя граница допустимого значения ширины ДН колеблется в пределах:

- L диапазон (1 – 2 ГГц): 1,7 – 3,4 град (при диаметре 6 м) и 0,64 – 1,28 град (при диаметре 16 м);
- S диапазон (2 – 4 ГГц): 0,85 – 1,7 град (при диаметре 6 м) и 0,32 – 0,64 град (при диаметре 16 м);
- C диапазон (4 – 8 ГГц): 0,42 – 0,85 град (при диаметре 6 м) и 0,16 – 0,32 град (при диаметре 16 м);
- X диапазон (8 – 12 ГГц): 0,28 – 0,42 град (при диаметре 6 м) и 0,11 – 0,16 град (при диаметре 16 м);
- Ku диапазон (12 – 18 ГГц): 0,19 – 0,28 град (при диаметре 6 м) и 0,07 – 0,11 град (при диаметре 16 м).

Таким образом, с повышением рабочей частоты и диаметра зеркала требуемая ширина ДН значительно уменьшается, причем не только по уровню половинной мощности, но и по уровню нулевого излучения. Поэтому при анализе направленных свойств зеркальной антенны на стадии ее проектирования актуальным представляется решение задачи получения как можно более точных оценок ее полевых характеристик.

В инженерной практике для расчета АХН и оценки параметров апертурных антенн широко применяется апертурный метод [2]. Его суть сводится к замене действия зеркальной антенны действием излучающей площадки, эквивалентной раскрытию зеркала. При этом задача определения поля излучения в дальней зоне разбивается на два этапа: 1) нахождение распределения поля на поверхности раскрытия на основе известной амплитудной характеристики направленности облучателя; 2) нахождение поля излучения в дальней зоне по методу эквивалентных токов [3]. При расчете поля излучения двухзеркальных антенн [2] совместное действие рефлектора (основного зеркала) и контррефлектора (вспомогательного зеркала) заменяется действием одного зеркала с вырезом в центре, учитывающим эффект затенения рефлектора контррефлектором, а расчет проводится по той же методике. Однако, как указано в [3], область применения апертурного метода весьма ограничена и не распространяется на случаи определения поля излучения в чистом виде, особенно в областях геометрической тени и геометри-



ческой точки фокуса. Альтернативой данному методу является метод поверхностных токов [3], основанный на связи компонент вектора напряженности электрического поля с компонентами вектора излучения, определяемыми плотностью электрических токов на поверхности зеркала.

**Целью данной работы** является сравнение характеристик излучения, определенных апертурным методом и методом поверхностных токов на примере двухзеркальной антенны Кассегрена с облучателем в виде логопериодической антенны (ЛПА) печатного исполнения [4], функционирующей в диапазоне Ku (рисунок 1).

**На первом этапе** данной работы на основе **метода поверхностных токов** впервые проведен расчет распределения наведенных токов на поверхности контррефлектора в виде гиперboloида вращения и его АХН в дальней зоне. Математическая модель компонент плотности поверхностных токов, наведенных на контррефлекторе, была определена выражениями вида (1):

$$\begin{cases} j_{x2} = 2\dot{H}_\varphi(\alpha_2, \beta_2)(\sin(\eta) \sin(\xi_2) \sin(\beta_2) + \cos(\eta) \cos(\beta_2)), \\ j_{y2} = -2\dot{H}_\varphi(\alpha_2, \beta_2)\sin(\eta) \cos(\xi_2) \sin(\beta_2), \\ j_{z2} = 2\dot{H}_\varphi(\alpha_2, \beta_2) \sin(\eta) \cos(\xi_2) \cos(\beta_2), \end{cases} \quad (1)$$

где  $j_{x2}$ ,  $j_{y2}$  и  $j_{z2}$  – компоненты плотности поверхностных токов, наведенных на контррефлекторе облучателем;

$\dot{H}_\varphi(\alpha_2, \beta_2)$  – комплексная амплитуда азимутальной компоненты напряженности магнитного поля, создаваемого облучателем в месте расположения элементарной площадки на поверхности контррефлектора;

$(\alpha_2, \beta_2)$  – сферические углы, задающие направление на данную площадку из фокуса  $F_1$  (см. рисунок 1);

$(\eta, \xi_2)$  – сферические углы, задающие направление внешней нормали к элементарной площадке относительно фокальной оси  $OF_2$  и оси, перпендикулярной ей.

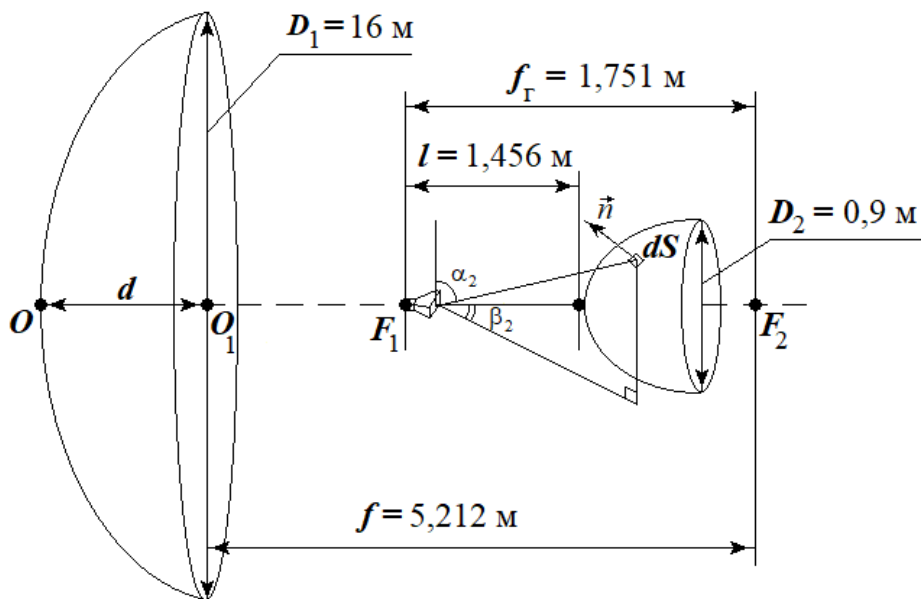


Рис. 1. Схематичное изображение зеркальной антенны Кассегрена с указанием геометрических размеров

Комплексная амплитуда азимутальной компоненты напряженности магнитного поля  $\dot{H}_\varphi(\alpha_2, \beta_2)$  связана с комплексной амплитудой меридиональной компоненты напряженности электрического поля выражением (2) вида:

$$\dot{H}_\varphi(\alpha_2, \beta_2) = \frac{\dot{E}_\theta(\alpha_2, \beta_2)}{120\pi}, \quad (2)$$

где  $\dot{E}_\theta(\alpha_2, \beta_2)$  – комплексная амплитуда меридиональной компоненты напряженности электрического поля.

Зависимость  $\dot{E}_\theta(\alpha_2, \beta_2)$  для ЛПА определяется выражением (3) вида [5]:

$$\dot{E}_\theta(\alpha_2, \beta_2) = \sum_{k=1}^N \left( \frac{60 \cdot i \cdot \dot{I}_{mk}}{\sin(\beta_0 l_k)} \cdot \frac{\cos(\beta_0 l_k \cos(\alpha_2) \sin(\beta_2)) - \cos(\beta_0 l_k)}{\sqrt{1 - (\cos(\alpha_2) \sin(\beta_2))^2}} \cdot \frac{e^{-i\beta_0 r_k}}{r_k} \right), \quad (3)$$

где  $N$  – число элементов ЛПА;

$i$  – мнимая единица;

$\dot{I}_{mk}$  – комплексная амплитуда клеммного тока  $k$ -ого элемента ЛПА;

$\beta_0$  – волновое число;

$l_k$  – длина плеча  $k$ -ого элемента ЛПА;

$r_k$  – расстояние от  $k$ -ого элемента ЛПА до точки наблюдения, определяемое выражением (4) вида:

$$r_k = \sqrt{\rho_2^2 + s_k^2 - 2\rho_2 s_k \cos(\psi_2)}, \quad (4)$$

где  $\rho_2$  – расстояние от клемм первого элемента ЛПА до точки наблюдения;

$s_k$  – расстояние от клемм первого элемента ЛПА до клемм  $k$ -ого элемента ЛПА;

$\psi_2$  – угол между фокальной осью  $OF_2$  и направлением на точку наблюдения.

Для проведения модельных исследований был осуществлен переход (5) к полярным координатам в плоскости раскрыва контррефлектора  $(R_2, \xi_2)$ :

$$\rho_2 = \frac{R_2}{\sin(\psi_2)}, \quad \cos(\alpha_2) = \cos(\xi_2) \sin(\psi_2), \quad \cos(\beta_2) = \frac{\cos(\psi_2)}{\sin(\alpha_2)}, \quad \tan(\eta) = \frac{\sin(\psi_2)}{\varepsilon - \cos(\psi_2)}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon$  – безразмерный коэффициент, определяемый геометрическими размерами антенны.

Угол  $\psi_2$  и коэффициент  $\varepsilon$  были определены из геометрии контррефлектора в виде выражений (6):

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\psi_2}{2}\right) = \frac{f_r - l}{R_2} \left( -1 + \sqrt{1 + \frac{R_2^2}{l(f_r - l)}} \right), \quad \varepsilon = \frac{f_r}{2l - f_r}, \quad (6)$$

где  $f_r$  – расстояние между фокусами контррефлектора;

$l$  – кратчайшее расстояние от фокуса  $F_1$  до поверхности контррефлектора (см. рисунок 1).

На рисунке 2 приведен вид распределений компонент плотности поверхностных токов  $j_{x2}, j_{y2}, j_{z2}$  в зависимости от полярных координат  $(R_2, \xi_2)$ .

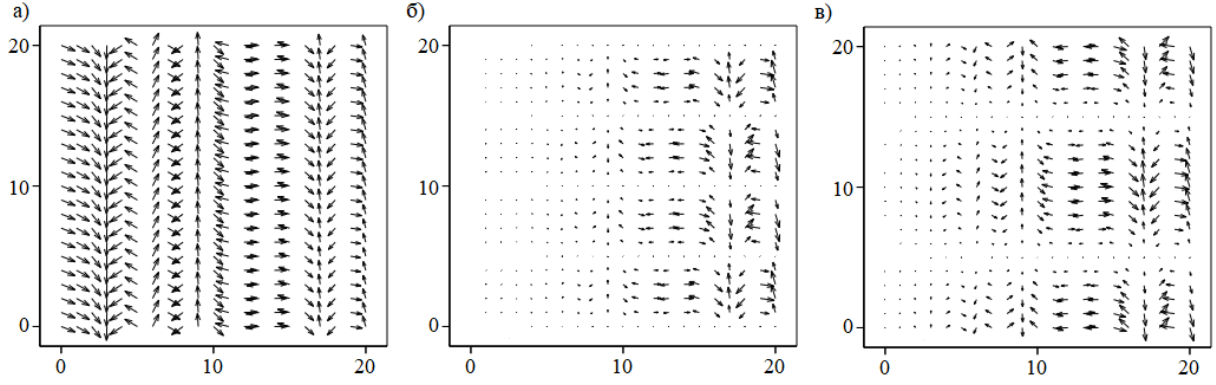


Рис.2. Зависимость компонент плотности поверхностных токов  $j_{x2}$  (а),  $j_{y2}$  (б) и  $j_{z2}$  (в) от полярных координат  $(R_2, \xi_2)$  для рабочей частоты 12,11 ГГц: по оси абсцисс отложены номера отсчетов радиальной координаты  $R_2$ , а по оси ординат – номера отсчетов угла  $\xi_2$

Анализ данных распределений показывает, что компоненты  $j_{y2}$  и  $j_{z2}$  отличны от нуля только для удаленных от центра раскрыва участков контррефлектора, но при этом значения компонент для диаметрально противоположных углов  $\xi_2$  имеют противоположный знак и создаваемые ими поля гасят друг друга. Таким образом, основной вклад в поле излучения контррефлектора в дальней зоне вносит компонента  $j_{x2}$ . Причем налицо отсутствие зависимости данной компоненты от угла  $\xi_2$ .

**На втором этапе** были рассчитаны единственная ненулевая компонента вектора излучения  $N_{x2}$  (7) и комплексные амплитуды меридиональной  $\dot{E}_{\theta 2}(\theta_2, \varphi_2)$  (8) и азимутальной  $\dot{E}_{\varphi 2}(\theta_2, \varphi_2)$  (9) компонент напряженности электрического поля контррефлектора в дальней зоне в соответствии с определенной выше компонентой плотности поверхностных токов  $j_{x2}$ :

$$N_{x2}(\theta_2, \varphi_2) = \int j_{x2}(R_2, \xi_2) \cdot e^{-i\beta_0 \Delta r_2} dS_2, \quad (7)$$

$$\dot{E}_{\theta 2}(\theta_2, \varphi_2) = -30i \cdot \beta_0 \frac{e^{-i\beta_0 r_{02}}}{r_{02}} \cdot N_{x2}(\theta_2, \varphi_2) \cdot \cos(\theta_2) \cos(\varphi_2), \quad (8)$$

$$\dot{E}_{\varphi 2}(\theta_2, \varphi_2) = -30i \cdot \beta_0 \frac{e^{-i\beta_0 r_{02}}}{r_{02}} \cdot N_{x2}(\theta_2, \varphi_2) \cdot \sin(\varphi_2), \quad (9)$$

где  $(\theta_2, \varphi_2)$  – углы сферической системы координат с центром в фокусе  $F_2$ ;

$\Delta r_2$  – разность хода лучей из фокуса  $F_2$  и точки на поверхности контррефлектора до точки наблюдения в дальней зоне;

$r_{02}$  – расстояние от фокуса  $F_2$  до точки наблюдения в дальней зоне;

$dS_2$  – элемент поверхности гиперboloида.

Исходя из геометрии контррефлектора, были определены разность хода лучей  $\Delta r_2$  (10) и элемент поверхности гиперboloида  $dS_2$  (11) в виде:

$$\Delta r_2 = -[R_2 \cdot \text{ctg}(\psi_2) - f_r] \cos(\theta_2) - R_2 \sin(\theta_2) \cos(\varphi_2 - \xi_2), \quad (10)$$

$$dS_2 = \frac{R_2}{p_r} \sqrt{p_r^2 + \varepsilon^2 R_2^2} \frac{\varepsilon \cos(\psi_2) - 1}{\varepsilon - \cos(\psi_2)} dR_2 d\xi_2, \quad (11)$$

где введено обозначение  $p_r = \frac{2l(f_r-l)}{2l-f_r}$ .

Численное интегрирование выражения (7) для отдельных значений меридионального угла  $\theta_2$  позволило получить отсчеты комплексных амплитуд меридиональной и азимутальной компонент напряженности электрического поля контррефлектора в дальней зоне и построить его нормированные диаграммы направленности (ДН) в  $E$ - ( $\varphi_2 = 0$ ) и  $H$ -плоскостях ( $\varphi_2 = \frac{\pi}{2}$ ), представленные на рисунке 3. Отсутствие зависимости компоненты плотности наведенных токов  $j_{x2}$  от угла  $\xi_2$  позволило значительно упростить численное интегрирование при помощи интегрального определения функции Бесселя (12):

$$J_0(x) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{-i \cdot x \cdot \cos(\xi_2)} d\xi_2. \quad (12)$$

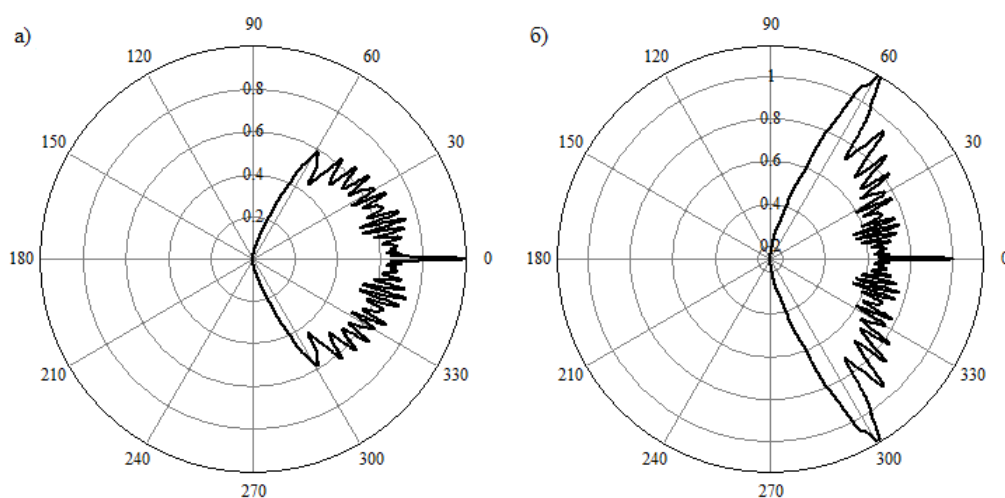


Рис. 3. Нормированные ДН контррефлектора в дальней зоне:  
а)  $E$ -плоскость; б)  $H$ -плоскость

Анализ полученных ДН контррефлектора показал, что ширина диаграммы направленности вне зависимости от плоскости составляет порядка  $120^\circ$ , а, значит, контррефлектор облучает все зеркало, т. к. оно видно из фокуса  $F_2$  под углом  $2\psi_0 = 2 \cdot \arctg\left(\frac{D_1}{2f}\right) \approx 114^\circ$ , где  $D_1 = 16$  м – диаметр основного зеркала (рефлектора), а  $f = 5,212$  м – его фокусное расстояние (см. рисунок 1).

**На третьем этапе** был проведен расчет компонент плотности поверхностных токов, наведенных на рефлекторе, с использованием метода поверхностных токов.

По аналогии с первым этапом была построена математическая модель компонент плотности поверхностных токов (13), наведенных на рефлекторе:

$$\begin{cases} j_{x1} = 2[n_y(\psi_1, \xi_1)\dot{H}_z(\psi_1, \beta_1) - n_z(\psi_1, \xi_1)\dot{H}_y(\psi_1, \beta_1)], \\ j_{y1} = 2[n_z(\psi_1, \xi_1)\dot{H}_x(\psi_1, \beta_1) - n_x(\psi_1, \xi_1)\dot{H}_z(\psi_1, \beta_1)], \\ j_{z1} = 2[n_x(\psi_1, \xi_1)\dot{H}_y(\psi_1, \beta_1) - n_y(\psi_1, \xi_1)\dot{H}_x(\psi_1, \beta_1)], \end{cases} \quad (13)$$

где  $j_{x1}$ ,  $j_{y1}$  и  $j_{z1}$  – компоненты плотности поверхностных токов, наведенных на рефлекторе контррефлектором;

$n_x(\psi_1, \xi_1)$ ,  $n_y(\psi_1, \xi_1)$ ,  $n_z(\psi_1, \xi_1)$  – проекции вектора внутренней нормали к элементарной площадке на поверхности рефлектора;

$(\psi_1, \xi_1)$  – сферические углы, задающие направление падающего на элементарную площадку луча относительно фокальной оси  $OF_2$  и оси, перпендикулярной ей;

$(\alpha_1, \beta_1)$  – сферические углы, задающие направление на данную площадку из фокуса  $F_2$ ;

$\dot{H}_x(\psi_1, \beta_1)$ ,  $\dot{H}_y(\psi_1, \beta_1)$ ,  $\dot{H}_z(\psi_1, \beta_1)$  – комплексные амплитуды проекций вектора напряженности магнитного поля, создаваемого контррефлектором, на оси декартовой системы координат с центром в фокусе  $F_2$ , определяемые выражениями (14) вида:

$$\begin{cases} \dot{H}_x(\psi_1, \beta_1) = \frac{\dot{E}_{\theta 2}(\psi_1, 0) \cdot i_{\theta x}(\beta_1, \xi_1) + i \cdot \dot{E}_{\varphi 2}(\psi_1, 0) \cdot i_{\varphi x}(\beta_1)}{120\pi}, \\ \dot{H}_y(\psi_1, \beta_1) = \frac{\dot{E}_{\theta 2}(\psi_1, 0) \cdot i_{\theta y}(\beta_1, \xi_1) + i \cdot \dot{E}_{\varphi 2}(\psi_1, 0) \cdot i_{\varphi y}(\beta_1)}{120\pi}, \\ \dot{H}_z(\psi_1, \beta_1) = \frac{\dot{E}_{\theta 2}(\psi_1, 0) \cdot i_{\theta z}(\beta_1, \xi_1) + i \cdot \dot{E}_{\varphi 2}(\psi_1, 0) \cdot i_{\varphi z}(\beta_1)}{120\pi}, \end{cases} \quad (14)$$

где  $i_{\theta x}(\beta_1, \xi_1)$ ,  $i_{\theta y}(\beta_1, \xi_1)$ ,  $i_{\theta z}(\beta_1, \xi_1)$  и  $i_{\varphi x}(\beta_1)$ ,  $i_{\varphi y}(\beta_1)$ ,  $i_{\varphi z}(\beta_1)$  – проекции ортов  $\vec{i}_\theta$  и  $\vec{i}_\varphi$  на оси декартовой системы координат, определяемые выражениями (15):

$$\begin{cases} i_{\theta x}(\beta_1, \xi_1) = -\cos(\xi_1), \\ i_{\theta y}(\beta_1, \xi_1) = \sin(\beta_1) \sin(\xi_1), \\ i_{\theta z}(\beta_1, \xi_1) = -\cos(\beta_1) \sin(\xi_1) \end{cases} \quad \begin{cases} i_{\varphi x}(\beta_1) = 0, \\ i_{\varphi y}(\beta_1) = \cos(\beta_1), \\ i_{\varphi z}(\beta_1) = \sin(\beta_1). \end{cases} \quad (15)$$

Для проведения модельных исследований повторно был осуществлен переход (16) к полярным координатам, но в плоскости раскрыва рефлектора  $(R_1, \xi_1)$ :

$$\sin\left(\frac{\psi_1}{2}\right) = \frac{R_1}{\sqrt{p^2 + R_1^2}}, \quad r_{02} = \frac{R_1}{\sin(\psi_1)}, \quad \cos(\alpha_1) = \frac{2pR_1 \cos(\xi_1)}{p^2 + R_1^2}, \quad \cos(\beta_1) = \frac{\cos(\psi_1)}{\sin(\alpha_1)}, \quad (16)$$

где  $p = 2f$  – параметр параболоида.

На рисунке 4 приведен вид распределений компонент плотности поверхностных токов  $j_{x1}$ ,  $j_{y1}$ ,  $j_{z1}$  в зависимости от полярных координат  $(R_1, \xi_1)$ .

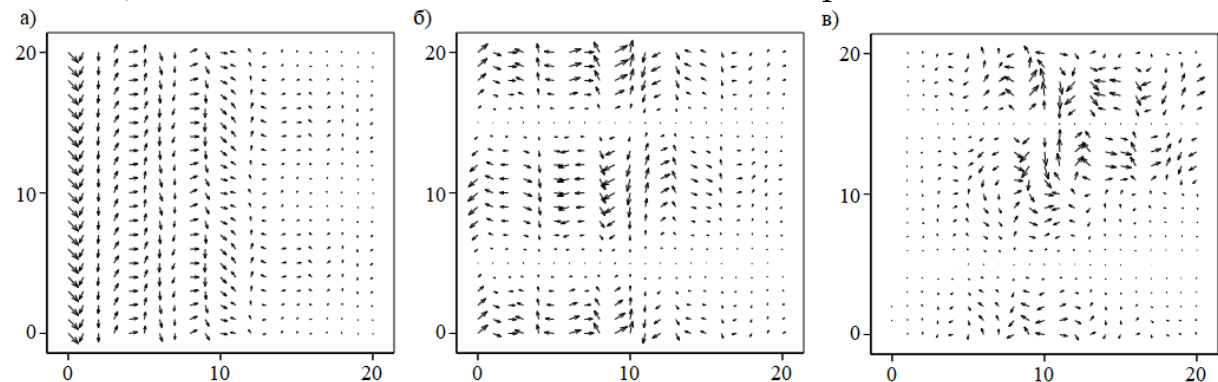


Рис.4. Зависимость компонент плотности поверхностных токов  $j_{x1}$  (а),  $j_{y1}$  (б) и  $j_{z1}$  (в) от полярных координат  $(R_1, \xi_1)$  для рабочей частоты 12,11 ГГц: по оси абсцисс отложены номера отсчетов радиальной координаты  $R_1$ , а по оси ординат – номера отсчетов угла  $\xi_1$

Анализ данных распределений показывает, что, как и в случае с контррефлектором, компоненты  $j_{y1}$  и  $j_{z1}$  для диаметрально противоположных углов  $\xi_1$  имеют противоположный знак и создаваемые ими поля гасят друг друга. Таким образом, основной вклад в поле излучения рефлектора в дальней зоне вносит только компонента  $j_{x1}$ . Для нее также отсутствует зависимость от угла  $\xi_1$ . Кроме того, можно заметить, что с ростом радиальной координаты  $R_1$  амплитуда данной компоненты заметно убывает к краям зеркала, что свидетельствует о существенном отличии коэффициента использования поверхности (КИП) зеркала от 1.

**На заключительном этапе** метода поверхностных токов были определены единственная ненулевая компонента вектора излучения  $N_{x1}$  (17) и комплексные амплитуды меридиональной  $\dot{E}_{\theta 1}(\theta_1, \varphi_1)$  (18) и азимутальной  $\dot{E}_{\varphi 1}(\theta_1, \varphi_1)$  (19) компонент напряженности электрического поля рефлектора в дальней зоне в соответствии с найденной выше компонентой плотности поверхностных токов  $j_{x1}$ :

$$N_{x1}(\theta_1, \varphi_1) = \int j_{x1}(R_1, \xi_1) \cdot e^{-i\beta_0 \Delta r_1} dS_1, \quad (17)$$

$$\dot{E}_{\theta 1}(\theta_1, \varphi_1) = -30i \cdot \beta_0 \frac{e^{-i\beta_0 r_{01}}}{r_{01}} \cdot N_{x1}(\theta_1, \varphi_1) \cdot \cos(\theta_1) \cos(\varphi_1), \quad (18)$$

$$\dot{E}_{\varphi 1}(\theta_1, \varphi_1) = -30i \cdot \beta_0 \frac{e^{-i\beta_0 r_{01}}}{r_{01}} \cdot N_{x1}(\theta_1, \varphi_1) \cdot \sin(\varphi_1), \quad (19)$$

где  $(\theta_1, \varphi_1)$  – углы сферической системы координат с центром в вершине рефлектора  $O$ ;

$\Delta r_1$  – разность хода лучей из фокуса  $F_2$  и точки на поверхности рефлектора до точки наблюдения в дальней зоне;

$r_{01}$  – расстояние от фокуса  $F_2$  до точки наблюдения в дальней зоне;

$dS_1$  – элемент поверхности параболоида.

Исходя из геометрии рефлектора, были определены разность хода лучей  $\Delta r_1$  (20) и элемент поверхности параболоида  $dS_1$  (21) в виде:

$$\Delta r_1 = \frac{p^2 - R_1^2}{2p} \cos(\theta_1) - R_1 \sin(\theta_1) \cos(\varphi_1 - \xi_1), \quad (20)$$

$$dS_1 = \frac{R_1}{p} \sqrt{p^2 + R_1^2} dR_1 d\xi_1. \quad (21)$$

Численное интегрирование выражения (17) для отдельных значений меридионального угла  $\theta_1$  позволило получить отсчеты комплексных амплитуд меридиональной и азимутальной компонент напряженности электрического поля рефлектора в дальней зоне и построить его нормированные диаграммы направленности в  $E$ - ( $\varphi_1 = 0$ ) и  $H$ -плоскостях ( $\varphi_1 = \frac{\pi}{2}$ ). На рисунке 5 представлена ДН в  $E$ -плоскости, так как существенных различий, ввиду малого отличия  $\cos(\theta_1)$  от 1, между двумя плоскостями не наблюдается. Отсутствие зависимости компоненты плотности наведенных токов  $j_{x1}$  от угла  $\xi_1$  опять позволило значительно упростить численное интегрирование.

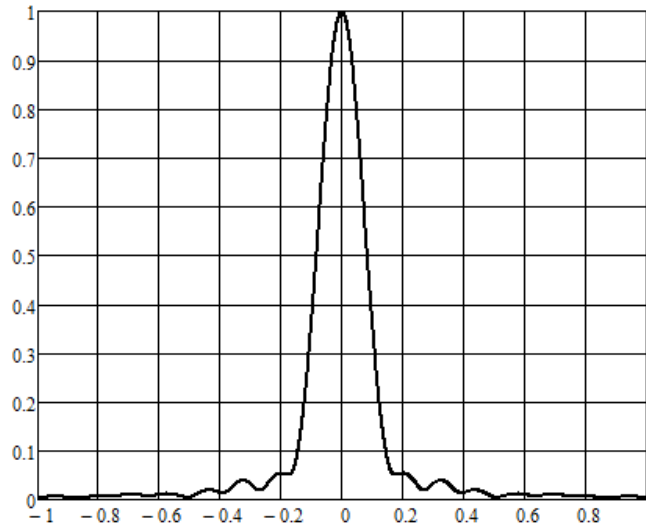


Рис. 5. Нормированная ДН рефлектора в дальней зоне: по оси абсцисс отложены значения меридионального угла  $\theta_1$  в град, по оси ординат – значения нормированной ДН

По полученной ДН двухзеркальной антенны, а также с использованием выражений (8), (9), (18) и (19) были рассчитаны основные параметры антенной системы, такие как ширина ДН по уровню половинной мощности  $\Delta\theta_{0,5}$  и по уровню нулевого (минимального) излучения  $\Delta\theta_0$ , максимальный уровень боковых лепестков (УБЛ), коэффициент направленного действия (КНД) и КИП. Расчет первых трех параметров проводился с применением численных методов, заложенных во встроенные функции среды MathCAD, такие как функция решения нелинейных уравнений root, функции интерполяции cspline и interp, функция поиска максимума max. Расчет КНД и КИП проводился в соответствии с выражениями (22) и (23) вида:

$$D_{max} = \frac{4\pi \cdot (|\dot{E}_{\theta_1}|^2 + |\dot{E}_{\varphi_1}|^2)_{max}}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi (|\dot{E}_{\theta_1}(\theta_1, \varphi_1)|^2 + |\dot{E}_{\varphi_1}(\theta_1, \varphi_1)|^2) \sin(\theta_1) d\theta_1 d\varphi_1}, \quad (22)$$

$$\nu = \frac{\lambda^2}{\pi^2 \cdot D_1^2} \cdot D_{max}, \quad (23)$$

где  $D_{max}$  – КНД в направлении максимального излучения,  $\nu$  – КИП антенны.

Ввиду дискретного представления компонент электрического поля контррефлектора и рефлектора взятие интегралов осуществлялось методом трапеций. Результаты вычислений для каждой из резонансных частот ЛПА в заданном рабочем диапазоне, приведены в таблице 1.

Таблица 1

**Параметры излучения зеркальной антенны, рассчитанные токовым методом**

$f$ , ГГц	$D_{max}$ , дБи	Максимальный УБЛ, дБ	$\nu$	$\Delta\theta_{0,5}$ , град	$\Delta\theta_0$ , град
10,94	63,229	-28,316	0,626	0,133	0,386
11,22	63,446	-28,092	0,625	0,130	0,380
11,51	63,650	-27,477	0,623	0,126	0,370
11,81	63,843	-26,779	0,619	0,123	0,362
12,11	64,056	-25,507	0,618	0,120	0,354
12,42	64,251	-25,831	0,615	0,117	0,344
12,74	64,439	-27,903	0,610	0,114	0,334

Анализ полученных результатов показал, что в пределах рабочего частотного диапазона параметры излучения изменяются в небольших пределах: КНД – в пределах 1,9 %, максимальный УБЛ – в пределах 1,5 %, КИП – в пределах 2,6 %, ширина ДН по уровню половинной мощности – в пределах 14,3 %, ширина ДН по уровню нулевого излучения – в пределах 10,9 %. Более значительное изменение ширины ДН по сравнению с другими параметрами не является критическим, так как наблюдается желаемая динамика в изменении данного параметра, а именно происходит его уменьшение с ростом рабочей частоты.

В рамках применения **апертурного метода** использовался промежуточный результат в виде комплексных амплитуд меридиональной  $\dot{E}_{\theta 2}$  (8) и азимутальной  $\dot{E}_{\varphi 2}$  (9) компонент напряженности электрического поля, создаваемого контррефлектором. Расчет ДН двухзеркальной антенны в главных плоскостях проводился в соответствии с выражениями (24) и (25) вида:

$$F_{\theta}(\theta) = \int_0^{D_1/2} \left| \dot{E}_{\theta 2} \left( \arctg \left( \frac{R_1}{f-d} \right), 0 \right) \right| J_0(\beta_0 R_1 \sin(\theta)) R_1 dR_1, \quad (24)$$

$$F_{\varphi}(\theta) = \int_0^{D_1/2} \left| \dot{E}_{\varphi 2} \left( \arctg \left( \frac{R_1}{f-d} \right), \frac{\pi}{2} \right) \right| J_0(\beta_0 R_1 \sin(\theta)) R_1 dR_1, \quad (25)$$

где в выражениях (8) и (9), определяющих поведение подынтегральных функций, положено  $r_{02} = f + d$ , так как в соответствии со свойствами параболической поверхности все лучи, вышедшие из фокуса и отраженные рефлектором, проходят до раскрыва одинаковый путь, равный указанному значению.

На рисунке 6 приведен вид ДН зеркальной антенны в двух главных плоскостях, рассчитанных в рамках апертурного метода. Анализ данных диаграмм позволяет заключить, что пространственная ДН не является осесимметричной. Поэтому в дальнейшем все расчеты проводились по плотности потока мощности, учитывающей вклад от обеих составляющих напряженности электрического поля, задаваемых выражениями (24) и (25).

Результаты вычислений параметров излучения зеркальной антенны с применением апертурного метода для каждой из резонансных частот ЛПА в заданном рабочем диапазоне, приведены в таблице 2. Анализ полученных результатов показал, что в пределах рабочего частотного диапазона параметры излучения изменяются в небольших пределах: КНД – в пределах 2,1 %, максимальный УБЛ – в пределах 8,4 %, КИП – в пределах 1,05 %, ширина ДН по уровню половинной мощности – в пределах 14,8 %, ширина ДН по уровню нулевого излучения – в пределах 16,3 %.

Таблица 2

### Параметры излучения зеркальной антенны, рассчитанные апертурным методом

$f$ , ГГц	$D_{max}$ , дБи	Максимальный УБЛ, дБ	$\nu$	$\Delta\theta_{0,5}$ , град	$\Delta\theta_0$ , град
10,94	64,603	-23,266	0,858	0,115	0,294
11,22	64,825	-22,933	0,859	0,112	0,286
11,51	65,029	-22,558	0,856	0,110	0,278
11,81	65,244	-22,208	0,855	0,107	0,270
12,11	65,493	-21,676	0,860	0,104	0,260
12,42	65,702	-21,893	0,858	0,101	0,256
12,74	65,964	-21,319	0,867	0,098	0,246



Сравнительный анализ результатов, полученных в рамках двух рассмотренных методов, позволяет утверждать, что апертурный метод по сравнению с токовым дает завышенные результаты в значениях КНД (2,2 – 2,4%), максимального УБЛ (15,0 – 23,6 %) и КИП (37,1 – 42,1 %) и заниженные результаты в значениях ширины ДН по уровню половинной мощности (12,7 – 14,0 %) и по уровню нулевого излучения (23,8 – 26,6 %). Таким образом, можно ожидать, что применение данного метода в полном объеме приведет к еще большему расхождению результатов моделирования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фролов О. П., Вальд В. П. Зеркальные антенны для земных станций спутниковой связи. М.: Горячая линия – Телеком, 2008. 496 с.
2. Зузенко В. Л., Кислов А. Г., Цыган Н. Я. Расчет и проектирование антенн. Л.: ВИКА, 1969. 161 с.
3. Дрaбкин А. Л., Зузенко В. Л. Антенно-фидерные устройства. М.: Советское радио, 1961. 816 с.
4. Микрополосковая логопериодическая антенна: пат. RU 2571607 С1, МПК H01Q 10/11 (2006.01) / Е. В. Волхонская, Е. В. Коротей, Д. В. Кужекин. – № 2014129990/08; заявл. 21.07.2014; опубл. 20.12.2015, Бюл. №35, Приоритет 21.07.2014. 15 с.
5. Волхонская Е.В., Коротей Е.В., Кужекин Д.В. Сравнительный анализ направленных свойств логопериодической вибраторной антенны стандарта GSM-900 по результатам модельного и натурного экспериментов // Радиосистемы. Территориально распределенные системы охраны. 2014. Вып. 183. №12. С. 43-46.

#### **MODEL ASSESSMENT OF THE KASSEGREN TWO-MIRROR ANTENNA RADIATION FIELD WITHIN APERTURE AND CURRENT METHODS**

Volkhonskaya Elena Vyacheslavovna, docent, d.s.t  
Korotey Evgenij Vladimirovich, docent

Baltic fishing fleet state academy FSBEI HE "KSTU", Kaliningrad, Russia,  
e-mail: eugenij\_korotey@mail.ru; volkhonskaya\_e@mail.ru

*The results of Kassegren two-mirror antenna with log-periodic irradiator radiation field and it's radiation characteristics model assessment within aperture and surface current methods are presented in this work. The surface current method is for the first time applied to calculation of two-mirror antenna. It is established that the aperture method yields the overestimated results when determining directivity, aperture efficiency and maximum side-lobe level and the underestimated results when determining width of directional pattern.*

## ИССЛЕДОВАНИЕ СУДОВЫХ ТОПЛИВ И СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ РОТАЦИОННОГО ВИСКОЗИМЕТРА

Корнева Ирина Павловна, канд. техн. наук, доцент  
Попцов Никита Сергеевич, курсант

Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ», Калининград, Россия, e-mail: ipk05@mail.ru; poptcovn@gmail.com

*Описана разработанная нами установка ротационного типа, позволяющая измерять вязкостно-температурные свойства судовых горюче-смазочных материалов в зависимости от температуры. Получены графики зависимости динамической вязкости от температуры для судового масла Lukoil Navigo ТПЕО 12/40 (базового и отработанного в течение 300 часов). Показано, что данная установка является необходимым средством контроля качества судовых нефтепродуктов*

### Введение

Создание новых устройств для идентификации и неразрушающего контроля качества судовых горюче-смазочных материалов (ГСМ), а также усовершенствование уже существующих является приоритетной задачей в рамках безопасности мореплавания. В процессе эксплуатации таких нефтепродуктов происходит изменение их качественных и количественных характеристик [1]. Поэтому существует потребность в разработке новых и комплексном использовании уже известных методов для оценки состояния ГСМ. Данному вопросу посвящено много работ [2-7]. В частности в работе [2] отмечается, что проблема повышения эффективности технической эксплуатации судовых энергетических установок неразрывно связана с совершенствованием способов и средств рационального использования ГСМ. Своевременный контроль за состоянием ГСМ будет способствовать повышению технического состояния двигателей внутреннего сгорания, а использование в них качественного моторного масла и топлива позволит увеличить срок службы и сэкономить средства на ремонт и замену.

### Постановка задачи

Данная работа посвящена исследованию возможностей применения физико-химических методов для обнаружения отклонения рабочих характеристик судовых горюче-смазочных материалов, а также разработке устройства для контроля их состояния в результате эксплуатации. Отмечается, что «основными свойствами ГСМ являются: моюще-диспергирующие, антиокислительные, противоизносные, антикоррозионные, вязкостно-температурные» [7]. В процессе использования ГСМ свойства претерпевают изменения из-за воздействия разрушающих факторов. Поэтому контроль такого важного фактора как динамическая вязкость является актуальной задачей.

Известно, что вязкость реальных жидкостей является функцией температуры. Следует отметить, что «реальные жидкости существенно отличаются от идеальной одноатомной жидкости, так как перемещения частиц в них значительно сложнее, чем простые колебания около постоянного центра» [6]. Также вязкое течение – это неравновесный процесс. Поэтому при расчете динамической вязкости следует учитывать экспоненциальный характер этой зависимости.

Динамическая вязкость измеряется с помощью специальных устройств, называемых вискозиметрами, в основе действия которых лежат разные физические методы [8]: капиллярный, ультразвуковой, ротационный, вибрационный и т.д. В частности, ротационный метод основан на работе двух соосных цилиндров, между которыми помещается исследуемая жидкость. Ротор двигателя вращает внутренний цилиндр, поэтому возникает разность в силе момента двух цилиндров, которую пересчитывают в значение вязкости.

Существуют различные типы вискозиметров ротационного типа, однако, в них не учитывается динамика изменения коэффициента вязкости при изменении температуры. В нашей работе мы предприняли попытку создать вискозиметр ротационного типа, позволяющий снимать вязкостные характеристики ГСМ по мере изменения температуры.

### Детали эксперимента

Установка состоит из рабочей области (стеклянной емкости объемом 100 мл из термостойкого стекла), в которую помещается исследуемая жидкость, теплоэлектронагревателя (ТЭНа), датчика температуры, электродвигателя и контроллера для обработки сигнала, контроля и управления остальными частями установки. На вал электродвигателя помещена деталь в виде цилиндра, которая погружается в исследуемую жидкость. Изменение вязкостно-температурных свойств жидкости снимается контроллером и выводится на монитор компьютера в реальном времени в виде графика зависимости силы тока электродвигателя от температуры. Блок-схема измерителя представлена на рис. 1.

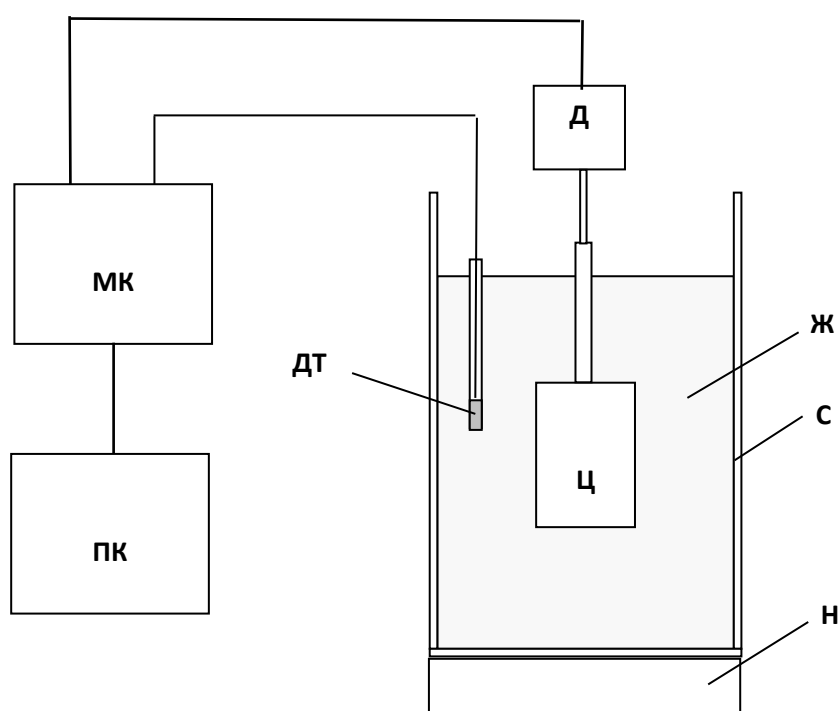


Рис. 1. Блок-схема измерителя для изучения вязкостно-температурных свойств масел.  
 Д – электродвигатель, Ц – вращающийся цилиндр, С – сосуд цилиндрической формы,  
 Ж – исследуемая жидкость, Н – нагреватель, ДТ – датчик температуры,  
 МК – микроконтроллер, ПК – персональный компьютер (ноутбук).

Исследуемая жидкость наливается в термостойкий стеклянный сосуд, затем в него помещается вращающийся элемент цилиндрической формы. При запуске установки происходит включение электронагревателя, если необходимо произвести измерение вязкости при температуре больше комнатной. Конечную температуру измерений необходимо задать с помощью специально написанной программы для обработки результатов измерений. Выход из режима измерений и выключение нагревателя происходят автоматически.

Для установившегося вращения выполняется равенство моментов сил, определяющееся выражением

$$M_{\text{тр}} + \eta S \frac{dv}{dr} r = \frac{RI^2}{\omega} \quad , \quad (1)$$

где  $M_{\text{тр}}$  – момент сил трения в самом двигателе,  $\eta$  - динамическая вязкость жидкости,  $S$  – площадь поверхности вращающегося цилиндра,  $\frac{dv}{dr}$  – градиент скорости жидкости между цилиндром и стенкой сосуда,  $r$  – радиус вращающегося цилиндра,  $R$  - сопротивление двигателя,  $I$  – сила тока двигателя,  $\omega$  - угловая скорость вращения. При постоянной угловой скорости зависимость коэффициента динамической вязкости от силы тока  $\eta = f(I)$  должна представлять собой полином второй степени.

Эксперименты, проведенные с установкой, показали, что с ростом температуры вязкость жидкости, а соответственно и ток электродвигателя, уменьшается. В качестве испытуемых образцов использовались образцы судового масла Lukoil Navigo ТПЕО 12/40 (базового и отработанного в течение 300 часов).

### Результаты эксперимента

Для градуировки установки использовался чистый глицерин. Зависимость динамической вязкости глицерина от температуры приведена в таблице 1 [9].

Таблица 1

#### Зависимость динамической вязкости глицерина от температуры

t, °C	5	10	15	20	30	40	50	60	70	80	90	100
η, мПа·с	7050	3950	2350	1480	600	330	180	102	59	35	21	13

По результатам этой таблицы получена зависимость коэффициента динамической вязкости от температуры. В дальнейшем эта зависимость использовалась для пересчета силы тока в вязкость.

На рис.2 представлен экспериментальный график зависимости силы тока от температуры для глицерина в диапазоне от 5 до 100 °С. Далее с помощью значений из табл.1 сила тока была пересчитана в коэффициент динамической вязкости и построен график зависимости динамической вязкости глицерина от силы тока (рис.3).

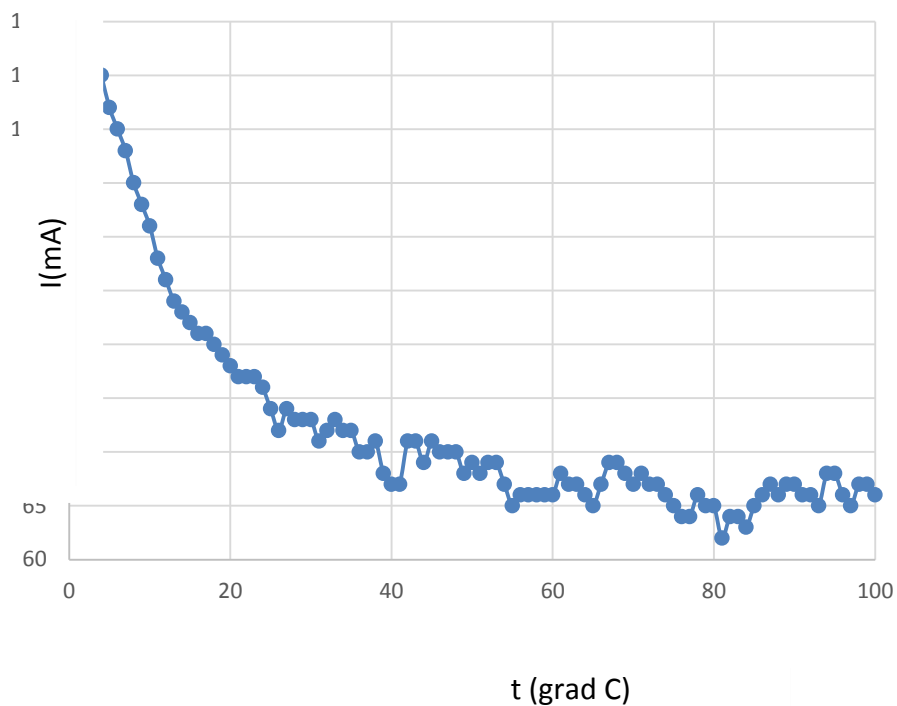


Рис. 2. Экспериментальный график зависимости силы тока от температуры для глицерина

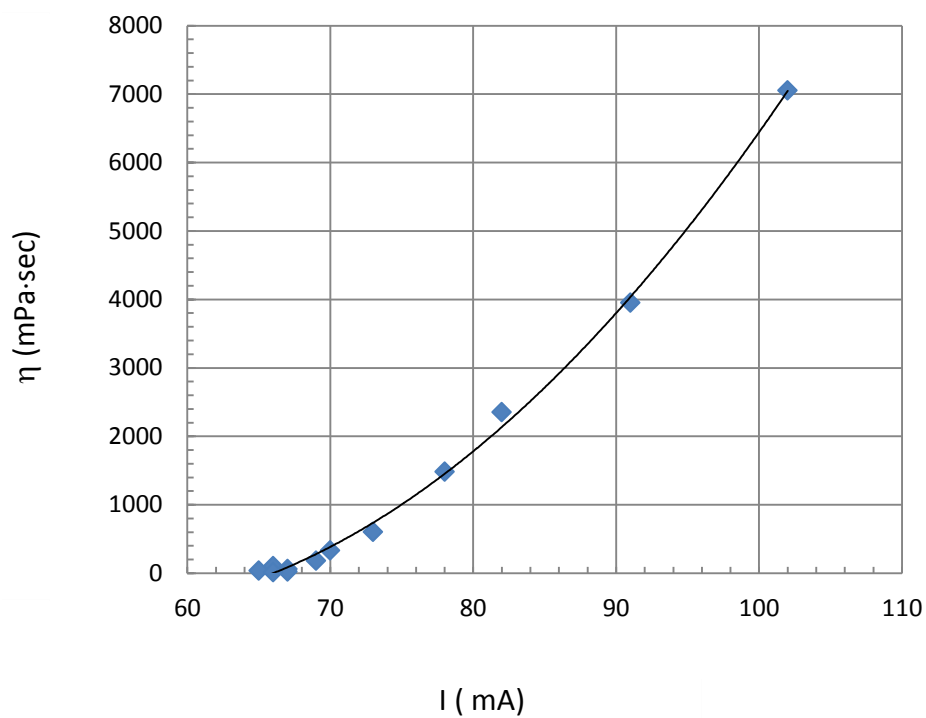


Рис. 3. График зависимости динамической вязкости глицерина от силы тока

Найденная аппроксимирующая функция

$$\eta = 3.1139I^2 - 327.41I + 8045.3$$

(1)

позволила произвести пересчет силы тока для различных жидкостей в коэффициент динамической вязкости.

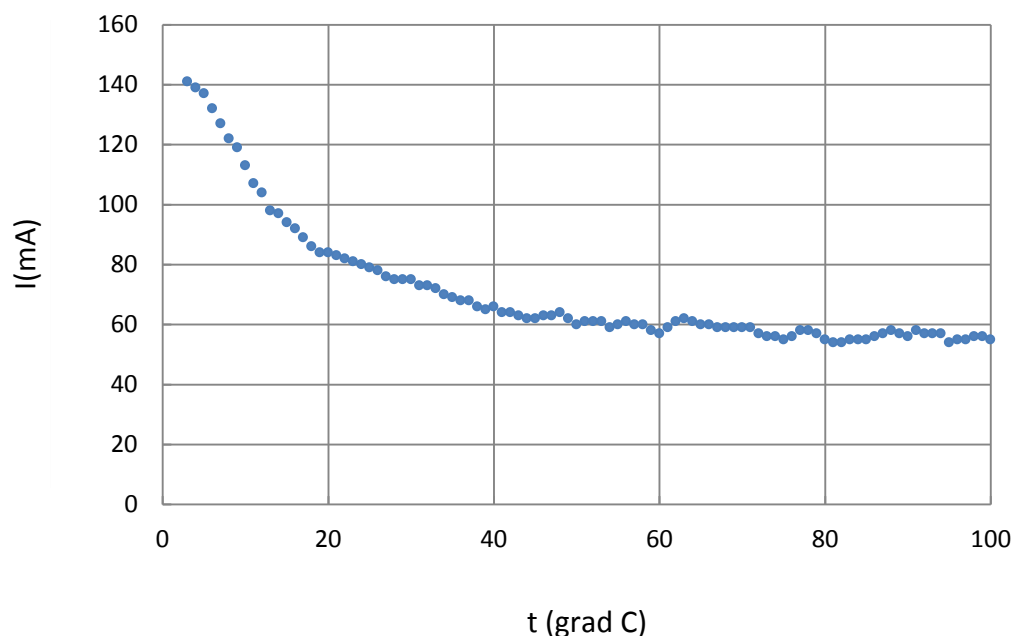


Рис. 4. Экспериментальный график зависимости силы тока от температуры для судового базового масла Lukoil Navigo TPEO 12/40

На рис. 4 для образца представлен график зависимости силы тока электродвигателя разработанной нами установки от температуры для базового масла Lukoil Navigo TPEO 12/40. На рис.5 приведены зависимости динамической вязкости от температуры для глицерина, а также базового и отработанного масел этой марки.

По данным литературных источников динамическая вязкость судового масла при 100 °С составляет величину около 13 мПа·с, в нашем случае по оценкам при этой температуре получается величина, совпадающая с данной в пределах ошибки. Вязкость отработанного масла данной марки (период работы 300 часов) значительно больше, чем у базового (рис. 5). При более низких температурах вязкость отработанного масла примерно в два раза больше, чем вязкость базового масла. С ростом температуры это различие становится больше. Так, при 20 °С коэффициент динамической вязкости у отработанного масла больше уже в три раза.

Подробному исследованию вязкостно-температурных свойств жидкостей при более высоких температурах будет посвящена наша дальнейшая работа. Для этого необходимо модернизировать разработанную нами установку и провести изучение свойств на образцах различных ГСМ.

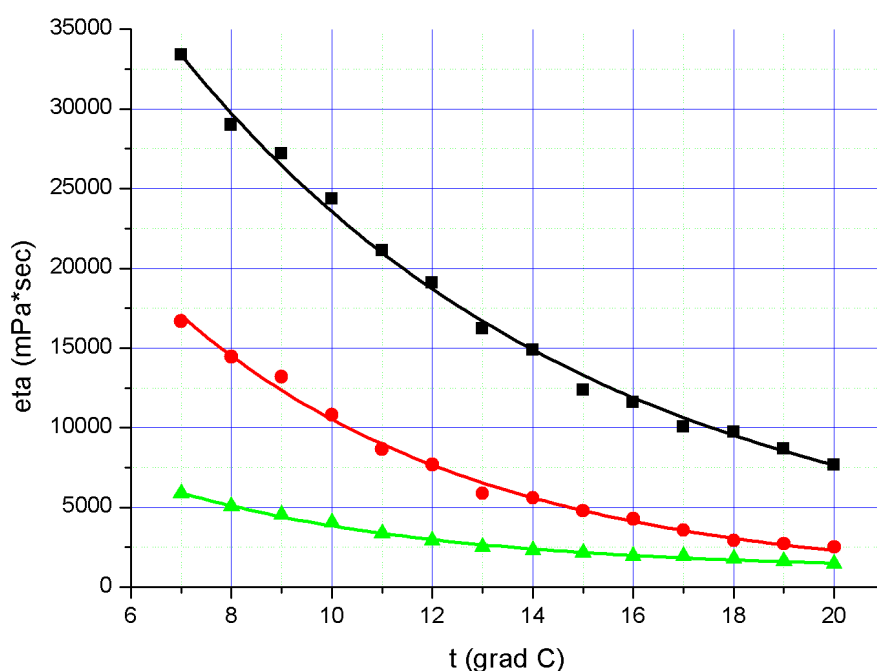


Рис. 5. Экспериментальные графики зависимости динамической вязкости от температуры для глицерина (зеленая линия), масла Lukoil Navigo ТПЕО 12/40 (базового – красная линия, отработанного – черная линия)

### Выводы

Разработана установка ротационного типа, позволяющая измерять вязкостно-температурные свойства жидкости при различных температурах, что очень важно для эксплуатации судового оборудования в морской практике. Построены графики зависимости динамической вязкости от температуры для образцов судового масла Lukoil Navigo ТПЕО 12/40 (базового и отработанного в течение 300 часов). Полученные результаты говорят о том, что данная установка может быть использована для контроля вязкостно-температурных свойств ГСМ судового оборудования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Храмцов Н.В., Королев А.Е. Старение моторного масла // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2014. Вып. 4., с. 134-138.
2. Овсянников, В.В. Дисперсионный анализ продуктов загрязнений в задачах повышения эффективности центробежной очистки масел судовых двигателей: диссертация ... кандидата технических наук: 05.08.05. – Калининград, 1984. – 214 с.
3. Бондарев, В. К. Исследование взаимосвязей процесса старения и расхода моторного масла на угар с условиями нагружения и техническим состоянием судовых двигателей: диссертация ... кандидата технических наук: 05.08.05. – Калининград, 1981. – 198 с.
4. Гиндин Л.М., Левшин Г.Ф., Овсянников В.В. и др. Опыт рационального использования моторных масел на промысловых судах // Рыбное хозяйство, 1982, Вып. 7, с. 51-55.

5. Салмин В.В., Генералова А.А., Бычков Д.С. Определение оптимальных физико-химических параметров моторного масла методом динамического программирования // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 8, №5 (2016) <http://naukovedenie.ru/PDF/04TVN516.pdf> (доступ свободный).

6. Фогельсон Р.Л. Температурная зависимость вязкости / Р.Л. Фогельсон, Е.Р. Лихачев // ЖТФ. – 2001. – Т. 71, Вып. 8. – С. 128–131.

7. Верещагин В.И. Метод контроля состояния моторных масел по концентрации продуктов старения и противоизносным свойствам: автореферат дис. ... кандидата технических наук: 05.11.13 – Томск, 2014. – 19 с.

8. Вискозиметрия. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.spectrosystems.ru/methods/viskozimetr.shtml> (дата обращения: 26.05.2018).

9. Павлов К. Ф., Романков П. Г., Носков А. А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. Учебное пособие для вузов / Под ред. чл.-корр. АН СССР П. Г. Романкова. - 10-е изд., перераб. и доп. – Л.: Химия, 1987. – 576 с.

## **THE STUDY OF MARINE FUELS AND LUBRICANTS MATERIALS USING THE ROTARY TYPE DEVICE**

Korneva Irina Pavlovna, Ph.D., Associate Professor  
Poptsov Nikita Sergeevich, cadet

Baltic fishing fleet state academy FSBEI HE "KSTU", Kaliningrad, Russia,  
e-mail: ipk05@mail.ru; poptcovn@gmail.com

*The article describes the rotary-type device developed by us, which allows us to measure the viscosity-temperature properties of ship's combustible-lubricating materials depending on the temperature. Graphs of the dynamic viscosity versus temperature for Lukoil Navigo TPEO 12/40 (base and spent for 300 hours are obtained. It is shown that this device is an indispensable tool for quality control of ship fluids.*

УДК 550.388.2

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СЕРДЦЕВИНЫ МАГНИТОСФЕРЫ**

Курилин Илья Вадимович, аспирант  
Захаров Вениамин Ефимович, профессор, д-р физ.-мат. наук

ФГБОУ ВО «Балтийский федеральный университет им. И. Канта»,  
Калининград, Россия, e-mail: santa9935@gmail.com

*Получена аппроксимация экспериментально измеренного магнитного поля сердцевин магнитосферы посредством введения функций деформации для исходного поля в виде суммы дипольного члена и двух первых сферических гармоник. Построена криволинейная система координат, связанная с деформированным полем. Проведены численные эксперименты по расчету магнитного поля в зависимости от уровня геомагнитной активности*



## Введение

Магнитосфера представляет собой полость, окружающую Землю и заполненную магнитным полем земного происхождения. Полость обтекается потоком плазмы солнечного ветра и имеет каплевидную форму, вытянутую на ночной стороне.

Актуальность данного исследования имеет теоретическую и практическую значимость. Магнитосферное поле имеет сложную и изменчивую трёхмерную структуру, зависящую от геофизических условий. С другой стороны, магнитосферное поле существенно влияет на распределение и динамику плазмы околоземного пространства, а также электрических полей и токов в плазме.

### 1. Описание математической модели

Полагаем, что  $\{x, y, z\}$  - декартовы координаты точки наблюдения, Пусть  $f_1(x), f_2(y)$  и  $f_3(z)$  - заранее неизвестные функции деформации заданного модельного поля  $\mathbf{B}^*(x, y, z)$ . Результатом деформации является следующее поле

$$\begin{aligned} B_x &= \frac{df_2}{dy} \frac{df_3}{dz} B_x^*(f_1, f_2, f_3), \\ B_y &= \frac{df_1}{dx} \frac{df_3}{dz} B_y^*(f_1, f_2, f_3), \\ B_z &= \frac{df_1}{dx} \frac{df_2}{dy} B_z^*(f_1, f_2, f_3). \end{aligned} \quad (1)$$

Используя (1), можно показать, что если исходное поле  $\mathbf{B}^*(x, y, z)$  вихревое ( $\text{div} \mathbf{B}^* = 0$ ), то и деформированное поле  $\mathbf{B}(x, y, z)$  тоже вихревое ( $\text{div} \mathbf{B} = 0$ ) независимо от конкретного вида гладких функций деформации  $f_1(x), f_2(y)$  и  $f_3(z)$ . Наша задача - найти численно эти функции с тем, чтобы система (1) аппроксимировала магнитное поле, взятое по модели [4,2], в заданной области. Параметрами нашей модели являются, в частности, угол  $\psi$  между осью  $z$  и осью геомагнитного диполя, а также  $K_p$  - индекс геомагнитной активности. Внутри магнитосферы выберем область, ограниченную плоскостью  $x = x_1 = \text{const}$  и поверхностью

$$x_2 - x = (y^2 + (z - z_x)^2) \frac{x_2}{R_M^2}, \quad (2)$$

где  $z_x, x_2, R_M$ , как и  $x_1$  - параметры модели,  $z_x = -x_M \text{tg} \psi \text{th}(x/x_M)$ ,  $x_M$  - параметр модели.

Заметим, что  $x_M$  - характерный пространственный масштаб искажения формы плазменного слоя по мере отклонения значения угла  $\psi$  от нуля. В частности, если  $\psi = 0$ , то поверхность (2) имеет форму параболоида вращения. В расчетах значения параметров  $x_2$  и  $x_M$  выбирались порядка расстояния от центра Земли до подсолнечной точки на магнитопаузе ( $x_2 = x_M = 10$ ),  $x_1 = -35$  и  $R_M = 15$ . Внутри выделенной

области магнитосферы была задана трехмерная координатная сетка в декартовой системе координат  $\{x, y, z\}$ . Вдоль каждой из декартовых осей шаг сетки возрастает по закону геометрической прогрессии по мере удаления от центра Земли. Полное количество точек разностной сетки координат внутри выделенной области - порядка  $1,25 \cdot 10^5$ . Количественно отклонение модельного магнитного поля  $\mathbf{B}(x, y, z)$  от экспериментального  $\mathbf{B}^T$  в пределах изучаемой области оценивалась посредством функционала

$$\Phi_1 = \sum_i \sum_j \sum_k \left( \frac{(B_x - B_x^T)^2 + (B_y - B_y^T)^2 + (B_z - B_z^T)^2}{(B^T)^2} \right)_{i,j,k}, \quad (3)$$

где суммирование проведено по точкам введенной координатной сетки внутри выделенной области магнитосферы.

Чтобы рассчитать значения функций  $f_1(x_i), f_2(y_j), f_3(z_k)$  и их первых производных  $(df_1/dx)_i, (df_2/dy)_j, (df_3/dz)_k$  в точках координатной сетки, решена численно задача о минимизации функционала  $\Phi_1$  в искомой области. Для этого методом покоординатного спуска [10] проинтегрирована система уравнений

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi_1}{\partial f_\ell} &= 0, \\ \frac{\partial \Phi_1}{\partial f'_\ell} &= 0, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $f'_\ell = df_\ell/dx_\ell, \ell = 1, 2, 3, x_1 = x, x_2 = y, \text{ и } x_3 = z$ .

## 2. Результаты численных расчетов

Проведенные численные эксперименты показали, что сходимость этого численного итерационного алгоритма существенно зависит от выбора начальных условий и конфигурации исходного поля  $\mathbf{B}^*$ , подлежащего деформации. Поле  $\mathbf{B}^*$  было аппроксимировано суммой дипольного члена и двух первых сферических гармоник

$$\begin{aligned} B_x^* &= -\frac{3B}{(R^*)^5} f_1 f_3 + k_2 f_3, \\ B_y^* &= -\frac{3B}{(R^*)^5} f_2 f_3, \\ B_z^* &= -\frac{B}{(R^*)^5} (3f_3^2 - (R^*)^2) + k_1 + k_2 f_1, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $B_e = 3,1 \cdot 10^{-5}$  Тл,  $R^* = \sqrt{f_1^2 + f_2^2 + f_3^2}$ ,  $k_1 = B_e / R_b^3$ ,  $k_2 = 2B_e / R_b^4$ , и  $R_b = 35$ .

Значения сеточных функций  $(f_1)_i = f_1(x_i)$ ,  $(f_2)_j = f_2(y_j)$ , и  $(f_3)_k = f_3(z_k)$  подвергались процедуре сглаживания. Последняя основана на минимизации функционалов

$$\begin{aligned} \Phi_2 &= \sum_i \left[ \left( \frac{(f_1^S)_i - (f_1)_i}{\Delta x_i} \right)^2 + \left( \frac{(f_1^S)_{i+1} - (f_1^S)_i - (f_1')_i}{\Delta x_i} \right)^2 \right], \\ \Phi_3 &= \sum_j \left[ \left( \frac{(f_2^S)_j - (f_2)_j}{\Delta y_j} \right)^2 + \left( \frac{(f_2^S)_{j+1} - (f_2^S)_j - (f_2')_j}{\Delta y_j} \right)^2 \right], \\ \Phi_4 &= \sum_k \left[ \left( \frac{(f_3^S)_k - (f_3)_k}{\Delta z_k} \right)^2 + \left( \frac{(f_3^S)_{k+1} - (f_3^S)_k - (f_3')_k}{\Delta z_k} \right)^2 \right], \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\Delta x_i = x_{i+1} - x_i$ ,  $\Delta y_j = y_{j+1} - y_j$ ,  $\Delta z_k = z_{k+1} - z_k$ ,  $(f_1^S)_i$ ,  $(f_2^S)_j$  и  $(f_3^S)_k$  – сглаженные значения соответствующих функций в узлах координатной сетки.

Чтобы рассчитать значения  $(f_1^S)_i$ ,  $(f_2^S)_j$  и  $(f_3^S)_k$ , численно интегрировалась система уравнений

$$\begin{aligned} \left( \frac{d\Phi_2}{df_1^S} \right)_i &= 0, \\ \left( \frac{d\Phi_3}{df_2^S} \right)_j &= 0, \\ \left( \frac{d\Phi_4}{df_3^S} \right)_k &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

По представленному алгоритму проведены численные расчеты для шести уровней геомагнитной активности (от  $K_p = 1$  до  $K_p = 6$ ), чтобы аппроксимировать

магнитное поле  $\mathbf{B}^T$  из [3, 2] посредством выражений (5). Мерой точности проведенной аппроксимации может служить величина  $\varepsilon = \sqrt{\Phi_1} / N$ . В расчетах значение  $\varepsilon$  получалось разным в зависимости от выбора значений параметров модели, но не превышало нескольких сотых. Известно также, что процессы переноса плазмы вдоль направления магнитосферного поля и поперек этого поля различаются как по физическим механизмам реализации, так и по характерным пространственно-временным

масштабам. Отсюда возникает необходимость явного выделения компонент движения плазмы вдоль и поперек магнитосферного поля. Это может быть достигнуто посредством построения криволинейной системы координат. Причем одно из трех семейств такой координатной системы должно быть образовано силовыми линиями магнитосферного поля. Для дипольного поля данная задача решается построением дипольной системы координат [1]. Отметим, что дипольная система координат является ортогональной. Связь дипольных координат  $\{\alpha^d, \beta^d, \varphi^d\}$  со сферическими  $\{R, \theta, \lambda\}$  дается выражениями

$$\begin{aligned}\alpha^d &= \frac{R}{\sin^2 \theta}, \\ \beta^d &= \frac{\cos \theta}{R^2}, \\ \varphi^d &= \lambda.\end{aligned}\tag{8}$$

Следуя [12], аппроксимируем исходное поле  $\mathbf{V}^*(x, y, z)$ , подлежащее деформации, в области  $R < R_b$  выражениями (1), положив в них  $f_1 = x$ ,  $f_2 = y$  и  $f_3 = z$ . Обозначим через  $\{\alpha^*, \beta^*, \varphi^*\}$  координатную систему, связанную с полем (1), деформированным по отношению к дипольному. Выражения для координат  $\{\alpha^*, \beta^*, \varphi^*\}$  ищем по методике, предложенной в [10], посредством интегрирования системы уравнений

$$\begin{aligned}\mathbf{V}^*(x, y, z) \times \text{grad} \beta^* &= 0, \\ \mathbf{V}^*(x, y, z) \text{grad} \alpha^* &= 0, \\ \mathbf{V}^*(x, y, z) \text{grad} \varphi^* &= 0.\end{aligned}\tag{9}$$

Обобщим методику [10] применительно к аппроксимации магнитосферного поля [3, 4] посредством системы (1), если поле, подлежащее деформации, задано системой (5). В выражениях координат  $\{\alpha^*, \beta^*, \varphi^*\}$  произведем замены координат радиуса-вектора точки наблюдения на соответствующие функции трансформации поля:

$$\begin{aligned}\alpha^*(x, y, z) &\rightarrow \alpha^*(f_1, f_2, f_3), \\ \beta^*(x, y, z) &\rightarrow \beta^*(f_1, f_2, f_3), \\ \varphi^*(x, y, z) &\rightarrow \varphi^*(f_1, f_2, f_3)\end{aligned}$$

Криволинейную систему координат, связанную с деформированным полем  $\mathbf{V}(x, y, z)$ , выберем как

$$\begin{aligned}\alpha(x, y, z) &= \alpha^*(f_1, f_2, f_3), \\ \beta(x, y, z) &= \beta^*(f_1, f_2, f_3), \\ \varphi(x, y, z) &= \varphi^*(f_1, f_2, f_3).\end{aligned}$$

Искомая связь означает, что семейство  $\beta$  координатных линий образовано силовыми линиями магнитного поля  $\mathbf{B}(x, y, z)$ . Корректность такого выбора следует из справедливости системы уравнений для построенной координатной системы:

$$\begin{aligned} \mathbf{B} \operatorname{grad} \alpha &= 0, \\ \mathbf{B} \operatorname{grad} \varphi &= 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Проведенные преобразования дают следующие выражения для искомых координат

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{f_1^2 + f_2^2}{(R^*)^3} - \frac{k_1}{2B_e} (f_1^2 + f_2^2) + \frac{2k_2}{7B_e} f_1 \left( f_3^2 - \frac{4}{3} (f_1^2 + f_2^2) \right) - \\ &- \frac{3k_1 k_2}{91B_e^2} (R^*)^5 f_1 + \frac{k_2^2}{49B_e^2} (R^*)^5 \left( f_3^2 - \frac{13f_1^2}{8} - \frac{25f_2^2}{24} \right) - \\ &- \frac{15k_1^2 k_2}{1729B_e^3} (R^*)^8 f_1 + \\ &+ \frac{k_1 k_2^2}{182B_e^3} (R^*)^8 \left( f_3^2 - \frac{347f_1^2}{88} - \frac{191f_2^2}{264} \right) + \\ &+ \frac{k_2^3}{23B_e^3} (R^*)^8 f_1 \left( \frac{19f_3^2}{84} - \frac{4f_1^2}{15} - \frac{11f_2^2}{70} - \frac{(R^* f_1)^2}{21(f_1^2 + f_2^2)} \right) + \dots, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\beta = \frac{f_3}{(R^*)^3} + \frac{k_1}{B_e} f_3 + \frac{k_2}{B_e} f_1 f_3 \quad (12)$$

$$\begin{aligned}
\varphi = \varphi^* & - \frac{k_2 (R^*)^5 f_2}{7B_e f_1^2 + f_2^2} - \frac{5k_1 k_2 (R^*)^8 f_2}{91B_e^2 f_1^2 + f_2^2} + \frac{k_2^2 (R^*)^8 f_1 f_2}{49B_e^2 (f_1^2 + f_2^2)^2} \times \\
& \times \left( f_3^2 - \frac{27(f_1^2 + f_2^2)}{8} \right) - \frac{40k_1^2 k_2 (R^*)^{11} f_2}{1729B_e^3 f_1^2 + f_2^2} + \frac{5k_1 k_2^2 (R^*)^{11} f_1 f_2}{637B_e^3 (f_1^2 + f_2^2)^2} \times \\
& \times \left( 2f_3^2 - \frac{159(f_1^2 + f_2^2)}{22} \right) + \frac{k_2^3 (R^*)^{12} f_2}{B_e^3 (f_1^2 + f_2^2)^3} \times \\
& \times \left( -\frac{2}{35} f_1^2 (f_1^2 + f_2^2)^2 + \frac{5}{1288} (R^*)^2 (f_1^2 + f_2^2) \left( \frac{39f_1^2}{7} - f_2^2 \right) \right) + \\
& + \frac{k_2^3 (R^*)^{12} f_2 (R^*)^4}{B_e^3 (f_1^2 + f_2^2)^3} \left( \frac{f_2^2}{3} - f_1^2 \right) \dots, \tag{13}
\end{aligned}$$

где  $\varphi^* = \arctg(f_2/f_1)$  при  $f_1 > 0$  и  $\varphi^* = \arctg(f_2/f_1) + \pi$  при  $f_1 < 0$ .

Исследование показывает, что полученная система координат является неортогональной. Для расчета векторов взаимного базиса координатной системы используется выражение  $\mathbf{e}^m = \text{grad} x^m$ , где  $m = 1, 2, 3, x^1 = \alpha, x^2 = \beta$  и  $x^3 = \varphi$ . Векторы основного базиса координатной системы можно выразить как  $\mathbf{e}_i = \mathbf{e}^j \times \mathbf{e}^k / (\mathbf{e}^l (\mathbf{e}^m \times \mathbf{e}^n))$ , где индексы  $\{i, j, k\}$  и  $\{\ell, m, n\}$  составляют циклические перестановки и могут принимать значения 1, 2 и 3. В соответствии с уравнениями (10) получаем  $\mathbf{e}_2 \parallel \mathbf{B}$ . Компоненты метрического тензора координатной системы можно выразить как  $g_{ik} = \mathbf{e}_i \cdot \mathbf{e}_k$ , где  $i = 1, 2, 3$  и  $k = 1, 2, 3$ .

Отметим, что координаты построенной координатной системы параметрически зависят от уровня геомагнитной активности. При развитии магнитосферного возмущения эта система становится подвижной относительно солнечно-магнитосферной системы координат. В соответствии с законом электромагнитной индукции при перестройке магнитного поля в последней системе координат возникают вихревые индукционные электрические поля. Выделим произвольный элемент поверхности  $d\mathbf{S}$ , в пределах которого координаты подвижной системы могут изменяться в заданных фиксированных пределах:  $(\alpha, \alpha + d\alpha)$ ,  $(\beta, \beta + d\beta)$  и  $(\varphi, \varphi + d\varphi)$ . В соответствии с уравнениями (11) -(13) фиксированным интервалам  $(\alpha, \alpha + d\alpha)$ ,  $(\beta, \beta + d\beta)$  и  $(\varphi, \varphi + d\varphi)$  соответствуют фиксированные интервалы  $f_1, f_1 + df_1$ ,  $f_2, f_2 + df_2$  и  $f_3, f_3 + df_3$  изменения величин  $f_1, f_2$  и  $f_3$ , соответственно. Магнитный поток через элемент поверхности  $d\mathbf{S}$  с учетом (1) равен

$$\begin{aligned}
d\Phi &= \mathbf{B}d\mathbf{S} = B_x(x, y, z)dydz + \\
&+ B_y(x, y, z)dx dz + B_z(x, y, z)dxdy = \\
&= B_x^*(f_1, f_2, f_3)df_2 df_3 + B_y^*(f_1, f_2, f_3)df_1 df_3 + \\
&+ B_z^*(f_1, f_2, f_3)df_1 df_2 = const.
\end{aligned}
\tag{14}$$

Из (14) следует, что магнитный поток через произвольную поверхность, связанную с подвижной системой координат, сохраняется постоянным при перестройке конфигурации магнитного поля. В соответствии с законом электромагнитной индукции заключаем, что в подвижной системе индукционное электрическое поле отсутствует. Переход из солнечно-магнитосферной в указанную подвижную систему отсчета позволяет существенно упростить описание поведения магнитосферной плазмы. Действительно, в подвижной системе электрическое поле чисто потенциальное. Магнитосферные возмущения и, соответственно, индукционные электрические поля изменчивы. Построенная координатная система может быть использована для расчета конфигураций индукционных электрических полей при конкретных возмущениях, например, - магнитных бурях. Однако в этом случае использование среднестатистической модели магнитосферного поля [10, 9] недостаточно. Вместо этого требуется самосогласованный расчет магнитного поля и электрических токов, возбуждаемых при переносе плазмы в магнитосфере.

Результатом проведенных исследований является также комплекс прикладных программ. Модель магнитосферного поля [10, 9] входит в него как составная часть. Комплекс позволяет рассчитать крупномасштабную конфигурацию магнитосферного поля, исследовать метрические свойства этого поля (в частности, - рассчитать геометрию силовых линий поля). Результаты проведенных исследований частично представлены в [10]. Результаты расчетов функций деформации  $f_1, f_2$  и  $f_3$  при  $\psi = 0$  представлены в таблицах 1 - 3 (см. Приложение) в зависимости от уровня геомагнитной активности. В данных условиях внутри магнитосферы  $f_2(y) = -f_2(-y)$  и  $f_3(z) = -f_3(-z)$ .

### Заключение

Сформулируем основные результаты:

1. Получена аналитическая аппроксимация в параметрической форме для магнитосферного поля.
2. Построен итерационный численный алгоритм для нахождения функций деформации магнитосферного поля на основе экспериментальной модели такого поля. Обоснована сходимость алгоритма.
3. Построена квазиортогональная система координат. Одно из трех семейств координатных линий совпадает с силовыми линиями магнитосферного поля.
4. Проведены численные эксперименты по исследованию изменения функций деформации магнитосферного поля в зависимости от уровня геомагнитной активности.

## Приложение

Таблица 1

**Рассчитанные значения  $f_1, R_E$  при различных значениях  $K_p$**

$x, R_E$	$f_1, R_E$ при различных значениях $K_p$					
	1	2	3	4	5	6
-30,00	-14,36	-13,85	-13,50	-13,18	-13,13	-13,15
-26,47	-13,51	-13,01	-12,71	-12,38	-12,35	-12,31
-23,27	-12,77	-12,28	-12,02	-11,68	-11,66	-11,57
-20,36	-12,12	-11,60	-11,38	-11,03	-11,02	-10,89
-17,73	-11,49	-10,93	-10,75	-10,41	-10,40	-10,22
-15,54	-10,82	-10,28	-10,13	-9,79	-9,77	-9,56
-13,17	-10,10	-9,63	-9,49	-9,18	-9,14	-8,91
-11,21	-9,30	-8,94	-8,81	-8,54	-8,50	-8,25
-9,43	-8,37	-8,12	-8,02	-7,83	-7,79	-7,56
-7,81	-7,29	-7,15	-7,10	-7,00	-7,00	-6,83
-6,34	-6,10	-6,04	-6,04	-6,03	-6,09	-6,02
-5,01	-4,90	-4,89	-4,91	-4,96	-5,06	-5,09
-3,80	-3,72	-3,73	-3,75	-3,82	-3,93	-4,01
-2,71	-2,67	-2,67	-2,69	-2,75	-2,83	-2,89
-1,72	-1,71	-1,71	-1,72	-1,75	-1,79	-1,80
-0,82	-0,86	-0,87	-0,88	-0,90	-0,93	-0,94
0	-0,13	-0,16	-0,19	-0,23	-0,26	-0,29
0,82	0,77	0,75	0,73	0,68	0,65	0,55
1,72	1,68	1,66	1,66	1,66	1,67	1,63
2,71	2,75	2,75	2,77	2,82	2,89	2,95
3,80	4,04	4,12	4,21	4,35	4,49	4,71
5,01	5,50	5,66	5,82	6,02	6,22	6,46
6,34	7,01	7,23	7,46	7,71	7,93	8,18
7,81	8,55	8,86	9,20	9,56	9,83	10,13
9,43	9,92	10,45	11,07	11,72	12,09	12,62



Таблица 2

Рассчитанные значения  $f_2, R_E$  при различных значениях  $K_p$

$y, R_E$	$f_2, R_E$ при различных значениях $K_p$					
	1	2	3	4	5	6
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,44	0,37	0,37	0,38	0,39	0,40	0,40
1,39	0,87	0,87	0,87	0,87	0,88	0,86
2,43	1,90	1,89	1,90	1,93	1,97	1,98
3,58	3,12	3,11	3,13	3,18	3,24	3,30
4,85	4,49	4,49	4,52	4,58	4,66	4,73
6,25	5,93	5,91	5,96	6,00	6,10	6,17
7,79	7,37	7,31	7,36	7,38	7,47	7,52
9,49	8,77	8,63	8,65	8,61	8,42	8,38
11,37	9,91	9,61	9,26	8,80	8,66	8,65
13,44	10,22	9,64	9,50	9,30	9,22	9,07
15,72	16,16	13,46	12,44	11,38	8,98	9,51
18,23	24,94	21,21	20,95	19,98	11,76	12,58
21,0	27,05	23,58	24,47	24,71	12,65	13,39

Таблица 3

Рассчитанные значения  $f_3, R_E$  при различных значениях  $K_p$

$z, R_E$	$f_3, R_E$ при различных значениях $K_p$					
	1	2	3	4	5	6
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,44	0,53	0,56	0,60	0,69	0,78	0,99
1,39	1,05	1,09	1,14	1,23	1,33	1,51
2,43	2,16	2,20	2,26	2,33	2,44	2,55
3,58	3,30	3,34	3,41	3,45	3,59	3,67
4,85	4,52	4,53	4,61	4,64	4,82	4,88
6,25	5,83	5,83	5,91	5,93	6,14	6,18

7,79	7,21	7,20	7,25	7,24	7,47	7,47
9,49	8,46	8,35	8,35	8,24	8,44	8,34
11,37	9,48	9,24	9,18	8,95	9,19	9,07
13,44	10,36	10,00	9,92	9,56	8,84	9,75
15,72	10,56	10,37	10,15	9,83	10,18	10,18
18,23	10,77	11,31	10,84	10,65	10,99	11,04
21,0	16,74	16,64	16,09	15,72	15,81	16,01

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Захаров В.Е., Кащенко Н.М. Криволинейная система координат для описания геомагнитного поля, возмущенного обтеканием солнечным ветром // Геомагнетизм и аэрномия, 1980. - Т. 20. - N 1. - С. 159-160
2. Калиткин Н.Н. Численные методы. - М.: Наука, 1978. - 512 с.
3. Латышев К. С., Зинин Л. В., Ишанов С. А. Математическое моделирование околоземной космической плазмы // Энциклопедия низкотемпературной плазмы, 2008. - Т. 7-1, ч. 3. С. 300-308
4. Остапенко А.А., Мальцев Ю.П., Мальков М.В. Модель магнитного поля во внутренней магнитосфере Земли // Геомагнетизм и аэрномия, 1996. - Т. 36. - N 5. - С. 27-35
5. Alekseev I.I., Shabansky V.P. A model of a magnetic field in the geomagnetosphere // Planet and Space Sci., 1972. - Vol. 20. - N 1. - P. 117-128.
6. Fairfield D.H., Tsyganenko N.A., Usmanov A.V., Malkov M.V. A large magnetosphere magnetic field database // J. Geophys. Res., 1994. - Vol. 99. - N A6. - P. 11319-11331.
7. Hilmer R.V., Voight G.-H. A magnetospheric magnetic field model with flexible current systems driven by independent physical parameters // J. Geophys. Res., 1995. - Vol. 100. - N A4. - P. 5613-5626.
8. Stern D.P. Tail modeling in a stretched magnetosphere // 1. Methods and transformation // J. Geophys. Res., 1987. - Vol. 92. - N A5. - P. 4437-4448.
9. Tsyganenko N.A. Global quantitative models of the geomagnetic field in the cislunar magnetosphere for different disturbance levels // Planet // Space Sci., 1987. - Vol. 35. - N 11. - P. 1347-1358.
10. Tsyganenko N.A. Modeling the Earth's magnetospheric magnetic field confined within a realistic magnetopause // J. Geophys. Res., 1995. - Vol. 100. - N A4. - P. 5599-5612.

## NUMERICAL MODELLING OF MAGNETIC FIELD OF THE INNER MAGNETOSPHERE

Kurilin Ilya Vadimovich, bachelor  
Zakharov Veniamin Ephimovich, professor

Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia,  
e-mail: santa9935@gmail.com

*The experimental approximation of measuring magnetic field of magnetosphere core was received by introducing function of deformation for initial field as sum of dipole part and first two spherical harmonics. Curvilinear coordinate system was built connected with deformed field. Numerical experiments of calculating magnetic field were made depending from the level of geomagnetic activity.*

УДК 519.6, 656.052, 639.2

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ РАДАРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА SRTM**

Недоступ Александр Алексеевич, доцент, канд. техн. наук  
Ражев Алексей Олегович, соискатель

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,  
Калининград, Россия, e-mail: nedostup@klgtu.ru; progacpp@live.ru

*В условиях конечных вычислительных ресурсов необходимо минимизировать вычислительные затраты и распределять нагрузку на различные вычислительные ресурсы такие, как центральный и графический процессоры. Для правильной имитации радара необходимо выполнять трассировку луча его излучателя с учетом высот в любой точке поверхности в зоне действия радара. В статье описана математическая модель трассировки луча радара, метод получения данных из карт SRTM, эффективные реализации имитационных алгоритмов на центральном и графическом процессорах. Представлен результат работы в виде карты участка Балтийского моря с наложенным изображением, «видимым» радаром*

Системы автоматизированного проектирования и различные тренажерные комплексы широко используются в различных отраслях промышленности, в том числе и морских. В морском и речном флоте тренажерные комплексы используются как в процессе проектирования и эксплуатации, так и для подготовки специалистов и береговой охраны.

В состав рыболовного тренажерного комплекса [1] помимо радара входят множество различных модулей имитации таких, как имитаторы управления движением судна, рыболовного оборудования, палубной команды, орудия и объекта лова, окружающей среды, а также другого навигационного оборудования.

В условиях конечных вычислительных ресурсов необходимо минимизировать вычислительные затраты каждого из алгоритмов имитации. Особенно это имеет место при работе программного обеспечения тренажера на ЭВМ с ограниченными ресурсами, например, на персональном компьютере.

Также при разработке алгоритмов имитации необходимо грамотно, в зависимости от текущих потребностей, распределять нагрузку на различные вычислительные ресурсы такие, как центральный (CPU) и графический процессоры (GPU). В связи с этим рекомендуется разрабатывать несколько версий алгоритмов для процессоров различного типа, в которых различные блоки способны взаимодействовать друг с другом на разных вычислительных ресурсах.

Основной функцией имитатора радара является отображение на экране дисплея окружающей судно обстановки с учетом окружающих препятствий, целей и рельефа

поверхности. Для правильной имитации необходимо выполнять трассировку луча излучателя радара с учетом высот в любой точке поверхности в зоне действия, определяемой его характеристиками. Луч радара распространяется практически прямолинейно. При этом цели и препятствия могут закрывать друг друга. Отображаться должны только те цели и участки поверхности, которые попадают в зону видимости радара.

В процессе имитации цели могут быть статически заданы либо динамически генерироваться другими модулями тренажера. Рельеф же поверхности должен соответствовать натурному месту лова.

Данные о рельефе могут быть получены из различных источников, например, с использованием электронных карт SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), которые находятся в свободном доступе [2]. SRTM карты доступны в растровом формате GeoTIFF и могут быть конвертированы в данные о высотах специальными утилитами, например, бесплатной 3DEM Terrain Visualization.

Один из форматов данных о высотах является двоичный растровый формат. В нем данные структурированы в двумерный массив (матрицу), каждый элемент которой представляет собой значение высоты над уровнем моря в четырехбайтном формате чисел с плавающей точкой одинарной точности стандарта IEEE 754 [3]. Размеры и GPS-координаты участка хранятся в отдельном текстовом файле в формате ASCII [4].

Рассмотрим математическую модель трассировки луча радара. В вертикальной плоскости, проходящей через антенну радара [5] (точка 0 на рис. 1), луч, доходя до поверхности суши между точками 1 и 2 отражается. Отраженный сигнал улавливается приемником радара как препятствие. Аналогично между точками 3 и 4. Наоборот, между точками 2 и 3 возникает «мертвая» зона (см. рис. 1). Поэтому отраженного сигнала не возникает.

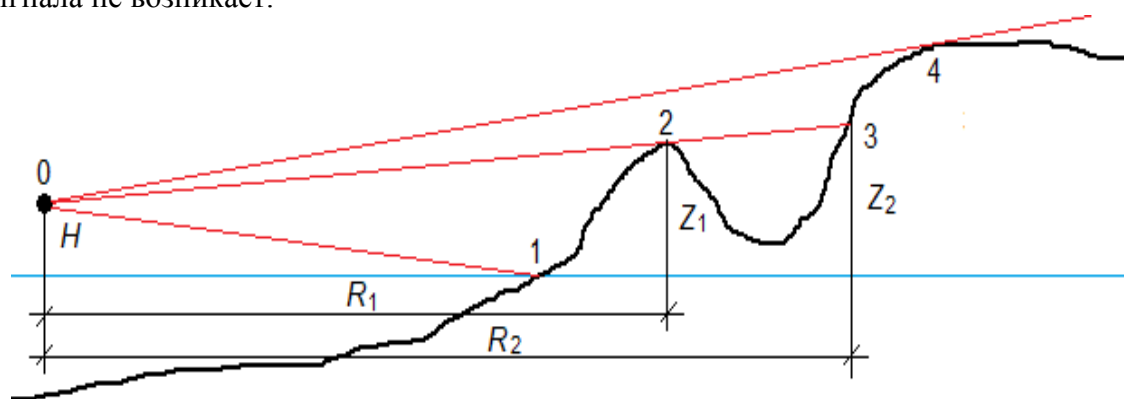


Рис. 1. Математическая модель трассировки луча радара

На рисунке 1 введем обозначения:  $R_1$  - расстояние между радаром и точкой 2;  $R_2$  - расстояние между радаром и точкой 3;  $Z_1$  - высота точки 2 над уровнем моря;  $Z_2$  - высота точки 3 над уровнем моря;  $H$  - высота антенны радара над уровнем моря.

Для точек 1 и 2 выполняется равенство:

$$\frac{Z_1 - H}{R_1} = \frac{Z_2 - H}{R_2} \quad (1)$$

Перегруппировав члены в (1) получим:

$$Z_2 - H = \frac{R_2}{R_1}(Z_1 - H) \quad (2)$$

По формуле (2) можно определять минимальную высоту препятствия  $Z_2$ , фиксируемого радаром, при заданном его удалении от впереди стоящего препятствия с высотой  $Z_1$ .

Поскольку величина  $H$  постоянна в течение всего процесса моделирования для уменьшения количества операций перед процессом моделирования от значений всех высот рельефа можно вычесть  $H$ . Тогда выражение (2) можно преобразовать в:

$$Z_2' = \frac{R_2}{R_1} Z_1' \quad (3)$$

где  $Z_1'$  и  $Z_2'$  – скорректированные высоты.

В горизонтальной плоскости дискретизуем изображение по прямоугольной регулярной сетке согласно разрешению его дисплея. Зададим такой размер сетки, чтобы область отображения полностью входила в сетку.

В процессе сканирования луч радара описывает окружность (или прямоугольник) области отображения. Для заполнения всех узлов сетки при обходе периметра окружности (прямоугольника) необходимо выбрать шаг по периметру равным шагу сетки.

Создадим массив отрезков с началом в точке расположения радара и концом на периметре. Каждый элемент массива состоит из массива координат растровых точек отрезка (точек на сетке дискретизации) и расстояния точки до радара.

В случае, когда судно неподвижно относительно сетки на дисплее радара, массив параметров точек раstra отрезков строится однократно после смены масштаба отображения. Поэтому трудоемкость данной операции не критична для процесса моделирования. Для построения массива можно использовать однопоточный алгоритм для центрального процессора. В случае, когда судно движется относительно сетки, есть два варианта:

1. при заполнении массива отрезков увеличить линейные размеры охватываемой области вдвое (площади в 4 раза), а в процессе моделирования выполнять проверку попадания каждой точки раstra в область отображения (выполнять отсечение);

2. обновлять массив отрезков на каждом шаге процесса моделирования.

Первый вариант эффективнее при моделировании на центральном процессоре, так как процесс создания массива отрезков на нем имеет большую трудоемкость по сравнению с процессом отсечения. Для моделирования же на графическом процессоре предпочтительнее второй вариант, так как процесс растеризации выполняется аппаратным способом и одновременно для множества отрезков. К тому же необходимо корректировать размеры массивов на этапе их построения, что приведет к их различному размеру и, в виду особенностей вычислений на GPU, снизит эффективность. Альтернативой может служить аппаратное отсечение точек раstra посредством GPU на заключительной стадии построения изображения, но в этом случае объем вычислений возрастает в 4 раза.

Рассмотрим оба варианта подробнее. Для растеризации отрезков на CPU можно использовать алгоритм Брезенхема [6]. При этом удаление до радара  $R$  вычислять для каждой точки и заносить в массив точек вместе с ее координатами. Началом каждого отрезка должен быть центр охватываемой области. Координаты

концов отрезка вычисляются обходом периметра области по направлению вращения радара с шагом в одну точку растра.

Для растеризации на GPU можно использовать его графический конвейер и аппаратные блоки растеризации [7,8]. Для уменьшения межпроцессорного обмена координаты концов отрезков и значение удаления от радара R создавать на конвейере геометрическим шейдером [8]. Значения R на концах каждого отрезка константны, известны и, в случае круглой области, одинаковые для каждого отрезка. Их можно задавать как Z-координату конца отрезка. При этом при растеризации значения R для промежуточных точек будут вычислены при помощи линейной интерполяции. Формирование массивов отрезков можно реализовать пиксельным шейдером [8].

Для отображения препятствий и целей на дисплее радара необходимо на каждом временном шаге формировать растровый буфер на основе информации о высотах и расстояниях до радара в каждой его точке. Для этого, с учетом текущего смещения, каждая точка растра в координатах дисплея совмещается с соответствующими точками масштабированной растровой карты высот, с подвижными, статическими целями и препятствиями. Далее, для каждого элемента массива отрезков с информацией о расстоянии до радара последовательно, начиная от его начала, выполняется преобразование алгоритмом, исходный код которого на языке C++ [9] выглядит следующим образом:

```
float z = Z[L[k][1].y][L[k][1].x];

for(int i = 2; i < L[k].Count; i++)
{
    int x = L[k][i].x, y = L[k][i].y;

    z = z / L[k][i - 1].R * L[k][i].R;

    if(Z[y][x] > z)
        z = Z[y][x];

    D[y][x] = z;
}
```

В исходном коде используются следующие массивы: L – массив отрезков; Z – массив высот; D – массив преобразованных высот.

Элементами двумерных массивов Z и D являются вещественные числа значения высот. Элементами массива L являются массивы таких параметров всех точек отрезка, как координаты точки (x, y) и расстояние точки до радара R.

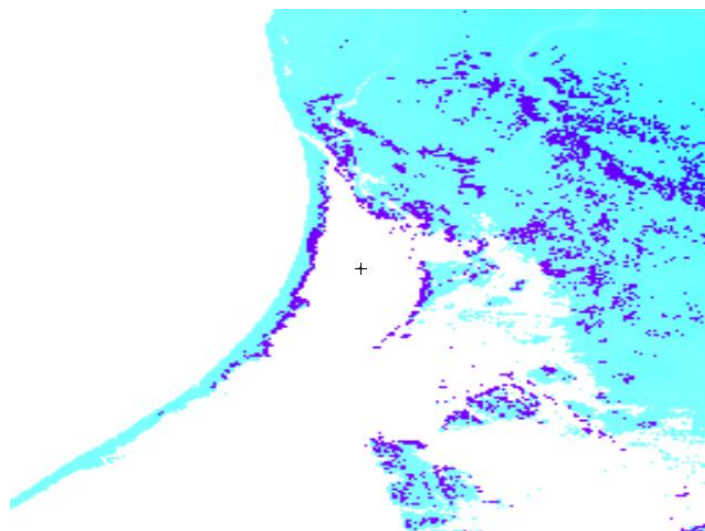
Переменная k задает номер отрезка в массиве L. При работе алгоритма на CPU k вычисляется во внешнем цикле и должна последовательно принимать значения от 0 до L.Count (размер массива). При работе на GPU значение k является входным параметром вычислительного шейдера.

После завершения алгоритма для всех отрезков определить видимость любой точки растра можно из условия  $D[y][x] == Z[y][x]$ .

Реализация описанного алгоритма на GPU выполняется вычислительным шейдером [7,8]. При этом одновременно обрабатываются множество отрезков. Массивы отрезков, буфер дисплея радара и карта высот хранятся в памяти GPU. Загрузка карты высот (или ее части) в память GPU осуществляется с участием CPU по мере необходимости. При этом в память GPU загружаются все необходимые

масштабы участков карты высот как текстуры [7,8]. Отображение на экран также осуществляется посредством GPU.

Результат работы алгоритма на примере участка Балтийского моря показан на рис. 2.



*Рис. 2. Результат имитации радара*

На рисунке крестиком посередине обозначено судно с радаром, светлыми тонами – участки поверхности суши по карте рельефа, а темными – видимые радаром участки.

В статье представлена реализация имитационной модели радара в составе рыболовного тренажерного комплекса с использованием цифровых моделей рельефа поверхности. Описаны эффективные варианты реализации как на центральном, так и на графическом процессорах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волкогон В.А., Недоступ А.А., Ражев А.О., Кострикова Н.А., Поляков Р.К., Кузин В.И. Обоснование создания тренажерного комплекса по проектированию и моделированию траловых систем. Морские интеллектуальные технологии. №4(38) Т.2. 2017. - С. 177-185.
2. SRTM TILE GRABBER. Shuttle Radar Topography Mission [Электронный ресурс]. Режим доступа - свободный: <http://dwtkns.com/srtm> (дата обращения 21.04.2018)
3. Яшкардин В.Л. IEEE 754 — стандарт двоичной арифметики с плавающей точкой. SoftElectro. 2009. – 7 с.
4. ГОСТ 27463-87 (СТ СЭВ 356-86) Системы обработки информации. 7-битные кодированные наборы символов (с Изменением N 1), ГОСТ от 29 октября 1987 года №27463-87
5. ОАО ГОРИЗОНТ. Разработчик и изготовитель навигационных радиолокационных станций и систем, беспилотных авиационных комплексов [Электронный ресурс]. Режим доступа - свободный: <http://www.gorizontrostov.ru> (дата обращения 21.04.2018)
6. Роджерс Д. Алгоритмические основы машинной графики. — М.: Мир, 1989. — С. 54-63. — ISBN 5-03-000476-9.
7. Буза М.К. Параллельные вычисления на графических процессорах. Искусственный интеллект. №3. 2011. – С. 108-114.

8. Боресков А. Разработка и отладка шейдеров (+ CD-ROM) Издательство: БХВ-Петербург, 2006 г.-488 с.

9. Бьёрн Страуструп. Программирование: принципы и практика использования C++, исправленное издание = Programming: Principles and Practice Using C++. — М.: Вильямс, 2011. — С. 1248. — ISBN 978-5-8459-1705-8.

## **MODELING OF THE RADAR WORK WITH USING DIGITAL SRTM RELIEF MODELS**

Nedostup Aleksandr Alekseevich, associate professor, PhD in Technical Sciences  
Razhev Aleksey Olegovich, research scholar

Kalininsrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,  
e-mail: nedostup@klgtu.ru

*In the context of finite computing resources, it is necessary to minimize computational costs and distribute the load upon various computing resources, such as central and graphics processors. In order to properly simulate the radar, it is necessary to trace the ray of its radiator taking into account the heights at any point of the surface in the radar's coverage area. The article describes a mathematical model of radar ray tracing, method of obtaining data from SRTM charts, effective implementation of simulation algorithms on the central and graphics processors. The result of its work in the form of a map of the Baltic Sea region with a superimposed image, a "visible" radar is presented.*

УДК 004.056.5:378.3

## **ОСОБЕННОСТИ АДРЕСНОЙ ЗАЩИТЫ В АСУ ТП**

Подтопельный Владислав Владимирович, ст. преподаватель

Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота  
ФГБОУ ВО «КГТУ», Калининград, Россия, e-mail: ionpvv@mail.ru

*Определяются особенности информационной защиты объектов и процессов в АСУ ТП. Рассматривается возможность применения механизмов защиты с учетом специфики системных процессов. Определяются особенности формирования функций перекрытия угроз, с учетом их ориентации на защиту отдельных объектов систем управления*

При использовании современных средств обеспечения информационной безопасности в автоматизированных системах управления технологическими процессами (АСУ ТП), в том числе распределенного типа, возникает множество различных проблем в эксплуатации средств защиты, не позволяющих обеспечить требуемый уровень безопасности. В частности, несовместимость программ защиты с диспетчерскими подсистемами снижает уровень защищенности от вредоносных воздействий на системы управления в целом. Особенности устройства АСУ ТП не позволяют полностью



предотвратить или заблокировать развертываемые атаки на программно-аппаратную инфраструктуру. Современные средства и механизмы, которые ориентированы на обеспечение безопасности АСУ ТП на уровне контроля и управления производственными процессами, ориентированы на защиту ресурсов информационных систем без учета конкретных технологических и инфраструктурных особенностей организации работы подсистем управления.

С учетом сложившейся ситуации в области обеспечения безопасности АСУ ТП необходимо использовать иной подход к организации защиты элементов систем управления, в том числе ключевых ресурсов. При этом необходимо учитывать следующие особенности эксплуатации АСУ ТП в защищенном исполнении:

- возможная несовместимость программного обеспечения и программных технологий при эксплуатации систем управления разных уровней (в частности, это может быть связано с применением OPC-сервера в системе, уникальных или стандартизированных протоколов передачи данных, взаимосвязанных или невзаимосвязанных со стеком протоколов TCP/IP, специализированных протоколов);

- возможная несовместимость программ защиты данных со SCADA-системой (может возникнуть по причине коллизий при реализации функций SCADA, в том числе, при работе ее сетевых служб).

Отличительной особенностью нового подхода к обеспечению информационной безопасности АСУ ТП должно являться:

- обязательный учет характеристик объектов системы при обеспечении их защиты;

- учет смежных и основных процессов обработки данных, связанных с защищаемым элементом;

- учет периодичности обработки.

Таким образом, задаваемый механизм безопасности должен быть ассоциирован с защищаемым объектом (при этом принцип ассоциированности должен распространяться на параметры объекта).

Для реализации нового подхода требуется разработать и внедрить следующее:

- механизм (редактор), позволяющий описать характеристики (атрибуты, тип, место положение, количество и тип связей с другими объектами системы, способ эксплуатации (бинарный, текстовый, специальный), размер, эксплуатирующие приложение) объекта в функции защиты (как составной части механизма защиты);

- механизм, способный реализовать заданную функцию.

Предлагаемые механизмы можно реализовать с помощью приложений, позволяющих выполнить последовательность заданных специалистом безопасности инструкций, которые написаны на специализированном скриптовом языке. Предназначенный для описания инструкций безопасности язык позволяет программировать защиту требуемых ресурсов и функций, учитывая все особенности системы и объектов защиты, что позволит полностью перекрыть требуемые угрозы, равно в той степени, в которой это необходимо офицеру безопасности, с учетом всех требований, предъявляемых к правильной работе защищаемых ресурсов. Вероятность ошибок в реализации в таком случае мала, поскольку скриптовый код интерпретируется и реализуется независимым от информационной системы приложением. При этом не исключаются ошибки, допущенные специалистом по информационной безопасности при разработке самих правил защиты информационных ресурсов. Таким образом, неправильно созданные последовательности операции, примененные в механизмах по обеспечению безопасности, могут вызвать коллизии в защищаемой системе, как и при применении стандартных способов защиты. Однако в отличие от них, ошибки в алгоритме механизмов легко исправить за счет гибкости применяемого скриптового кода, описываю-

щего порядок и особенности защиты каждого системного ресурса.. Кроме того, скриптовый язык должен иметь свой собственный набор команд проблемно-ориентированного типа.

Специализированная среда исполнения кода для реализации функции защиты должна иметь следующие особенности:

- непротиворечивость функций защиты (операций в применяемом скриптовом коде) и функций SCADA-системы с учетом последовательности их запуска и подключаемых ресурсов информационной системы;
- непротиворечивость функций защиты (операций в применяемом скриптовом коде) и функций операционной системы с учетом последовательности их запуска и подключаемых ресурсов SCADA-системы;
- поддержка скриптового языка должна осуществляться специализированным приложением, выполняющим роль командного интерпретатора;
- наличие возможности реализации функций защиты в режиме ядра системы;
- возможность активного поиска и сравнительного (сигнатурного) анализа с учетом параметров исследуемых объектов;
- возможность настраиваемого и последовательного (многофазного) перемещения и удаления вредоносных программ и объектов с учетом их характеристик;
- возможность изменения кода функции безопасности по требованию.

Предлагаемый подход к формированию функции защиты подразумевает то, что функция должна носить адресный характер, то есть должна быть ориентирована на обеспечение определенного вида защиты, специально подобранного для конкретного объекта или конкретной локации в контролируемой системе. Такая функция должна включать в свой состав уникальный набор операций (действий), который определяется заранее сформулированной задачей, параметрами защищаемого объекта и местом его положения. Необходимо подчеркнуть то, что состав и реализация функций защиты должны зависеть от параметров защищаемых объектов, ассоциированных с механизмом безопасности. Подобный подход позволит избежать избыточности защиты и обеспечить отсутствие конфликта с системными ресурсами и процессами.

Обеспечение безопасности объектов системы может быть связано с контролем целостности файлов и процессов, сохранением их состояния с учетом различий в фазах эксплуатации. Это касается, прежде всего, файлов, хранящих журналируемые данные, или системных объектов, используемых для поддержки функций виртуализации. Главным критерием определения пригодности избранного способа защиты является обеспечение непрерывной работы компонентов АСУТП. Соответственно, определение специфики программируемых функций защиты зависит от следующего:

- специфика угрозы;
- совокупность характеристик и особенностей эксплуатации (функционирования) контролируемого объекта и его места положения.

Угрозы, перекрываемые функцией, определяются в результате анализа уязвимостей системы с учетом статистических данных по известным атакам. Таким образом, для выявления наиболее опасных путей осуществления атак на критически важные системные объекты, а также определения эффективных способов блокирования вторжения и предотвращения нанесения ущерба с учетом сохранения всех системных связей, необходимо составить дерево угроз и уязвимостей исполнительной системы.

Чтобы правильно описать защищаемый объект в применяемом механизме безопасности (в его коде) необходимо определить:

- параметры защищаемых объектов для их указания в функции защиты;
- способы классификации и группировки объектов;

- критерии обнаружения критически важных для защищаемой системы элементов.

Так как главной задачей механизмов защиты является обеспечение присутствия компонентов АСУТП в требуемом состоянии, а также обеспечение непрерывного и правильного их функционирования, то в качестве основного критерия определения важности объекта положена степень его критичности, которая интерпретируется как мера обязательности присутствия объекта в требуемом месте системе, в заданной последовательности обработки данных. В качестве критерия, дополняющего основной, следует использовать меру сохранности заданного состояния объекта и его связей в определенный период времени. При применении выработанных критериев необходимо использовать количественную оценку обязательных и необходимых связей с объектами и процессами АСУТП и операционной системы. Указанные критерии требуется применять для формирования описания объектов, то есть как параметры защищаемого элемента системы. Именно эти параметры функция безопасности адресного типа должна учитывать при реализации операций защиты компонентов подсистем АСУТП (обеспечивая непротиворечивость функций безопасности и функций системы).

При исследовании архитектуры SCADA-систем TRACE MODE, Круг-2000 были выявлены следующие объекты, к которым необходимо применить механизмы адресной защиты:

- для архитектуры «Круг-2000»: модуль KrugTaskManager, база данных SCADA- системы, сервер событий, модуль ядра KrugolKernel, каталоги с критически важными для функционирования системы объектами.

- для архитектуры «TRACE MODE»: элементы Java-платформы, файлы web-сервера TRACE MODE, TRACE MODE Data Center, отладочный монитор реального времени (MPB).

Среди компонентов SCADA-систем TRACE MODE и Круг-2000 были выявлены объекты, схожие по своему функциональному назначению, особенностям реализации (базы данных), и уникальные объекты (учитывая строение систем: модуль KrugTaskManager, модуль ядра KrugolKernel, отладочный MPB). Кроме того, существуют зоны хранения множества значимых для системы объектов (каталоги, подсистемы TRACE MODE: Java-платформа, web-сервер SCADA TRACE MODE, TRACE MODE Data Center). На основании обнаруженных различий можно выделить следующие классы объектов:

1. Объекты со специфическими особенностями в функционировании.
2. Объекты со стандартным функционалом.
3. Зоны, содержащие множества защищаемых объектов.

Нужно отметить, что при исследовании особенностей защищаемых элементов подсистем АСУТП (и подобных им) офицер безопасности самостоятельно (на основе собственного опыта, статистических данных, рекомендаций, особенностей работы компонентов защищаемого уровня АСУТП) должен определить, какие параметры защищаемого объекта, системы и ее элементов требуется учитывать при создании адресной функции безопасности (ориентированной на защиту отдельного компонента системы). Обычно к подобным параметрам следует относить те, от которых зависит непрерывность правильной работы подсистем АСУТП, а именно:

- необходимое наличие защищаемого объекта для непрерывного функционирования подконтрольных систем;
- состояние защищаемого объекта и смена его состояний (пассивное и активное);
- множества обязательных и косвенных, постоянных и периодически возникающих связей с системными и внесистемными объектами и процессами;

- время активного и пассивного присутствия в системе;
- изменяемость объекта в процессе работы системы;
- последовательность в цепи подключаемых модулей при запуске системного функций;
- порождение других объектов и процессов (в случае, если рассматривается исполняемый файл).

При это, нужно отметить, что сами учитываемые параметры, их количество, может отличаться не только в следствии учета особенностей защищаемой системы, но в силу особенностей методов описания компонентов при разработке функций защиты. Например, в процессе исследования подсистем SCADA TRACE MODE, Круг-2000 были определены важные параметры объектов, которые требуется учитывать при обеспечении защиты заданных подсистем, чтобы не нарушить их правильное функционирование. В целом, к параметрам, описывающим объекты, относятся:

1. Критичность (важность) защищаемого компонента для функционирования систем (описывается как параметр, который указывает на обязательность применения функций защиты для данного компонента). Параметру присваивается числовое значение от 1 (самая высокая рейтинговая оценка) до 5.

2. Существующие необязательные и необходимые связи с объектами и процессами подсистем АСУТП и операционной системы (параметру присваивается числовое значение 0(отсутствуют связи) или 1(присутствуют связи));

3. Время активного и пассивного присутствия в системе (параметр описывается характеристикой, указывающей на время или количество периодов);

4. Время постоянного или периодического (периоды) присутствия объекта в системе (параметр описывается характеристикой, указывающей: постоянно(1) или непостоянно(0) объект присутствует в системе);

5. Изменяемость объекта в процессе работы системы (описывается качественной характеристикой (маркером), указывающей на особенности модификации);

6. Последовательность при запуске системных функций (параметру присваивается числовое значение (от 1 до 100), указывающее на этап запуска или первого активного использования защищаемого объекта в процессе инициализации элементов подсистем);

7. Порождение защищаемым элементом или процессом других объектов и процессов (в случае, если рассматривается исполняемый файл). Определяется фактом своего присутствия или отсутствия (1или 0).

Используя для описания критически важных системных элементов специально определенные и сформулированные параметры, можно полно определить уникальные характеристики объекта в подсистеме АСУТП, выяснить особенности его защиты, в том числе, необходимую последовательность запуска механизмов безопасности, их постоянный или временный характер.

Таким образом, функция защиты, созданная с учетом указанных факторов и особенностей реализации для решения отдельной конкретно взятой задачи обеспечения безопасности, можно быть названа «адресной функцией перекрытия угроз». Состав и последовательность операций в функции перекрытия угроз должны зависеть от параметров защищаемого объекта или объектов, ассоциированных с механизмом безопасности.

Поскольку в качестве объекта защиты может рассматриваться не только критически важный файл или множество файлов, набор процессов, но и целые области, требующие постоянного контроля, следует стараться избегать пересечения однотипных или взаимоблокирующих операций в функциях защиты. Целесообразно делить

адресные функции перекрытия угроз по характеру защищаемого объекта. Соответственно, выделяются следующие адресные функции:

1. Именная. Область распространения защиты этой функции полностью связана с именем (идентификатором) объекта.

2. Частная. Область распространения защиты этой функции ограничена (то есть применяется) местом нахождения контролируемого объекта или областью распространения функционала объекта, не выходит за границы заданных областей, и полностью связана с именем (идентификатором) объекта.

3. Зональная. Область распространения защиты этой функции, зависит от границ контролируемой области в системе.

4. Процессная. Область распространения защиты этой функции, зависит от идентификатора контролируемого процесса.

При подобной классификации функций повторение и пересечение реализуемых действий по отношению к одному и тому же объекту защиты можно избежать. Соединение в одной адресной функции операций над разнотипными объектами вполне возможно, но может привести к снижению уровня контроля над внедренными в функцию операциями.

Операции адресных функций можно определить, как отдельные или взаимосвязанные простые действия (операции) над объектами защиты (представленные в виде сегмента скриптового кода или целого скрипта), объединенные единой задачей, для решения которой создается функция защиты. Операции над объектом или процессом, выбранные с учетом особенностей задач функции защиты, целесообразно именовать «адресными операциями». Однако, в отличие от создаваемых функций, которые в большей своей части уникальны, операции могут быть как уникальными, так и типовыми. Типовые операции могут копироваться, и их отличие от аналогов в других функциях будет состоять лишь в использовании аргументов, указывающих на защищаемый объект или описывающий его. При изучении SCADA – систем TRACE Mode 6, «Круг-2000» были выделены следующие операции над объектами:

- резервное копирование;
- сравнительный сигнатурный анализ,
- удаление зараженного файла;
- загрузка из архива эталонного файла и замена им зараженного с последующим его удалением;
- определение даты последнего изменения объекта;
- сравнение параметров объектов, сравнение числа объектов;
- остановка процесса,
- запуск процесса;
- лечение файла;
- удаление файла;
- запрос к пользователю, предупреждение об инциденте.

Этот список не полный. Его можно дополнить и другими операциями в зависимости от требований к содержанию функции при решении задач защиты выбранного объекта. Основными критериями, позволяющими определить допустимость использования адресных операций, являются:

- применимость (возможно ли осуществить) адресной операции по отношению к избранному объекту;
- сочетаемость с другими операциями в отдельной функции.

Выбранные операции, последовательность их реализации, особенности взаимосвязей между ними в задаваемой функции зависят от специфики задач и уровня требуемой защиты, характеристик защищаемого объекта, операционной среды. Таким

образом, совокупность адресных операций, созданная для решения задачи защиты объекта или локации от внешних и внутренних угроз, формирует адресную функцию перекрытия угроз.

Сами функции могут объединяться в списки и выполняться последовательно, или же выполняться одновременно. Порядок их выполнения определяется спецификой эксплуатации системных ресурсов, особенностями функционирования компонентов защищаемой системы, а также проектируемой архитектурой системы защиты, функции которой могут касаться не всего спектра задач обеспечения безопасности информации, а решать только конкретные, важные для заданного периода проблемы защиты компонентов АСУ ТП. Таким образом, совокупность адресных функций перекрытия угроз по конкретно защищаемому объекту, которая реализуют заданный уровень защиты, образует адресный механизм безопасности.

Адресная защита элементов АСУ ТП, подразумевает использование функций безопасности как совокупности множеств адресных операций. Они должны разрабатываться с учетом особенностей защищаемых объектов, актуальных, требующих по мнению специалистов, учета угроз. Для эксплуатации заданных функций необходима специализированная среда исполнения. При разработке адресных функций требуется использовать скриптовый язык. В итоге, адресная защита позволяет обеспечить гибкость и, главное, позволяет решить проблему избыточности защиты при работе с компонентами и процессами контролируемых подсистем АСУ ТП.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Большев А., Чербов Г., Черкасова С. Компоненты ДТМ: тайные ключи к королевству АСУ ТП // Исследовательский центр Digital Security, 2014 – 36 с.
2. Горбачев И.Е., Глухов А.П. Моделирование процессов нарушения информационной безопасности критической инфраструктуры// Труды СПИИРАН. – Москва, 2015. – Вып. 1(38). – С. 112 – 135.
3. Котенко И. В. Многоагентные технологии анализа уязвимостей и обнаружения вторжений в компьютерных сетях // Новости искусственного интеллекта. – Москва, 2004. – № 1. – С. 56–72.
4. Резников Ю.Г. Построение эффективных систем информационной безопасности АСУ ТП на базе комплексного подхода // Технологии безопасности – Москва, 2012, № 2 – С. 46-49
5. Farsi M., Barbasa M. CANopen Implementation applications to industrial networks. Research Studies Press.2000 – 250 p.

#### ADDRESS PROTECTION FEATURES IN ACS

Vladislav Vladimirovich Podtopelny, art. lecturer

Baltic fishing fleet state academy FSBEI HE "KSTU", Kaliningrad, Russia,  
e-mail: ionpvv@mail.ru

*Specific features of information protection of objects and processes in the process control system are determined. The possibility of applying protection mechanisms taking into account the specifics of system processes is considered. Specific features of the formation of functions for overlapping threats, taking into account their orientation to the protection of individual objects of control systems.*

## МЕТОД ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ И ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА СУДОВЫХ ТОПЛИВ И СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

<sup>1</sup>Синявский Николай Яковлевич, д-р физ.-мат. наук, профессор

<sup>2</sup>Мершиев Иван Георгиевич, инженер

<sup>2</sup>Куприянова Галина Сергеевна, д-р физ.-мат. наук, профессор

<sup>1</sup>Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота  
ФГБОУ ВО «КГТУ», Калининград, Россия, e-mail: n\_sinyavsky@mail.ru

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Балтийский федеральный университет им. И. Канта»,  
Калининград, Россия, e-mail: ivan.mershev@gmail.com; galkupr@yandex.ru

*Целью настоящей работы являлось исследование возможностей методов ЯМР – спектроскопии и релаксометрии для идентификации и контроля качества судовых топлив и смазочных материалов с применением современных подходов и технических возможностей. Новизной исследования явилось использование релаксометрии ЯМР протонов в слабом магнитном поле с инверсией интегрального преобразования. Показана специфичность распределений времен релаксации исследованных продуктов, сформулированы рекомендации для создания перспективного контрольно-измерительного оборудования*

### Введение

Повышение надежности, долговечности и экономичности машин и агрегатов является одной из главных задач рыбопромыслового комплекса. Мировая практика эксплуатации судовых дизельных установок свидетельствует, что наряду с совершенствованием конструкции и технологии изготовления двигателей, важнейшим фактором, определяющим их технический ресурс, является качество используемых топлив и масел. В условиях эксплуатации качество используемого для смазки масла является одним из немногих средств, позволяющих без ощутимых затрат достигнуть заметное повышения долговечности и экономичности двигателя.

Информацию о старении масел судовых двигателей обычно получают посредством комплексного лабораторного анализа, в результате которого определяется изменение основных показателей, принятых для оценки качества масла. Основные физико-химические характеристики, определяемые в лабораторных условиях: температура вспышки в открытом тигле, плотность, водорастворимые кислоты и щелочи, кислотность, кислотное и щелочное число, содержание воды, кинематическая вязкость, вязкость условная, коксуемость, содержание механических примесей и их содержание, зольность.

Изучение процессов старения масел, дисперсности механических примесей имеет первостепенное значение для продления эксплуатационного моторесурса двигателя. Моторные масла обеспечивают смазывающее, терморегулирующее, моющее, уплотняющее и антикоррозийное действия. При работе двигателя на смазочное масло, циркулирующее в системе смазки, действует высокая температура, кислород воздуха, топливо и продукты его сгорания, продукты износа двигателя и посторонние примеси. Вследствие целого ряда процессов физические, химические, а также эксплуатационные свойства масла меняются: масло «стареет» [1]. В процессе работы оно темнеет, изменяется его вязкость, температура вспышки, кислотность, увеличивается молекулярный вес, в масле появляются механические примеси органического и неорганического

ского происхождения. Продукты окисления масла снижают надежность работы и увеличивают износ двигателя. В двигателе масло стареет значительно интенсивнее, чем в условиях искусственного окисления в лаборатории. Исследования группового химического состава масла в зависимости от продолжительности работы двигателя показали, что содержание ароматических углеводородов остается практически неизменным, а рост смолистых веществ происходит за счет окисления алкановых и нафтеновых углеводородов.

Определению зависимости между изменением ряда важнейших физико-химических показателей масла и износов двигателя посвящено довольно значительное число исследований. Однако противоречивость полученных результатов заставляет подходить к ним с известной осторожностью.

Применение современных масел, содержащих диспергирующие присадки, позволяет в настоящее время значительно продлить их сроки службы в дизелях. Надежная работа двигателей с минимальными износами деталей трения и наименьшим расходом смазочных масел может быть обеспечена только при своевременной смене масла. Преждевременная смена масла также приводит к повышению интенсивности изнашивания двигателей.

Для анализа состава и свойств топлив и смазочных материалов используется множество физических и химических методов, в том числе и метод ЯМР – спектроскопии. Проблема заключается в том, что все эти методы требуют значительных затрат времени, могут применяться только в условиях специализированных лабораторий, являются сложными и дорогостоящими. Разработка новых экспресс-методов контроля качества и обнаружения суррогатов с помощью компактных приборов представляет собой актуальную задачу.

В работе [2] нами были исследованы дизельное топливо (ДТ), судовое маловязкое топливо (СМТ), смесь ДТ и СМТ, мазут М-100, базовые масла SN-150 и SN-500. Установлено, что все полученные распределения времен  $T_1$  и  $T_2$  отличаются для разных нефтепродуктов. На основании анализа распределений времен релаксации сделано предположение, что модальность распределений и величины времен релаксации определяются соотношением парафиновых, нафтеновых и ароматических углеводородов в исследованных образцах.

Спектры ЯМР высокого разрешения протонов для судового маловязкого топлива (СМТ) приведены в нашей публикации [3]. В этой работе для решения проблемы многокомпонентности на основе алгоритма RILT [4] разработан алгоритм обобщенной инверсии для одновременного нахождения гауссовских и экспоненциальных спадов сигналов ЯМР.

В работе [5] предложен ЯМР-метод определения времени спин-спиновой релаксации протонов, который позволяет оценить длительность службы моторных масел и контролировать степень износа двигателя.

Целью настоящей работы являлось исследование возможностей методов ЯМР – спектроскопии и релаксометрии с инверсией интегрального преобразования для идентификации и контроля качества судовых топлив и смазочных материалов.

## **1. Методика проведения экспериментальных исследований**

Спектры ЯМР высокого разрешения протонов нами получены с помощью спектрометра Varian 400 (рис. 1а) и программного обеспечения SpinWorks в лаборатории магнитного резонанса БФУ им. И. Канта. Релаксационные эксперименты ЯМР протонов на частоте 13.65 МГц выполнены в слабом магнитном поле с помощью



спектрометра Тестаг Аполло (рис. 1б) с программным обеспечением TNMR. Магнит состоял из двух постоянных магнитов размером 60x80x100 мм, соединённых U-образным магнитопроводом, с зазором в 25 мм. Индукция магнитного поля в зазоре 300 мТл. Неоднородность магнитного поля в месте расположения катушки с образцом 0.1 мТл/см. Размеры рабочей катушки датчика: внутренний диаметр - 5,5 мм, длина - 12 мм. При определении времени спин-решеточной релаксации  $T_1$  применялась стандартная импульсная последовательность «инверсия-восстановление». Для измерения времени спин-спиновой релаксации  $T_2$  использовалась последовательность Карра-Парцелла-Мейбума-Джилла (CPMG).

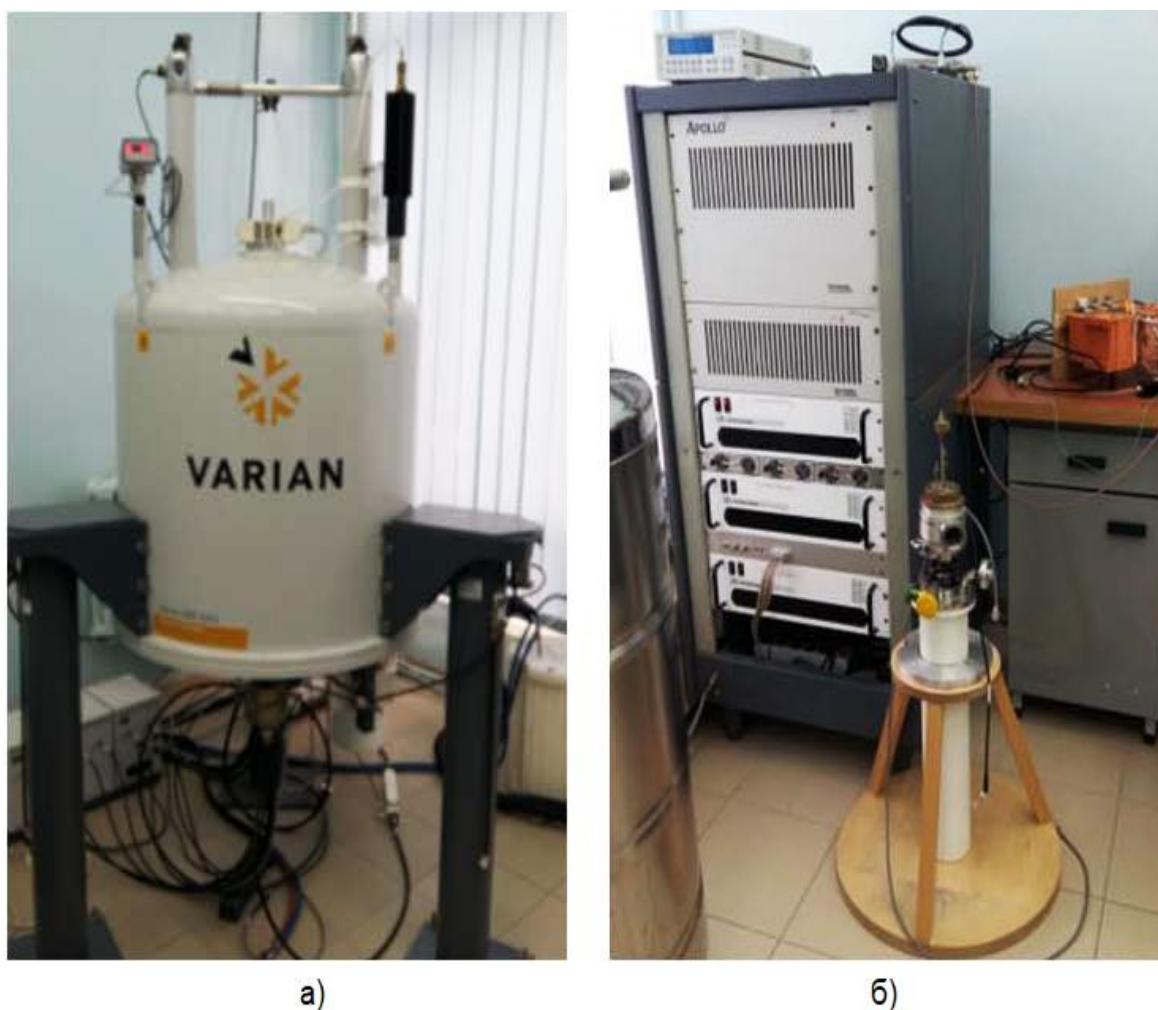


Рис. 1. Спектрометры ЯМР Varian 400 (а) и ЯМР/ЯКР Тестаг-Аполло (б)

Для стандартной импульсной последовательности Карра-Парцелла-Мейбума-Джилла CPMG, применяемой для измерения поперечной релаксации ЯМР-сигнал описывается выражением:

$$M(t) = \int_0^{\infty} f_2(T_2) \exp\left(-\frac{t}{T_2}\right) dT_2, \quad (1)$$

где  $M(t)$  – измеряемый сигнал, как функция времени. Для измерения продольной релаксации методом инверсии-восстановления сигнал можно представить выражением:

$$M(t) = \int_0^{\infty} f_1(T_1) \left[ 1 - k \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) \right] dT_1, \quad (2)$$

где  $k=2$  только для случая полной инверсии намагниченности первым р.-ч. импульсом,  $f_1(T_1)$  и  $f_2(T_2)$  – функции распределений времен релаксации.

В качестве образцов при исследованиях были использованы следующие топлива и смазочные материалы: топливо бункеровочное легкое, вид I (ТБЛ), судовое маловязкое топливо (СМТ), дизельное топливо Газпромнефть (ДТ), масло моторное для судовых двигателей ЛУКОЙЛ НАВИГО ТПЕО 15/40 (ТПЕО), базовое масло SN-150 (SN-150), базовое масло SN-500 (SN-500), масло моторное Castrol Magnatec 5W-30 синтетическое (CASTROL), автомобильное минеральное моторное масло Kutteneuler 5W40 (KUTTENKEULER).

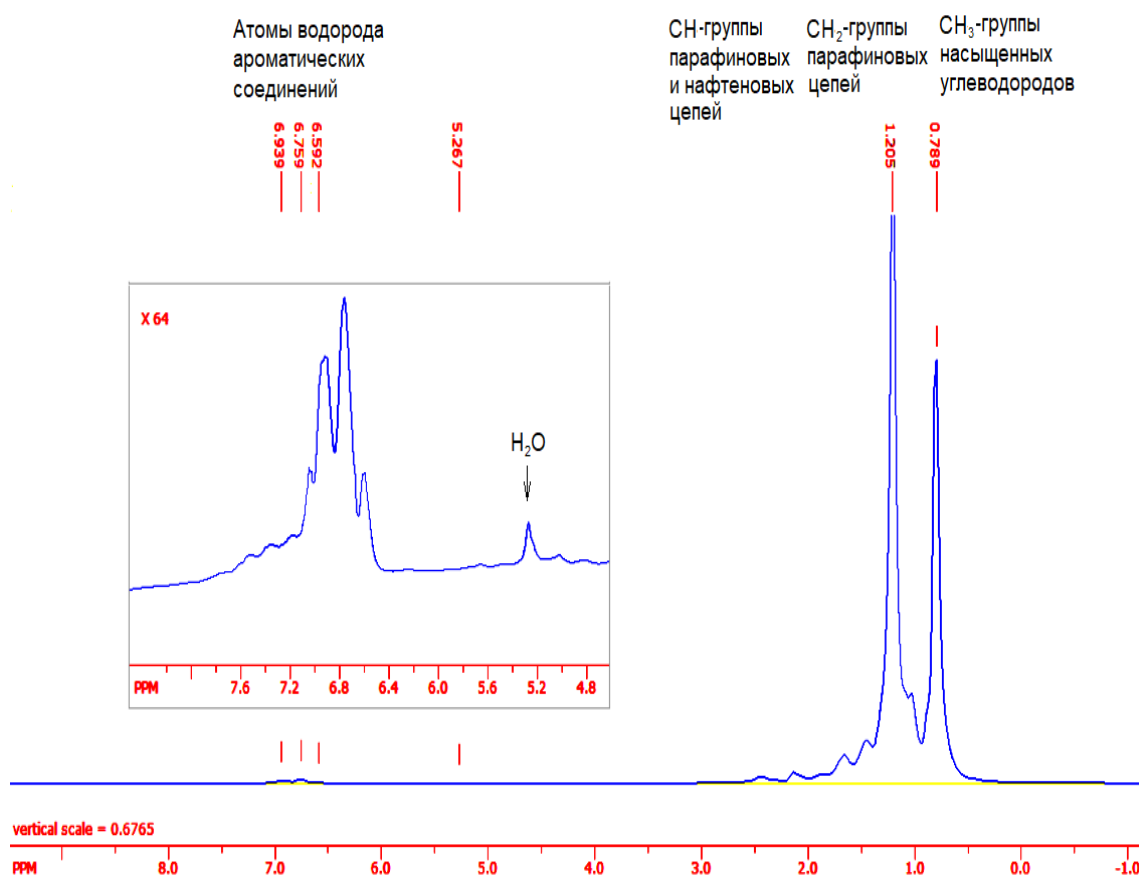


Рис. 2. Спектр ЯМР высокого разрешения протонов для базового масла SN-150

В отличие от твердых полимеров с двухфазным состоянием, где существенное содержание водорода может быть связано с обеими фазами и давать вклады в сигнал ЯМР, здесь следует использовать экспоненциальный метод инверсии интегральных преобразований.

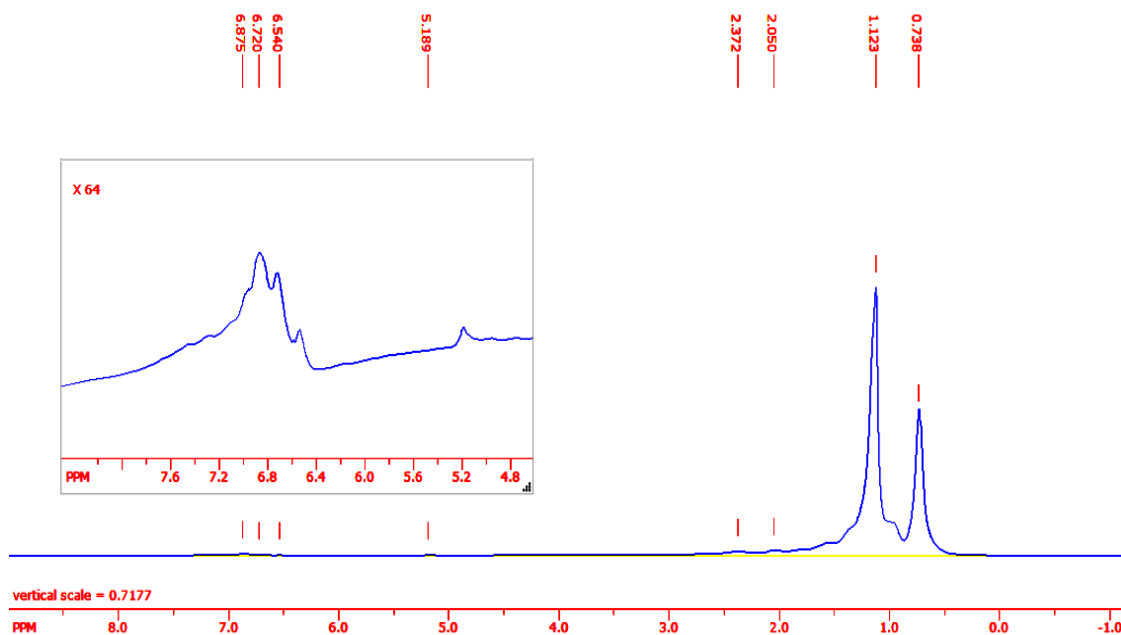


Рис. 3. Спектр ЯМР высокого разрешения протонов для базового масла SN-500

## 2. Результаты исследований и их анализ

Рис. 2-4 иллюстрируют спектры ЯМР  $^1\text{H}$  в высоком поле, полученные на спектрометре Varian 400, для базовых масел SN-150 и SN-500 и дизельного топлива. На спектрах видны линии от атомов водорода ароматических соединений, от  $\text{CH}$  – групп парафиновых и нафтеновых цепей, от группы  $\text{CH}_2$  парафинов и от  $\text{CH}_3$  – групп насыщенных углеводородов. Эти спектры, как и спектры для СМТ [3] и других нефтепродуктов качественно подобны, отличаются интенсивностью и разрешением линий и для определения количественного состава парафиновых, нафтеновых и ароматических углеводородов в образцах необходимо интегрирование спектра в соответствующих его областях.

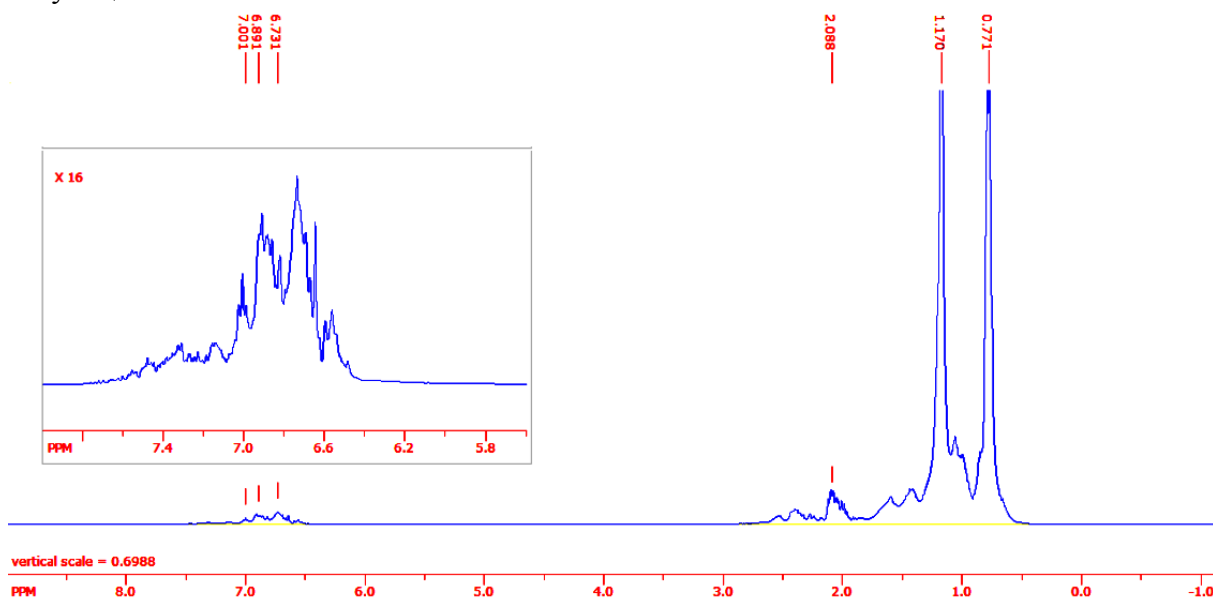


Рис. 4. Спектр ЯМР высокого разрешения протонов для дизельного топлива (ДТ)

На Рис. 5 показан 2М – корреляционный (COSY) спектр ЯМР  $^1\text{H}$  судового ма-ловязкого топлива. Как видно по одномерным проекциям, спектр высокого разрешения для этого топлива качественно близок к спектрам других исследованных продук-тов. В спектрах COSY кросс-пики (недиагональные сигналы на 2М – топограмме) по-являются при наличии спин-спинового взаимодействия. Такие связи, как видно из Рис. 5 существуют между протонами  $\text{CH}_2$  – групп парафиновых цепей и  $\text{CH}_3$  – групп насыщенных углеводородов. Следует обратить внимание на то, что 2М – эксперимент в ЯМР требует значительных затрат времени (до суток).

Распределение времен спин-решеточной и спин-спиновой релаксации ЯМР протонов, полученные методом инверсии интегрального преобразования для судового топлива ТБЛ, масел ТПЕО, CASTROL и KUTTENKEULER показаны на рис. 6. Рас-пределения времен  $T_1$  бимодальны и расположения пиков отличаются для всех образ-цов. Для топлива ТБЛ времена релаксации существенно более длинные по сравнению с маслами. Прослеживается также корреляция между временами релаксации и вязко-стью. Чем выше вязкость продукта, тем меньше значения времен релаксации  $T_1$  и  $T_2$ . Как видно из рис. 6, распределения времен релаксации для исследованных образцов существенно отличаются друг от друга, что позволяет их использовать в качестве ха-рактеристики продукта. В распределении времен релаксации  $T_2$  для свежего масла ТПЕО наблюдается 3 пика. Традиционные методы измерения времен релаксации  $T_2$  с использованием аппроксимации спада поперечной намагниченности одной-двумя экспонентами [5] не позволили бы корректно описать релаксацию в этом продукте.

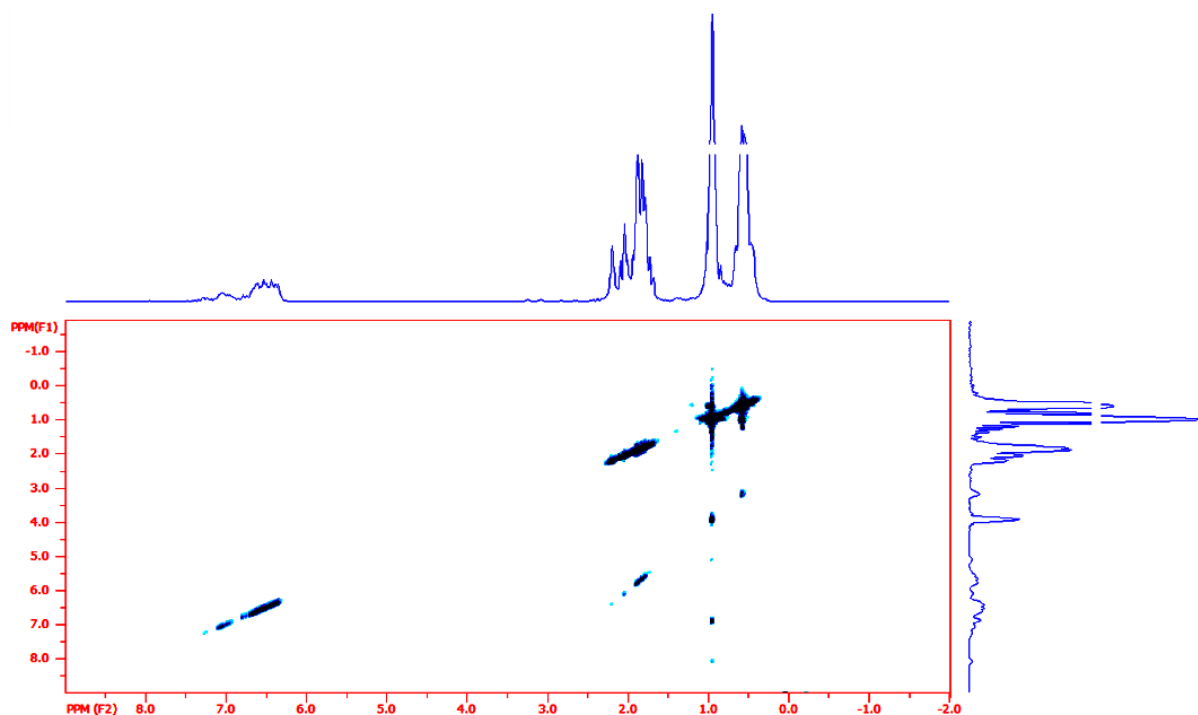


Рис. 5. 2М корреляционный спектр COSY для СМТ

Значения времен релаксации у разных образцов, по всей вероятности, опреде-ляется соотношением парафиновых, нафтеновых и ароматических углеводородов. Эти углеводороды имеют различную структуру и динамику движения молекулярных фрагментов, что и определяет величины времен релаксации и модальность их распре-

делений. Наличие в маслах и топливах углеводородов с отличающейся молекулярной массой и подвижностью молекул обуславливает бимодальность (мульти-modalность) распределений времен спин-решеточной релаксации  $T_1$ . Тяжелые молекулы дают короткие компоненты  $T_1$ , а легкие - длинные.

Моторное масло является сложной молекулярной системой. Положения пиков на распределениях зависят не только от состава углеводородов, но и от наличия и видов присадок, улучшающих те, или иные свойства масла.

У отработанного судового масла ТПЕО (рис.7) все три пика на распределении времен релаксации  $T_2$  сдвигаются по сравнению со свежем маслом в сторону более длинных времен. На распределении времен релаксации  $T_1$  основной пик находится в коротковременной области и для отработанного масла не сдвигается по отношению к основному пику для свежего масла.

Кривые «с» на распределениях времен  $T_1$  и  $T_2$  получены для искусственно состаренного масла ТПЕО путем его окисления нагреванием при  $85^\circ\text{C}$  в течение 25 часов. Можно обратить внимание на то, что распределение времен релаксации  $T_2$  для этого масла никак не меняется по сравнению со свежем маслом. В то же время оба пика на распределении времен релаксации  $T_1$  для подверженного искусственному окислению масла сдвигаются: основной пик в коротковременную область, а небольшой пик с длинным временем релаксации смещается еще дальше в длинновременную область. Такое отличие в изменениях распределений времен  $T_1$  и  $T_2$  свидетельствует о том, что изменения в отработанном масле не сводятся просто к окислению при высокой температуре, а определяются и другими факторами.

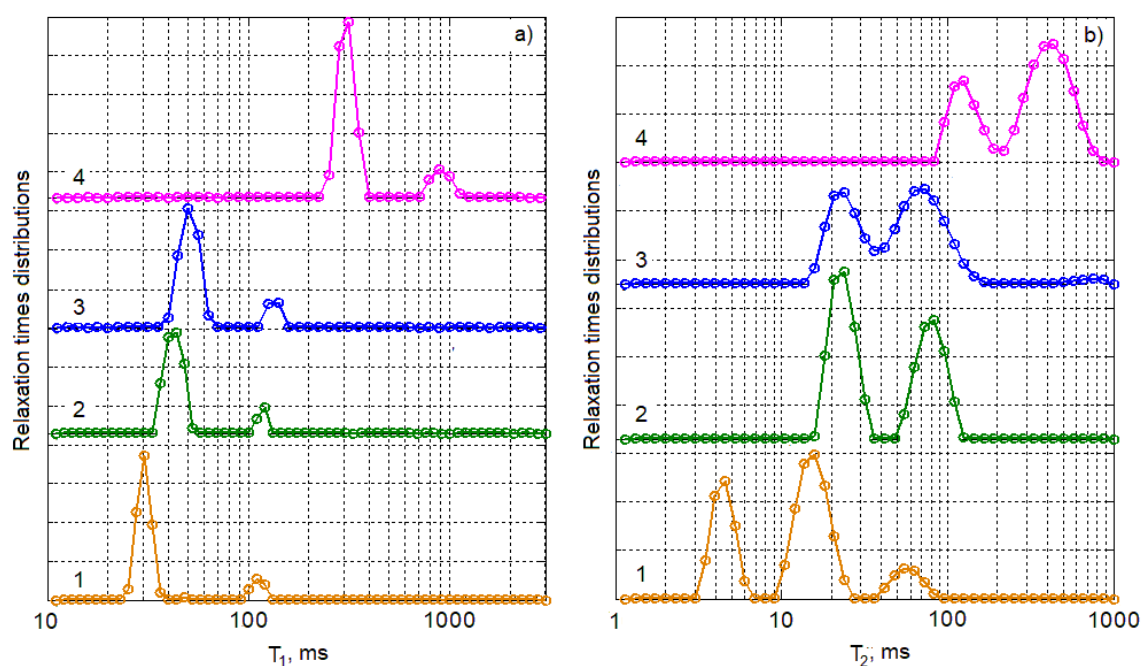


Рис. 6. Распределение времен релаксации  $T_1$  (a) и  $T_2$  (b) для: 1 –масло ТПЕО, 2- масло KUTTENKEULER, 3 - синтетическое масло CASTROL, 4- топливо ТБЛ

Иначе меняются распределения времен релаксации  $T_1$  и  $T_2$  для автомобильного масла KUTTENKEULER после его отработки в двигателе при пробеге 10 тыс. км (рис. 8). Оба пика в распределении времен  $T_2$  сдвигаются в коротковременную область, в то время как пики в распределении  $T_1$  смещаются в длинновременную область.

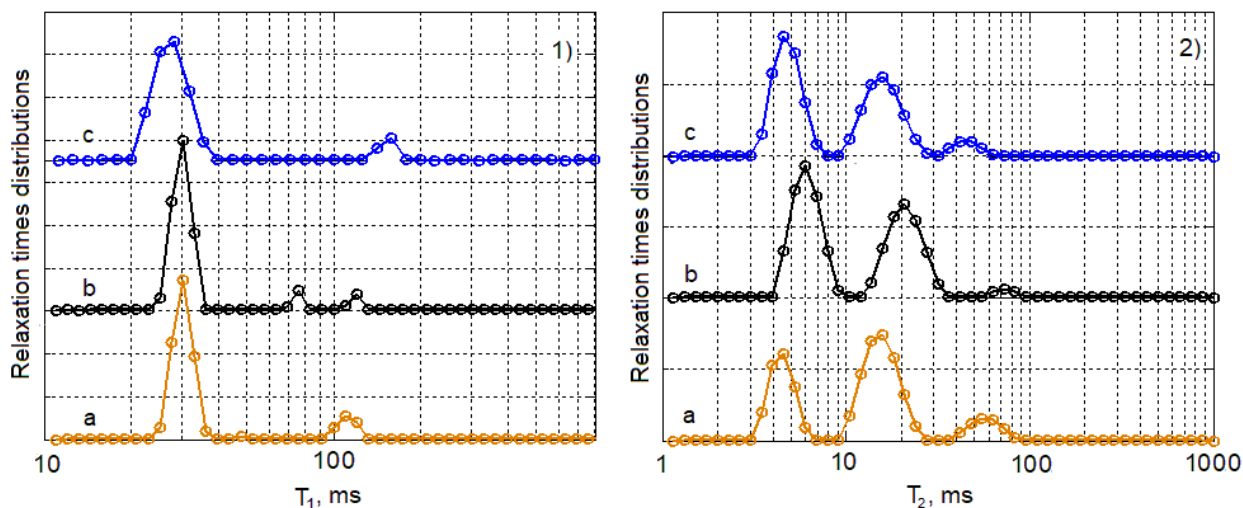


Рис. 7. Распределение времен релаксации  $T_1$  (1) и  $T_2$  (2) для масла ТПЕО свежего (а), масла ТПЕО, отработанного в течение 300 час. (b) и масла ТПЕО свежего после нагрева в течение 25 час. при температуре  $85^\circ\text{C}$  (с)

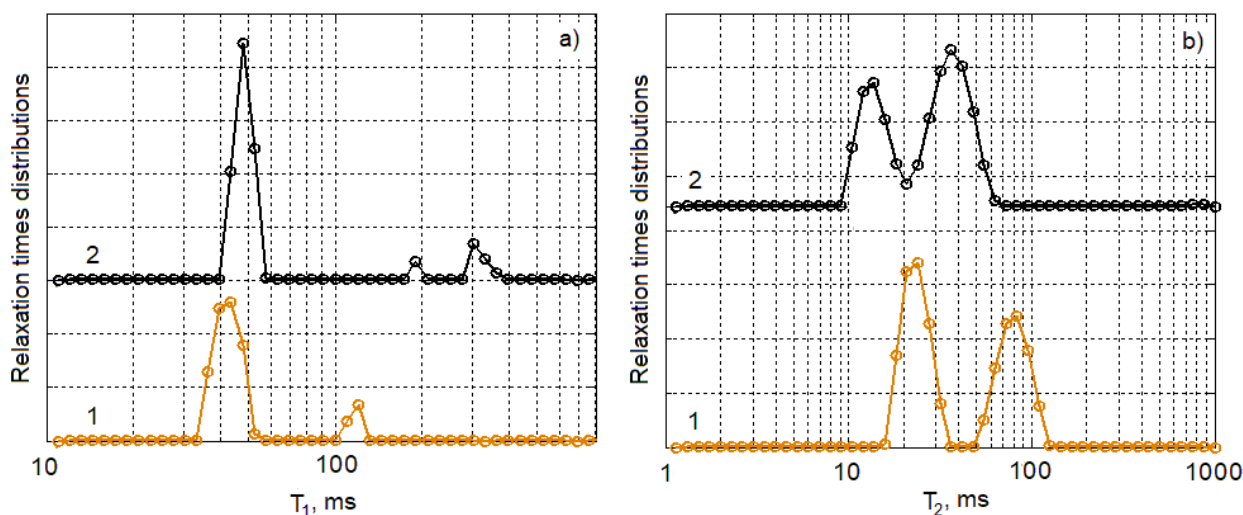


Рис. 8. Распределение времен релаксации  $T_1$  (а) и  $T_2$  (b) для масла KUTTENKEULER свежего (1) и для того же масла после 10 тыс. км пробега. (2)

Можно предположить, что уменьшение времен релаксации  $T_2$  в отработанном масле связано с тем, что времена релаксации протонов очень чувствительны к наличию в жидкостях ферромагнитных частиц, появляющихся в масле в процессе работы двигателя. Поскольку вблизи ферромагнитной частицы магнитное поле существенно изменяется, это увеличивает скорость переориентации спинов протонов молекул масла.

### Заключение

Результаты выполненных исследований показывают, что распределение времен релаксации исследованных образцов существенно отличается друг от друга и могут быть использованы для характеристики нефтепродуктов. В качестве практического применения результатов настоящей работы следует рекомендовать использование ЯМР релаксометрии протонов в низком магнитном поле с инверсией преобразования Лапласа для идентификации и анализа качества судовых топлив и

смазочных материалов. Для проведения такого экспресс-анализа не потребуется сложного и дорогостоящего оборудования и больших затрат времени, а достаточно компактных ЯМР релаксометров типа *NMR mouse* [6] и *Laptop NMR*.

Распределение времен релаксации ЯМР однозначно характеризуют вид и марку топлива или масла, может служить своего рода паспортом продукта, позволяет его идентифицировать, обнаруживать изменение качества топлива и масла, вызванное добавлением других, продуктов и примесей.

**Благодарности.** Авторы благодарят Федеральное агентство по рыболовству Российской Федерации за финансовую поддержку исследований (номер НИОКТР ААА-А18-118040690124-4).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шагин В.В., Двойрис Л.И. Старение и очистка дизельных масел, Калининградское книжное издательство, Калининград, 1971. 200 с.
2. Синявский, Н.Я. Исследование судовых горюче-смазочных материалов с помощью ЯМР релаксометрии с целью контроля качества/ Н.Я.Синявский, И.Г. Мершиев// Морские интеллектуальные технологии.- 2017.- №3 (37).- Т.1.- С.62-66
3. Синявский Н.Я. Исследование возможностей инверсии интегральных преобразований в релаксометрии ЯМР полимеров судового оборудования/ Н.Я.Синявский, И.П. Корнева// Морские интеллектуальные технологии. - 2017.- № 4 (38).- Т.2.- С.196-201
4. Marino I.-G. Regularized Inverse Laplace Transform, <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/6523-rilt/content/rilt.m> [Electronic resource].- 2004.
5. Марусина М. Я. Метод определения времени релаксации протонов моторного масла и возможности его практического использования/ М. Я Марусина, Ю. И. Неронов// Научное приборостроение.- 2010.- Т. 20.- № 2.- С. 37–41
6. Blümich B., Haber-Pohlmeier S., & Zia W. Compact NMR. Berlin/Boston, Walter de Gruyter GmbH, 2014. 276 p.

## METHOD FOR IDENTIFICATION AND ESTIMATION OF QUALITY OF SHIP FUELS AND LUBRICANTS

<sup>1</sup>Sinyavsky Nikolai Yakovlevich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

<sup>2</sup>Mershiev Ivan Georgievich, Engineer

<sup>2</sup>Kupriyanova Galina Sergeevna, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

<sup>1</sup>Kalininsrad State Technical University, Kaliningrad, Russia, e-mail: n\_sinyavsky@mail.ru

<sup>2</sup>Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia, e-mail: ivan.mershiev@gmail.com; galkupr@yandex.ru

*The purpose of this work was to investigate the possibilities of NMR spectroscopy and relaxation techniques for identifying and controlling the quality of marine fuels and lubricants using modern approaches and technical capabilities. The novelty of the study was the use of relaxation NMR of protons in a weak magnetic field with inversion of the integral transformation. The specificity of distributions of relaxation times of the investigated products is shown, recommendations for the creation of perspective instrumentation equipment are formulated.*

## ПРИМЕНЕНИЕ СТИМУЛИРОВАННОГО ЭХА В ЯДЕРНОМ КВАДРУПОЛЬНОМ РЕЗОНАНСЕ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

<sup>1</sup>Снегирев Дмитрий Вячеславович, аспирант

<sup>2</sup>Синявский Николай Яковлевич, д-р физ.-мат. наук, профессор

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Балтийский федеральный университет им. И. Канта»,  
Калининград, Россия, e-mail: ardme12@yandex.ru

<sup>2</sup>Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота  
ФГБОУ ВО «КГТУ», Калининград, Россия, e-mail: n\_sinyavsky@mail.ru

*Предложен новый метод количественной оценки постоянного обмена намагниченностями между различными состояниями с помощью кросс-пиков на  $T_1$ - $T_2$  топограмме, получаемой из экспериментов стимулированного эха ядерного квадрупольного резонанса (ЯКР)*

### Введение

Спиновая релаксация является ключевым параметром, характеризующим динамику спинов вследствие их взаимодействия с окружающей средой. Релаксации могут способствовать многие физические процессы. Для смесей, каждая компонента экспоненциального спада сигнала может иметь собственное значение времени релаксации и, следовательно, полный сигнал ЯКР от смеси будет суперпозицией многих показательных функций. Полученный спектр времен релаксации позволяет выполнить разделение сигналов от различных компонентов, помогает выявить различные фазы и контролировать изменения состава и физических свойств смеси.

Одним из ключевых сдвигов в технологии магнитного резонанса в последнее десятилетие явилось широкое внедрение двухмерных (2М) и многомерных методов для изучения релаксации и диффузии. В отличие от 2М частотной Фурье спектроскопии, в эксперименте 2М релаксации требуется инверсия 2М преобразования Лапласа, которая значительно сложнее, чем инверсия 2М Фурье преобразование. Но такой 2М метод значительно расширяет спектральное разрешение релаксации и диффузии, открывает новые возможности для изучения спиновой динамики и молекулярного движения. Химический обмен и сложная динамика диффузии, например, могут быть изучены при помощи  $T_2$ - $T_2$  и  $T_1$ - $T_2$  экспериментов. Однако, такие подходы к настоящему времени не применялись для изучения движения в твердых телах.

Двумерная обменная релаксометрия ЯМР [1] во многом схожа с 2М обменным частотным ЯМР [2] и ЯКР [3]. ЯМР релаксометрия дает информацию о диффузии и молекулярной динамике, и при этом требует минимальной однородности поля, в отличие от традиционных методов спектроскопии ЯМР и ЯМР изображений. Этот метод в настоящее время находит все больше применений, в связи с развитием устойчивых алгоритмов обратного 2М - преобразования Лапласа [4].

2М - обменная релаксометрия может позволить комплексное исследование распределения ядерных спинов в кристаллитах, интенсивностей обмена намагниченностей, и траекторий обменного движения между различными положениями, которые различаются временами релаксации. Понятие "обмен" подразумевает не только молекулярные переустройства типа вращательных реориентаций, где эти движения сопровождаются



изменениями времен релаксации ЯКР, но и спиновую диффузию намагниченности между разными положениями ядер.

Хотя одномерные распределения времен релаксации  $T_1$  и  $T_2$  могут характеризовать физические свойства сред, как и одномерная частотная спектроскопия, они предоставляют ограниченную информацию при наличии нескольких компонентов и корреляций между различными свойствами. Многомерные методы релаксометрии оказываются способными устранить эти ограничения. Такие методы, как диффузия- $T_2$  (D- $T_2$ ) [5], диффузия-диффузия (D-D) [6] и  $T_1$ - $T_2$  [7] были применены для детального анализа геометрии пор, идентификации обмена и идентификации жидкости методом ЯМР.

$T_2$ - $T_2$  релаксационный обменный эксперимент не только включает информацию о 1М измерении  $T_2$ , но также дает дополнительную информацию о молекулярной динамике, о связях, а также информацию о времени спин-решеточной релаксации  $T_1$  [8]. Информация об обмене из топограмм  $T_2$ - $T_2$  более доступна, чем из других методов релаксометрии ЯМР, так как содержится в наблюдаемых кросс-пиках. Образец с двумя различными компонентами релаксации  $T_2$  приводит к спектру  $T_2$ - $T_2$  с двумя отдельными пиками на главной диагонали и паре недиагональных пиков, возникающих из обмена между этими двумя компонентами.

Имеются попытки прямого анализа сигнала во временной области [9] для качественного определения наличия обмена по искривлению сигнала, полученного в зависимости от разности наблюдений.

В большинстве случаев, обмен и спиновую эволюцию нельзя считать отдельно. Эта ситуация сильно отличается от того, что обычно имеет место в обменной ЯМР Фурье - спектроскопии. Интерпретация обменных 2М – релаксационных карт является гораздо менее простой, чем 2М частотных спектров. В отличие от случая 2М – обменной Фурье спектроскопии, 2М - обменные релаксационные карты никогда не могут быть истолкованы как случай чистого обмена. Обмен здесь никогда не может быть ограничен периодом смешивания. Релаксация и обмен должны рассматриваться одновременно.

В работе [10] использован альтернативный способ проведения обменного  $T_2$ - $T_2$  ЯМР эксперимента, в котором меняется не количество импульсов в первой последовательности CPMG, а время смешивания, что значительно сократило время для проведения эксперимента.

В отличие от методов, используемых в 2М частотной спектроскопии, где корреляционные карты получают путем преобразования Фурье, 2М - релаксометрия опирается на численную двумерную инверсию интегралов Фредгольма первого рода.

В работе [11] впервые использована новая методика регистрации 2М - спектров, основанная на использовании неравномерных временных интервалов в применяемых импульсных последовательностях. Способ позволил сократить время измерения 2М - интерферограммы сигнала за счет уменьшения количества измеряемых точек на временных интервалах, с неравномерно следующими выборками.

Выполненные в работе [12] исследования открывают новые возможности для обменной  $T_2$ - $T_2$  релаксометрии ЯКР, изучения спиновой диффузии, полиморфных превращений и состояния поверхности микроразмерных кристаллов, для изучения заполненных микропористых сред, являющихся перспективными композиционными материалами для науки и промышленности, благодаря возможности регулировать размеры и взаимное расположение внедренных частиц и различных геометрий пор. Метод количественной оценки постоянной обмена намагниченностями без регистрации кросс-пиков на  $T_2$ - $T_2$  топограмме, что позволило существенно сократить как время эксперимента, так и время компьютерной обработки результатов.

Стимулированное эхо (СЭ) широко применяется в объемной селективной спектроскопии, в диффузионной спектроскопии, для обработки ЯМР-изображений, в 2М об-

менной частотной спектроскопии. Подробное описание формирования стимулированного эха можно найти во многих статьях, например, в работе [13]. Стимулированные сигналы эха формируются с помощью трех (или более) радиочастотных импульсов. Проверить, что полученный сигнал действительно является СЭ, можно отключив один радиочастотный импульс. Если это был сигнал СЭ, то он исчезнет, т.к. в его формировании участвуют все три 90-градусных импульса.

Чтобы избавиться от дополнительных сигналов эха можно в окно сбора данных включить только сигнал стимулированного эха. В качестве альтернативы можно применять градиент магнитного поля, который будет расфазировать не нужные сигналы спинового эха, оставляя сигнал СЭ неискаженным. Для получения не искаженного стимулированного эха с максимальной интенсивностью, перед подачей второго р.ч. импульса спины должны быть полностью расфазированы в поперечной плоскости. Фаза спинов после третьего радиочастотного импульса по сравнению с фазой после первого импульса сдвинута на 180 градусов. Максимальный сигнал стимулированного эха составляет в половину меньше максимальной амплитуды спинового эха Хана. Стимулированное эхо уменьшается за счет эффекта спин-решеточной релаксации  $T_1$  между вторым и третьим импульсами и за счет эффектов спин-спиновой релаксации  $T_2$  между первым и вторым импульсами и после третьего импульса.

Легко видеть, что имеющиеся публикации по 2М – обменной релаксометрии относятся только к спектроскопии ядерного магнитного резонанса (ЯМР) для жидкостей в пористых средах. Дальнейшее развитие представлений о влиянии молекулярного движения связано с изучением порошков, полимеров, твердых тел в пористых матрицах и в микрокомпозитных материалах методами 2М - релаксометрии ЯКР с инверсией интегрального преобразования.

Задачей настоящей работы является выяснение закономерностей образования корреляционных и обменных 2М карт при использовании стимулированного эха с участием тяжелых ядер с электрическими квадрупольными взаимодействиями в молекулярных кристаллах. Исследование возможностей 2М - релаксометрии ядерного квадрупольного резонанса (ЯКР) с инверсией интегрального преобразования для получения однозначной количественной информации об интенсивностях и траекториях обмена в молекулярных кристаллах, о связи времен релаксации с соответствующими положениями атомов.

## Теория

Традиционная импульсная последовательность, используемая для получения стимулированного эха, состоит из трех 90-градусных р.ч. импульсов, разделенных интервалами времени  $t_1$  и  $t_2$  (рис. 1).

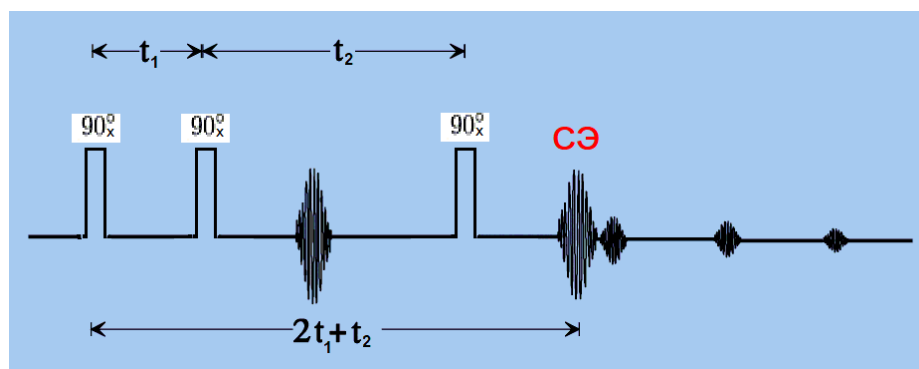


Рис. 1. Импульсная последовательность для регистрации стимулированного эха

Для упрощенного расчета сигналов в процессе обмена нами была выбрана кинетическая модель с двумя состояниями. Пусть начальная намагниченность двух состояний равна:  $\mathbf{M}_0 = (M_{0a} \ M_{0b})$ . Спин-спиновая и спин-решеточная релаксационные матрицы запишутся как:

$$\mathbf{R}_1 = \begin{pmatrix} R_{1a} & 0 \\ 0 & R_{1b} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{R}_2 = \begin{pmatrix} R_{2a} & 0 \\ 0 & R_{2b} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где скорости релаксации для двух состояний равны:  $R_{1a} = \frac{1}{T_{1a}}$ ,  $R_{1b} = \frac{1}{T_{1b}}$ ,  $R_{2a} = \frac{1}{T_{2a}}$ ,  $R_{2b} = \frac{1}{T_{2b}}$ . Матрицу обмена для двух состояний, когда начальные фракции состояний не одинаковы, запишем в виде:

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} k_b & -k_a \\ -k_b & k_a \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Будем приближенно считать, что обмен между состояниями происходит на интервале времени  $t_2$  (время смешивания). Спин-решеточная релаксационная матрица с учетом обмена запишется:

$$\mathbf{R}_1 + \mathbf{K} = \begin{pmatrix} R_{1a} + k_b & -k_a \\ -k_b & R_{1b} + k_a \end{pmatrix} \quad (3)$$

и после диагонализации приобретает вид:

$$\mathbf{Q}^{-1}(\mathbf{R}_1 + \mathbf{K})\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} \lambda_a & 0 \\ 0 & \lambda_b \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Будем для простоты считать, что коэффициенты обмена равны:  $k_a=k_b=k$ . Тогда

$$\lambda_{a,b} = \frac{R_{1a} + R_{1b} + 2k \pm \sqrt{(R_{1a} - R_{1b})^2 + 4k^2}}{2}, \quad (5)$$

а матрица вращения  $\mathbf{Q}$  имеет вид:

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} \frac{-2k}{R_{1a} - R_{1b} - P} & \frac{-2k}{R_{1a} - R_{1b} - P} \\ 1 & 1 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где обозначено:  $P = \sqrt{(R_{1a} - R_{1b})^2 + 4k^2}$ .

Будем рассматривать случай точного резонанса и поведение компонент ядерной намагниченности в промежутках между импульсами описывать уравнениями Блоха:

$$\begin{aligned} \frac{dM_x}{dt} &= -\mathbf{R}_2 \mathbf{M}_x, \\ \frac{dM_y}{dt} &= -\mathbf{R}_2 \mathbf{M}_y, \\ \frac{dM_z}{dt} &= -(\mathbf{R}_1 + \mathbf{K})(M_z - M_0). \end{aligned} \quad (7)$$

До подачи первого р.ч. импульса компоненты намагниченности состояний были равны:

$$\mathbf{M}_x = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{M}_y = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{M}_z = \begin{pmatrix} M_{0a} \\ M_{0b} \end{pmatrix}. \quad (8)$$

После первого импульса:

$$\mathbf{M}_x = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \mathbf{M}_y = \begin{pmatrix} M_{0a} \\ M_{0b} \end{pmatrix}, \mathbf{M}_z = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Перед включением второго импульса компоненты этого вектора станут равны:

$$\mathbf{M}_x = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \mathbf{M}_y = \begin{pmatrix} M_{0a}e^{-R_{2a}t_1} \\ M_{0b}e^{-R_{2b}t_1} \end{pmatrix}, \mathbf{M}_z = \begin{pmatrix} M_{0a}(1 - e^{-R_{1a}t_1}) \\ M_{0b}(1 - e^{-R_{1b}t_1}) \end{pmatrix}. \quad (10)$$

После действия второго  $90^\circ$  – градусного р.ч. импульса получаются вектора:

$$\mathbf{M}_x = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \mathbf{M}_y = \begin{pmatrix} M_{0a}(1 - e^{-R_{1a}t_1}) \\ M_{0b}(1 - e^{-R_{1b}t_1}) \end{pmatrix}, \mathbf{M}_z = \begin{pmatrix} -M_{0a}e^{-R_{2a}t_1} \\ -M_{0b}e^{-R_{2b}t_1} \end{pmatrix}. \quad (11)$$

К моменту третьего импульса  $M_z$  – компоненты намагниченностей можно рассчитать по формуле:

$$\mathbf{M}_z = \begin{pmatrix} -M_{0a}e^{-R_{2a}t_1} \\ -M_{0b}e^{-R_{2b}t_1} \end{pmatrix} e^{-(R_1+k)t_2} + \begin{pmatrix} M_{0a} \\ M_{0b} \end{pmatrix}. \quad (12)$$

После нахождения экспонент от диагонализированных матриц в формуле (12), возвращаясь в исходное представление с помощью матрицы вращения  $\mathbf{Q}$ , находим  $M_z$  – компоненты намагниченностей до начала третьего импульса, а затем и после третьего импульса. Амплитуда сигнала стимулированного эха в момент времени  $2t_1+t_2$ , определяемая суммой намагниченностей обоих состояний, будет равна:

$$S(2t_1 + t_2) = \frac{1}{2(\lambda_a - \lambda_b)} [M_{0a}(R_{1a} - R_{1b} - \lambda_a + \lambda_b)e^{-2t_1R_{2a} - \lambda_b t_2} + M_{0a}(-R_{1a} + R_{1b} - \lambda_a + \lambda_b)e^{-2t_1R_{2a} - \lambda_a t_2} + M_{0b}(-R_{1a} + R_{1b} - \lambda_a + \lambda_b)e^{-2t_1R_{2b} - \lambda_b t_2} + M_{0b}(R_{1a} - R_{1b} - \lambda_a + \lambda_b)e^{-2t_1R_{2b} - \lambda_a t_2}]. \quad (13)$$

Первое и четвертое слагаемые в этом выражении дают диагональные пики  $a$  и  $b$ , соответственно, на топограмме  $T_1$ - $T_2$ . Кросс-пики  $ab$  и  $ba$  дают, соответственно, второе и третье слагаемые в формуле (13).

Амплитуды пиков на топограмме можно записать в виде:

$$\begin{aligned} A_a &= \frac{M_{0a}}{2} \left( 1 - \frac{R_{1a}}{\lambda_a - \lambda_b} \right), \\ A_{ab} &= \frac{M_{0a}}{2} \left( 1 + \frac{R_{1a}}{\lambda_a - \lambda_b} \right), \\ A_{ba} &= \frac{M_{0b}}{2} \left( 1 + \frac{R_{1a}}{\lambda_a - \lambda_b} \right), \\ A_b &= \frac{M_{0b}}{2} \left( 1 - \frac{R_{1a}}{\lambda_a - \lambda_b} \right), \end{aligned} \quad (14)$$

где  $R_{1d} = R_{1a} - R_{1b}$ . Путем несложных преобразований можно получить формулу для постоянной обмена, которую можно вычислить, используя координаты и амплитуды пиков из эксперимента:

$$k = \frac{(\lambda_a - \lambda_b)}{2} \sqrt{1 - \left(\frac{A_{ab} - A_a}{M_{0a}}\right)^2}. \quad (15)$$

### Результаты исследований и их анализ

Экспериментальная интерферограмма, полученная методом стимулированного эха для случая ЯКР  $^{35}\text{Cl}$  в хлорате калия и результат инверсии 2М – преобразования Лапласа от сигнала  $S(t_1, t_2)$  показан на рис. 2.

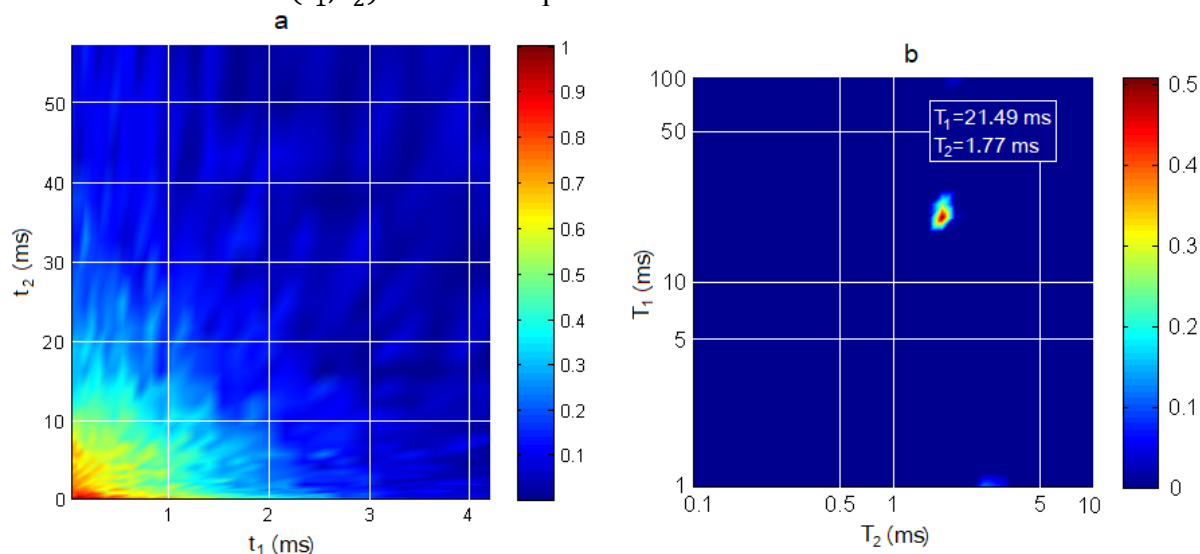


Рис. 2. Зависимость интенсивности сигнала стимулированного эха ЯКР  $^{35}\text{Cl}$  для  $\text{KClO}_3$  от длительностей временных интервалов  $t_1$  и  $t_2$  (a) и корреляция между временами релаксации  $T_1$  и  $T_2$  (b).  $T=292\text{ K}$

Для экспериментальных исследований использовался спектрометр Testag Apollo 300 МГц, с системой термостатирования и программным обеспечением TNMR. Для инверсии интегрального преобразования предполагается использовать программу RILT (Регуляризованное Обратное Преобразование Лапласа), описанную в работе Iari-Gabriel Marino [14]. Для стандартной импульсной последовательности стимулированного эха (рис. 1), при наличии одного состояния спиновой системы и отсутствии обмена ЯКР-сигнал будет описываться выражением:

$$S(t_1, t_2) = \int_0^\infty \int_0^\infty f(T_1, T_2) \exp\left(-\frac{2t_1}{T_2} - \frac{t_2}{T_1}\right) dT_1 dT_2, \quad (16)$$

где  $S(t_1, t_2)$  – измеряемый сигнал, как функция двух времен.

В случае с двухфазным состоянием, где существенное содержание резонирующих ядер может быть связано с обеими фазами и давать вклады в сигнал ЯКР, при наличии обмена между состояниями, для получения 2М – распределения времен релаксации  $f(T_1, T_2)$  следует использовать 2М - инверсию интегральных преобразований, используя выражение (13). Зависимости амплитуд диагональных и кросс-пиков на  $T_1$ - $T_2$  релаксационной топограмме от постоянной обмена  $k$ , согласно формулам (14), иллюстрирует рис. 3.

Моделирование  $2M$  – релаксограммы для двух состояний при наличии обмена с использованием формул (13) и инверсии  $2M$  – преобразования Лапласа приведено на рис. 4. Как видно из рис. 4а и 4б, при наличии обмена на топограмме появляются кросс-пики, а диагональные пики смещаются по горизонтальной оси. Это смещение вызвано тем, что для простоты наличие обмена в модели предполагалось только в длинном интервале времени  $t_2$ .

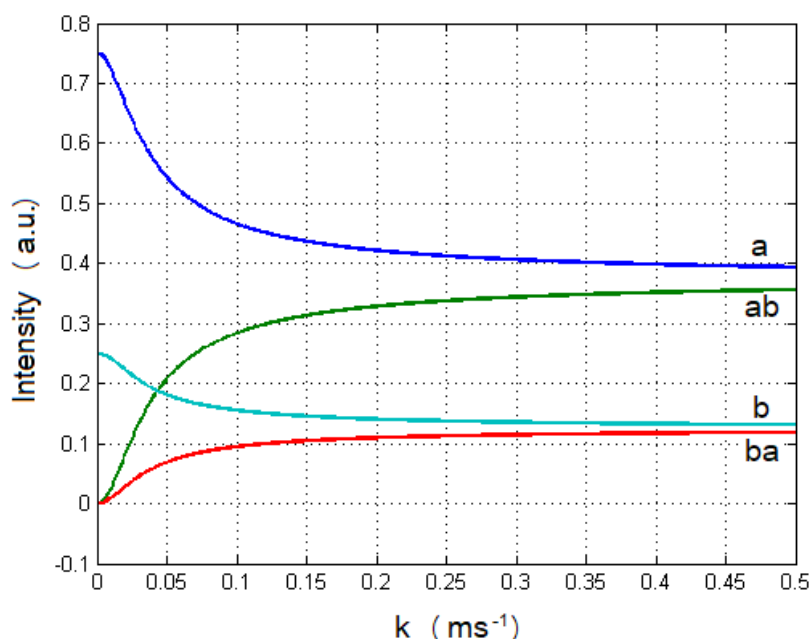


Рис. 3. Зависимости интенсивностей диагональных и кросс-пигов на  $T_1$ - $T_2$  – топограмме от постоянной обмена  $k$  ( $M_{0a}=0.75$ ,  $M_{0b}=0.25$ ,  $T_{1a}=200$  ms,  $T_{2a}=2$  ms,  $T_{1b}=20$  ms,  $T_{2b}=0.2$  ms)

Количественно оценить величину постоянной обмена можно по формуле (15), используя координаты пиков и их амплитуды из эксперимента.

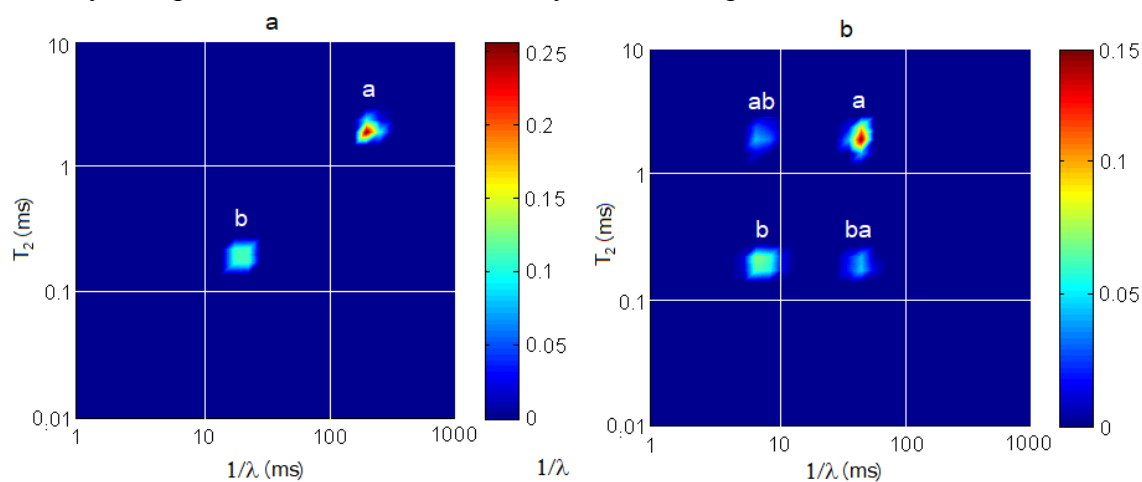


Рис. 4. Моделирование  $T_1$ - $T_2$  корреляционной топограммы для случая двух состояний при отсутствии и при наличии обмена. Исходные данные:  $M_{0a}=M_{0b}=0.5$ ,  $T_{1a}=200$  ms,  $T_{2a}=2$  ms,  $T_{1b}=20$  ms,  $T_{2b}=0.2$  ms,  $k=0$  (a) и  $k=0.05$  ms<sup>-1</sup> (b)

## Заключение

Итак, выполнен анализ кинетических уравнений, описывающих эволюцию намагниченностей, обусловленную процессами релаксации и обмена для двухфазной спиновой системы. Получены выражения для координат диагональных и кросс-пиков  $T_1$  и  $T_2$  и их амплитуд для случая обмена между двумя положениями, позволяющие определять из 2M – эксперимента стимулированного эха постоянные обмена  $k$ . Выполнены симуляции распределений времен релаксации для разных значений параметра  $k$ . На основе последовательности стимулированного эха реализован 2M – релаксационный эксперимент для ЯКР  $^{35}\text{Cl}$  в порошке хлората калия.

Результаты, которые были здесь получены, позволят оптимизировать и осмысленно проводить экспериментальные исследования динамических процессов с участием тяжелых ядер в молекулярных кристаллах, будут способствовать более глубокому пониманию процессов внутримолекулярного движения. Полученные в настоящей работе формулы, позволят определять постоянные обмена для случая двух состояний, однако, предлагаемая экспериментальная техника может быть распространена на случай обмена между несколькими состояниями. Эксперименты по 2M - обменной релаксометрии имеют большой потенциал, предоставляя информацию о молекулярной динамике, связях и диффузионном движении между различными состояниями.

**Благодарности.** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-03-00089а.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Landeghem M.V., Haber H., D'Espinoze de Lacaille J.B., Bluemich B. Analysis of Multisite 2D Relaxation Exchange NMR// Concepts in Magnetic Resonance.- 2010. - V. 36A.- P. 153-169
2. J. Jeener, B. H. Meier, P. Bachmann, and R. R. Ernst. Investigation of exchange processes by two-dimensional NMR spectroscopy// Journal of Chemical Physics.- 1979.- V. 71.- P.4546-4553
3. N. Sinyavsky , N. Velikite & M. Mackowiak. Two-dimensional exchange nuclear quadrupole resonance spectroscopy of molecular crystals// Journal Molecular Physics.- 2001.- V. 99(19).- P. 1653-1667
4. Y.-Q. Song, L. Venkataramanan, M. D. Hurlimann, M. Flaum, P. Frulla, and C. Straley. T1-T2 Correlation Spectra Obtained Using a Fast Two-Dimensional Laplace Inversion // Journal of Magnetic Resonance.- 2002.-V. 154.- P. 261–268
5. Y. Zhang, B. Blümich. Spatially resolved D–T2 correlation NMR of porous media // J. Magn. Reson. – 2014.- V. 242.- P. 41–48
6. J.L. Paulsen, Y.-Q. Song. Two-dimensional diffusion time correlation experiment using a single direction gradient// J. Magn. Reson. – 2014.- V. 244.- P. 6–11
7. M.D. Hürlimann, B. Lauren, Y.-Q. Song. Quantitative characterization of food products by two-dimensional D– and – distribution functions in a static gradient// J. Colloid Interface Sci. – 2006.- V. 297(1).- P. 303–311
8. D.L. Johnson, L.M. Schwartz. Analytic theory of two-dimensional NMR in systems with coupled macro- and micropores// Phys. Rev. E. – 2014.- V. 90.- P. 032407
9. Song R., Song Y.-Q., Vembusubramanian M., Paulsen J.L. The robust identification of exchange from T2–T2 time-domain features// Journal of Magnetic Resonance.- 2016.- V. 265.- P. 164–171
10. M.N. D'Eurydice, E.T. Montrazi, C.A. Fortulan, and T.J. Bonagamba. T2-Filtered T2–T2 Exchange NMR// Journal of Chemical Physics.- 2016.- V.144.- P. 204201

11. O. Glotova, N. Sinyavsky, M. Jadzyn, M. Ostafin, B. Nogaj. Recording 2-D Nutation NQR Spectra by Random Sampling Method// Applied Magnetic Resonance.- 2010.- V.39(3).- P. 205-214,

12. N.Ya. Sinyavsky, N.A. Kostrikova. Determination of exchange ratios in NMR and NQR spectroscopy from the 1D - relaxation dependences for the T2 - relaxation times// Chemical Physics Letters.- 2017.- V. 684.- P.186-190

13. D. Burstein. Stimulated echoes: Description, applications, practical hints// Concepts in Magnetic Resonance.- 1996.- V. 8(4).- P. 269-278

14. Marino I.-G. Regularized Inverse Laplace Transform URL: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/6523-rilt/content/rilt.m> .- 2004

## **APPLICATION OF STIMULATED ECHA IN NUCLEAR QUADRUPOLE RESONANCE FOR DETECTION OF EXCHANGE PROCESSES**

<sup>1</sup>Snegirev Dmitry Vyacheslavovich, graduate student

<sup>2</sup>Sinyavsky Nikolai Yakovlevich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Chair of Physics and Chemistry

<sup>1</sup>Im. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia,

e-mail: ardme12@yandex.ru

<sup>2</sup>Kalininsrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,

e-mail: n\_sinyavsky@mail.ru

*A new method of quantitative estimation of the exchange constant of magnetizations between different states using cross peaks on the T1-T2 topogram obtained from the experiments of stimulated echo for nuclear quadrupole resonance (NQR) is proposed.*