

**XII НАЦИОНАЛЬНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ
«МОРСКАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ.
БЕЗОПАСНОСТЬ МОРСКОЙ ИНДУСТРИИ»**

**XII NATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE
WITH INTERNATIONAL PARTICIPATION
"MARINE TECHNOLOGY AND ENGINEERING.
SAFETY OF THE MARINE INDUSTRY"**

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

**СЕКЦИЯ «БЕЗОПАСНОСТЬ МОРСКОГО ТРАНСПОРТА
И ВЕДЕНИЯ ПРОМЫСЛА»**

SECTION "SAFETY OF MARITIME TRANSPORT AND FISHING"

<i>Бондарева О. М., Рагулина И. Р., Рагулин А. В., Бондарева Е. В.</i> Исследование личностных характеристик, влияющих на эмоциональные состояния и поведение в чрезвычайных ситуациях на море.....	4
<i>Бураковский Е. П., Бураковский П. Е., Павлов А. В., Юсын В. М.</i> Исследование влияния коэффициента распора на поведение судовых пластин в условиях случайного эксплуатационного нагружения.....	11
<i>Бураковский Е. П., Бураковский П. Е., Юсын В. М.</i> Влияние формы обводов в носовой оконечности на ее зарываемость в волну	16
<i>Волков Е. Л., Терлыч С. В.</i> Прогнозирование поведения судов в группе сетевым планированием	21
<i>Ермаков С. В., Морозова С. Ю.</i> Проблемы документирования результатов практической подготовки на судах обучающихся по конвенционным специальностям.....	26
<i>Жуйков М. С., Гуральник Б. С., Кубрин С. С.</i> О безопасности судов в случае наступления параметрического резонанса	33
<i>Кириллов Н. О.</i> Применение космических технологий для создания морской автоматизированной астронавигационной системы	39
<i>Тимофеев В. К., Сирота А. К.</i> Коллективные спасательные средства на рыбопромысловых судах, динамика стоимости, доступность, предложения по развитию.....	45

СЕКЦИЯ «СУДОСТРОЕНИЕ, СУДОРЕМОНТ И МОРСКАЯ ТЕХНИКА»

SECTION "SHIPBUILDING, SHIP REPAIR AND MARINE FACILITIES"

<i>Давлюд И. И.</i> Механика и математическая модель старта БПЛА из транспортно-пускового контейнера на корабле	51
<i>Игушев В. Ф.</i> Влияние флюсов на содержание неметаллических включений в сварных швах при сварке судостроительных сталей автоматическим способом	59
<i>Кудинович И. В., Сыралёва М. Н.</i> Способы борьбы с обледенением балластных судовых цистерн.....	64
<i>Мазур Е. В., Великанов Н. Л.</i> Графо-аналитический и математический анализ в диагностировании цилиндропоршневой группы судового двигателя	73

<i>Терлыч С. В., Волков Е. Л.</i> Оценка веса корпуса при проектировании малых и средних рыболовных судов	80
<i>Чуреев Е. А., Романюта Д. А., Белоусов В. А.</i> Обзор методов оценки буксировочного сопротивления рыбопромысловых судов на основе модельных серийных испытаний на ранних этапах проектирования.....	85
<i>Шевурдяев А. С.</i> Обоснование требований к типовому участку изготовления плоских секций корпусов судов с учетом производственных элементов условий труда	96

СЕКЦИЯ «ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ОБЪЕКТОВ МОРСКОЙ ИНДУСТРИИ»

SECTION "ELECTRICAL SYSTEMS OF MARINE INDUSTRY FACILITIES"

<i>Аксенов А. К., Бочарова Н. В.</i> Измерение скольжения при исследовании асинхронного двигателя.....	101
<i>Белей В. Ф., Лысенко М. А., Коротких К. В.</i> Снижение уровня потерь в системе электроснабжения судостроительного завода «Янтарь» с применением компенсации реактивной мощности	105
<i>Зубавичюс Р. В., Харитонов М. С.</i> Результаты исследования зарядно-разрядных характеристик углеродного аккумулятора	113
<i>Кажекин И. Е.</i> Влияние режима нейтрали на показатели безопасности судовых электросетей в условиях несимметрии	119
<i>Ляшенко А. П., Кажекин И. Е.</i> Разработка системы помощи принятия решений при обслуживании электрооборудования	125
<i>Русаков С. М.</i> Накопители электроэнергии как средство улучшения экологических и экономических показателей морских судов с системой динамического позиционирования....	132
<i>Старостин Е. С., Харитонов М. С.</i> Подход к реализации селективного автоматического повторного включения кабельно-воздушных линий электропередачи в распределительной электрической сети среднего напряжения	138
<i>Хорошенький А. В., Романовский В. В., Бежик А. С.</i> Химические источники тока для судов большой мощности.....	144
<i>Чижма С. Н., Яковлев К. С., Кобзарев И. С., Девятков А. А., Быстров И. М.</i> Система контроля состояния аккумуляторов	148
<i>Шабалин Л. Д., Савенко А. Е., Савенко П. С.</i> Обеспечение работоспособности грузовых кранов с частотным управлением на морских судах	158

СЕКЦИЯ «СТАЦИОНАРНЫЕ И ТРАНСПОРТНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ»

SECTION "STATIONARY AND TRANSPORT POWER PLANTS"

<i>Беркова Е. А., Александров И. С., Герасимов А. А.</i> Теплофизические свойства веществ в энергетике. Вязкость этилциклогексана.....	164
<i>Кошелев С. В., Ейдеюс А. И.</i> Оценка энергетического коэффициента пластинчато-трубчатых теплообменников	172
<i>Кункевич С. В.</i> Тепловой расчет регенератора газовой турбины малой мощности	183
<i>Кункевич С. В., Даровских Г. А.</i> К расчету теплообмена в регенераторах газовых турбин	189
<i>Несмачных Н. А., Юрков С. В.</i> Оптимизация параметров рабочего процесса и конструктивных характеристик центробежной компрессорной ступени газотурбинных установок КГТ-2.0	196
<i>Толмачёв А. В., Мартынова И. Б.</i> Анализ аварии главного двигателя морского буксира «АРТЕМИС ОФФШОР».....	204
<i>Филонов А. Г., Щербаков И. И.</i> К вопросу о сравнительной эффективности жалюзийных и сетчатых сепараторов судовых и стационарных опреснительных установок	210

<i>Шевченко С. Н., Томилко В. Т.</i> Особенности среднеинтегральных термодинамических температур цикла Отто	214
<i>Юрков С. В., Пустошный Я. С., Филиппова В. М.</i> Опыт разработки технологической оснастки для ремонта модуля турбины высокого давления энергетической ГТУ LM6000 производства «GENERAL ELECTRIC».....	218

СЕКЦИЯ «ПРОМЫШЛЕННОЕ РЫБОЛОВСТВО»

SECTION "COMMERCIAL FISHERY"

<i>Волошин А. А.</i> Анализ развития аквакультуры в условиях Балтийского моря.....	225
<i>Недоступ А. А., Насенков П. В.</i> Зависимости для расчета разрывной прочности и относительного удлинения крученых рыболовных материалов	231
<i>Недоступ А. А., Пивоваров А. В.</i> Проектирование и испытания траловой доски	237
<i>Недоступ А. А., Ражев А. О., Коновалова К. В., Сергеев Е. И.</i> Анализ гидродинамического поведения узловых делей.....	241
<i>Недоступ А. А., Сергеев Е. И., Насенков П. В., Коновалова К. В., Волошин А. А.</i> Приближенное обоснование тяги на швартовых маломерного рыболовного судна.....	247
<i>Пивоварова Ю. С., Бачинский А. А.</i> Анализ оборудования для исследования состава рыболовных нитевидных материалов.....	252
<i>Поляничко В. И., Кузнецов М. Ю., Убарчук И. А.</i> Математическая модель поведения минтая в шумовом поле судна.....	260
<i>Скуратов Н. А., Суконнов А. В., Суконнова Т. Е., Львова Е. Е.</i> Сравнение результатов испытаний по определению усилия выборки траловых мешков по слипам судов с данными натуральных замеров	271

СЕКЦИЯ «РАДИОФИЗИКА, РАДИОТЕХНИКА И ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ»

SECTION "RADIOPHYSICS, RADIO ENGINEERING AND INFORMATION SECURITY"

<i>Волхонская Е. В., Коротей Е. В.</i> Модельные исследования корреляционных свойств М-последовательностей стандарта CDMA в среде MathCAD	276
<i>Ильяшов А. Н., Подтопельный В. В., Жестовский А. Г.</i> Анализ научных подходов к определению и прогнозированию компьютерных атак.....	286
<i>Пахотин В. А., Власова К. В., Алещенко А. Н.</i> Операторные методы, согласованные с сигналом	290
<i>Пахотин В. А., Власова К. В., Бессонов В. А.</i> Фактор сингулярности при обработке сигналов методом максимального правдоподобия.....	296

СЕКЦИЯ «БЕЗОПАСНОСТЬ МОРСКОГО ТРАНСПОРТА И ВЕДЕНИЯ ПРОМЫСЛА»

SECTION "SAFETY OF MARITIME TRANSPORT AND FISHING"

УДК 316.6

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК, ВЛИЯЮЩИХ НА ЭМОЦИОНАЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ И ПОВЕДЕНИЕ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ НА МОРЕ

¹Бондарева Ольга Михайловна, канд. психол. наук, ст. преподаватель кафедры судовождения и безопасности мореплавания

²Рагулина Изумруд Рамазановна, канд. геогр. наук, доцент кафедры судовождения и безопасности мореплавания

³Рагулин Андрей Владимирович, курсант Морского института

⁴Бондарева Екатерина Витальевна, магистр Института гуманитарных наук, направления подготовки «Психология»

^{1,2,3}Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ», Калининград, Россия, e-mail: ¹va.bondarev@gmail.com; ²izragulina@mail.ru;

³andrey_ragulin03@mail.ru

⁴Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия

По выбранной методике Л. В. Куликова проведено тестирование курсантов, рядового и командного составов экипажей судов по исследованию личностных характеристик, влияющих на эмоциональные состояния и поведение в ЧС на море. Приведено сравнение результатов тестирования курсантского состава с результатами старшего плавсостава, а также выявлены отклонения основной характеристики эмоционального фона у курсантского состава по параметру «эмоциональная устойчивость».

Мотивирующей стороной выбора и разработки темы стала возможность выявления причин негативного проявления «человеческого фактора», формирования предложений для теоретической и практической подготовки морских офицеров, которые, справляясь со стрессом, смогут предотвратить аварийные ситуации. Анализ проявления психического состояния человека в стрессовых ситуациях показал, что жизнь ставит свои условия быстрее, чем адаптируется человек. Профессиональная экстремально-психологическая подготовка необходима, как часть общей программы подготовки морских специалистов, и должна быть включена, как обязательный элемент, в основную образовательную программу морских учебных учреждений и институтов повышения квалификации морских специальностей [1].

Пассажирские суда курсируют в более благоприятных районах водного пространства, чем суда, перевозящие грузы, однако они также не защищены от природной агрессии морской стихии, инженерных неисправностей, ошибок членов экипажа, находящихся на борту, проявлений человеческого фактора. Возникают чрезвычайные ситуации, которые уносят жизни многих тысяч людей, поэтому катастрофы на пассажирских судах всегда трагичны. Подобные бедствия произошли на современных судах «Адмирал Нахимов», «Булгария», «Эстония», «Коста-Конкордия» и других.

Источником возникших обстоятельств чаще всего является неожиданность и непредвиденность аварийного случая. Пассажиры, несмотря на то что постоянно проходят обучение поведению в чрезвычайной ситуации, не готовы к ней, эмоциональные чувства «захлестывают» и приводят к панике. Члены экипажа в такой ситуации должны правильно организовать эвакуацию людей и спасение судна. Однако при выполнении подобных профессиональных обязанностей не все способны

контролировать свои чувства и управлять ими. Таким образом, допускается проявление раздраженных, беспорядочных непоследовательных, импульсивных действий, которые усугубляют ситуацию, иногда приводят к отрицательному результату [2], что доказывает актуальность выбранной темы.

Предметом исследований в данной работе является личность человека. Существуют следующие психологические методы исследования личности:

- психологическая беседа, наблюдение (самонаблюдение);
- эксперимент (искусственный и естественный);
- биографический метод;
- анкетирование (тестирование).

Существуют также такие виды исследований, при которых с помощью оборудования фиксируются физиологические и биологические характеристики организма и на основании их уже даётся психофизиологическая оценка человека.

Из-за отсутствия соответствующего оборудования этот метод не мог быть осуществлён. Психологическая беседа предполагает соответствующие образование и навыки. Наблюдение и биографический метод требуют большого количества времени, также, как и навыков. Проведение эксперимента для данной работы не представляется возможным (этот метод самый надёжный). Наряду с этим следует сказать, что правильно примененный тест (анкетирование) разрешает собрать за короткий срок большое количество информации, довольно ценный материал для качественного анализа, это повышает производительность исследовательской работы. Поэтому метод анкетирования был выбран в качестве метода исследования.

На основе методики Л.В. Куликова было проведено тестирование рядового и командного составов судов, а также курсантов 3 курса спец. «Судовождение» (судоводители) и спец. «Эксплуатация судовой энергетической установки» (судомеханики).

Автор методики разработал два варианта опросника: полный вариант с восемью шкалами и краткий вариант с шестью шкалами. Краткий вариант предназначен для ситуаций с жестко ограниченным временем для обследования. Этот вариант удобнее для ручной обработки, для всех шкал суммарные баллы подсчитываются непосредственным арифметическим суммированием. Мы использовали краткий вариант.

Назначение методики – определение характеристик настроений и некоторых других характеристик личностного уровня психических состояний с помощью субъективных оценок обследуемого. Основная цель опросника – диагностика относительно устойчивых (доминирующих) состояний [3].

Оценка личностных характеристик, влияющих на эмоциональные состояния и поведение в ЧС на море [3]

В методике Куликова Л.В. при интерпретации полученных числовых величин был использован перевод баллов в стандартные Т-оценки. Шкалы стандартных Т-баллов были построены следующим образом: средние величины приравниваются к 50 Т-баллам; 10 Т-баллов равны одной сигме (сигма – среднеквадратичное отклонение).

Повышенные оценки по шкале – это оценки в 55 и более Т-баллов, т.е. отклонение от средней величины в большую сторону более, чем наполовину сигмы.

Пониженные оценки – это оценки в 45 и менее Т-баллов, аналогично, отклонение от средней величины в меньшую сторону более, чем наполовину сигмы.

Высокие оценки – это оценки в 60 и более Т-баллов, а низкие оценки – это оценки в 40 и менее Т-баллов.

Основные шкалы методики:

Шкала «Ак» оценивает «активное – пассивное отношение к жизненной ситуации» и позволяет составить представление о характеристике состояния, в большинстве случаев сильнее зависящей от соответствующего свойства личности – активности, чем от других факторов. Необходимо учитывать, что активность лишь относительно устойчива, поскольку предрасположенность к активному или пассивному отношению, реагированию зависит от множества текущих обстоятельств социальной среды, а также событий, предшествующего жизненного периода личности. Данный параметр состояния особенно важен при диагностике стрессовых состояний.

Высокие оценки:

- выражено активное, оптимистическое отношение к жизненной ситуации, есть готовность к преодолению препятствий, вера в свои возможности;
- ощущение сил для преодоления препятствий и достижения своих целей;
- жизнерадостность выше, чем у большинства людей.

Низкие оценки:

- пассивное отношение к жизненной ситуации, в оценке многих жизненных ситуаций преобладает пессимистическая позиция;
- неверие в возможность успешного преодоления препятствий.

Шкала «То»: «тонус: высокий – низкий». В ситуации острого стресса человек чаще испытывает ощущения подъема сил, но также наблюдается и обратная реакция – ощущения слабости. Сходная картина может наблюдаться и в затяжном стрессе. Энергические характеристики для любого психического состояния являются важнейшим измерением и поэтому особенно необходимы для прогноза развития состояния индивида. В диагностике стрессовых состояний они дают ценные данные о глубине стресса.

Высокие оценки:

- характерна высокая активность, стеническая реакция на возникающие трудности.;
- субъективные ощущения внутренней собранности, запаса сил, энергии;
- готовность к работе, в том числе длительной.

Низкие оценки:

- характерна усталость, несобранность, вялость, инертность, низкая работоспособность;
- меньше возможностей проявлять активность, расходовать энергию, уменьшен ресурс сил, повышена утомляемость;
- склонность проявлять астенические реакции на возникающие трудности.

Шкала «Сп»: «спокойствие – тревога». В психическом состоянии переживание тревоги имеет определяющее значение для ряда явлений. Именно тревога усиливает звучание эмоциогенных раздражителей различной силы, в том числе и незначительных, увеличивая интенсивность отрицательных эмоций, усугубляя их негативное влияние на сознание, поведение и деятельность. Шкала предназначена для измерения уровня генерализованной тревоги. Среди видов тревоги для этого вида в наибольшей степени характерны длительные, долго не затухающие эмоциональные переживания.

Высокие оценки:

- большая уверенность в своих силах и возможностях, чем у большинства людей.

Низкие оценки:

- присутствует склонность испытывать беспокойство в широком круге жизненных ситуаций, видеть угрозу престижу, благополучию, независимо от того, насколько реальны причины;
- ожидание событий с неблагоприятным исходом, предчувствие будущей угрозы (наказания, потери уважения или самоуважения) без ясного осознания ее источников.

Шкала «Ус»: «устойчивость – неустойчивость эмоционального тона».

Высокие оценки:

- преобладает ровный положительный эмоциональный тон, спокойное протекание эмоциональных процессов;
- высокая эмоциональная устойчивость, в состоянии эмоционального возбуждения сохраняется адекватность и эффективность психической саморегуляции, поведения и деятельности.

Низкие оценки:

- снижена эмоциональная устойчивость;
- легко возникает эмоциональное возбуждение, настроение изменчиво, повышена раздражительность, преобладает негативный эмоциональный тон.

Очень низкие оценки можно интерпретировать как эмоциональную ригидность.

Шкала «Уд»: «удовлетворенность – неудовлетворенность жизнью в целом (ее ходом, процессом самореализации)». Затруднения в процессе самореализации приводят к переживаниям объемного эмоционального дискомфорта. Данная характеристика имеет особую диагностическую значимость в индивидуальной консультативной и психокоррекционной работе. Переживания полноты

жизни – одна из основных опор психологической устойчивости личности. Ощущения опустошенности являются фактором риска возникновения невротических и депрессивных расстройств, алкогольной зависимости. Суждения, вошедшие в данную шкалу, относятся к внутренним аспектам переживаний, к чувству удовлетворенности своей жизнью.

Высокие оценки:

- удовлетворенность жизнью в целом, ее ходом, самореализацией, тем, как идет жизнь;
- человек ощущает способность брать на себя ответственность и возможность делать свой выбор, в котором слышен голос собственного «Я»;
- субъект чувствует готовность преодолеть трудности в реализации своих способностей (если высшие потребности активизированы);
- достаточно высокая оценка личностной успешности.

Низкие оценки:

- неудовлетворенность жизнью в целом, ее ходом, процессом самореализации и тем, как именно в настоящее время разворачиваются основные жизненные события;
- низкая оценка личностной успешности. В данный момент человек не нашел себя полностью, не раскрыл, не ощутил в себе надежных внутренних опор, не чувствует способности требовать от самого себя правдивых ответов. Часто характерен уход в сомнения, который позволяет уклониться от необходимости делать жизненный выбор, прислушиваясь прежде всего к самому себе, принимая на себя ответственность за то, что с тобой происходит.

Контрольная шкала «По»: «положительный – отрицательный образ самого себя». Эта шкала вспомогательная, она позволяет определить критичность самооценивания (низкую или высокую), адекватность самооценивания. Критичность самооценивания тесно связана с принятием личностью себя. Чем более положителен образ самого себя, тем меньше человек видит в себе недостатков. Принятие себя оказывает существенное влияние на настроение – чем полнее принятие себя и чем больше в эмоциональном отношении к себе положительных чувств, тем выше настроение.

Показатели по шкале «По» имеют значимую положительную корреляцию с показателями по основным шкалам. Позитивное принятие себя улучшает психическое состояние, и наоборот – более благоприятное состояние располагает к тому, чтобы видеть свои недостатки незначительными, позволяет оценивать свое поведение как более близкое к нормативному.

Очень высокие оценки говорят о недостаточно развитом понимании себя. Сумма более 65 баллов предполагает низкую критичность в самооценивании, недостаточную адекватность самооценки, неискренность. Другими причинами могут быть: отрицательное отношение к обследованию, влияние сильной заинтересованности обследуемого в «положительных, хороших» результатах обследования.

Оценки 60-64 балла означают сниженную критичность в самооценивании, недостаточную адекватность самооценки. Если по шкалам «Ус», «Сп» или «Уд» получены высокие оценки – более 60, то, скорее всего, данные в целом недостаточно надежны.

Показатели в диапазоне 40-59 характеризуют степень принятия личностью себя. Чем выше стандартный балл, тем ниже критичность самооценивания и больше принятие себя со всеми своими недостатками. При оценках менее 50 баллов есть основания говорить о достаточной искренности в ответах, выраженном стремлении к адекватности в оценке своих психологических особенностей и своего состояния, о критичности в самооценивании.

Низкие оценки – менее 40 баллов – говорят не только о высокой критичности в оценке себя и большом стремлении быть искренним, но и о негативном отношении к себе.

В таблице 1 представлены средние значения параметров состояния.

Результаты тестирования

Тестируемые	«Ак»	«То»	«Сп»	«Ус»	«Уд»	«По»
Командный состав	40	51	52	52	61	50
Рядовой состав	34	52	49	51	55	58
курсанты спец. «Судовождение»	51,5	53,8	56,9	55,9	61,2	51,4
курсанты спец. «Эксплуатация судовой энергетической установки»	48,2	50,4	55,8	55,9	59,3	54,6

Результаты тестирования представлены в виде диаграммы полученных числовых величин по 6 параметрам психического состояния для всех тестируемых групп (рис. 1)

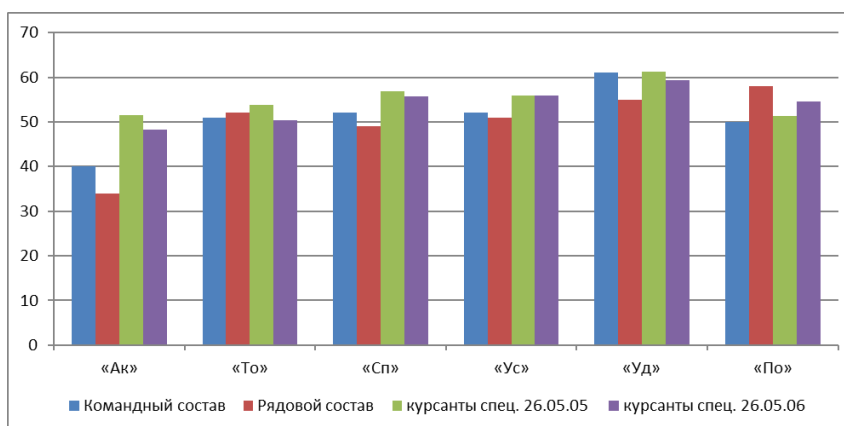


Рис. 1- Графические результаты тестирования по 6 показателям

На рисунке 2, представлены результаты тестирования отдельно для каждой группы.

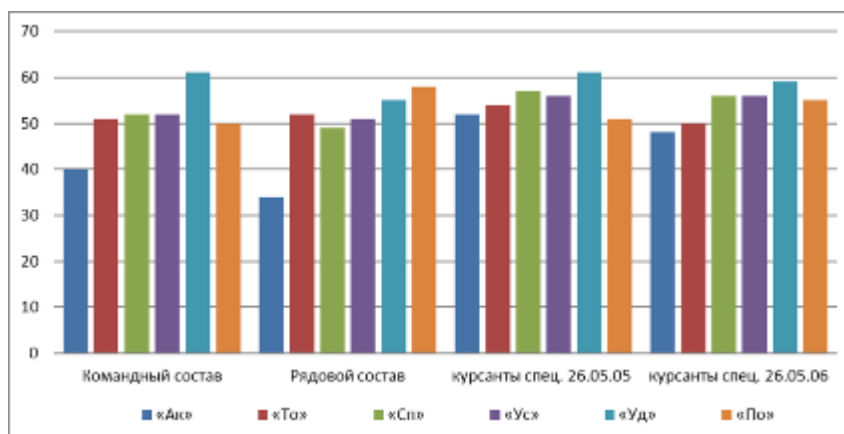


Рис. 2- Графические результаты тестирования по группам

В процессе исследования по шкале «Ак» было выявлено отклонение ниже нормы у рядового и командного составов экипажей судов, проходивших тестирование на курсах повышения квалификации. У курсантского состава, прошедшего тестирование, этот показатель в норме.

По шкале «То» все группы тестируемых показали вполне нормальный результат, это объяснимо спецификой проверки, все моряки были протестированы на берегу.

В критерии оценки параметра состояния «Сп» все показатели не выходят за рамки нормальных значений. Совсем незначительно выделяется параметр курсантского состава, он немного ниже нормы, но это можно объяснить психологической нагрузкой, связанной со скорой сдачей летней сессии.

По шкале «Уд» в значениях этого параметра состояния можно заметить существенные различия в группах, прошедших тестирование. Самый высокий балл оценки имеет командный состав, что можно объяснить достаточно просто: офицеры уважаемы, имеют хорошие оклады, устоявшуюся работу, это

позволяет людям твердо стоять на ногах и быть удовлетворенными жизнью. В рядовом составе показатель нормальный. У курсантов этот показатель также выше нормы (у будущих судоводителей даже выше, чем у судомехаников)...

Результаты контрольной шкалы «По» оптимальны во всех группах, прошедших тестирование (от 50 до 58 баллов), что говорит о хорошем результате и достоверности всего исследования.

Основной целью исследования было определение характеристики «устойчивость», поскольку она напрямую связана со склонностью к любым крайним проявлениям эмоционального волнения, пусть то стресс, паника, эйфория и т.д. (рис. 3).

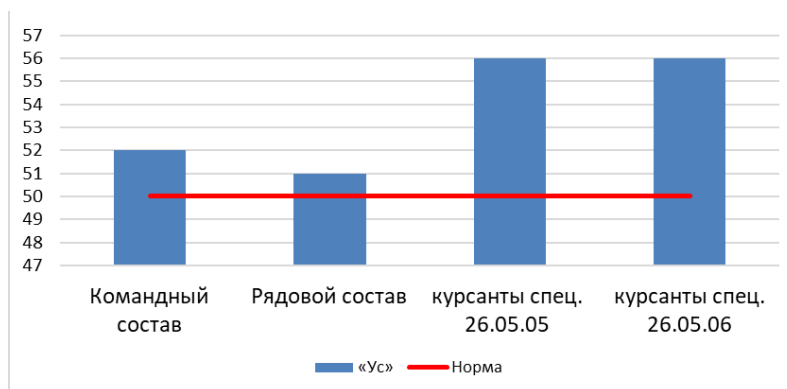


Рис.3 - Графические результаты шкалы «устойчивость эмоционального тона»

Наибольшее отклонение от нормы отмечено у тестируемых курсантов, это связано с возрастом и малым опытом работы, когда у командного и рядового состава этот результат в пределах нормы. Отталкиваясь от фактических значений, можно предположить, что курсанты в меру своих обстоятельств, наиболее склонны к эмоциональной нестабильности, но с опытом эта тенденция изменяется в лучшую сторону.

Заключение

Нормальное состояние является важнейшей частью всей психической регуляции, играет существенную роль в любом виде деятельности и поведения. Однако теория психических состояний далека от завершенности, очень многие ее аспекты не изучены с необходимой полнотой [1-9].

Профессиональная экстремально-психологическая подготовка необходима, как часть общей программы подготовки морских специалистов, и должна быть включена, как обязательный элемент, в основную образовательную программу всех морских учебных заведений и институтов повышения квалификации всех морских специальностей. Для проведения такого обучения необходимы опытные специалисты, имеющие богатейший морской опыт работы и прошедшие специальную экстремально-психологическую подготовку на специальных курсах.

ИМО включила этот элемент в требования Кодекса ПДНВ компетентности плавсостава – (Глава 2 таблицы А-II/1, А-II/2, А-III/1), согласно которому старший командующий состав и вахтенные помощники капитана, вахтенные механики должны обладать «лидерскими и управленческими навыками», как компетенциями, способствующими ситуационной информированности и принятию решений (по сути адаптации к ситуации).

Проведенные исследования представляют собой основу для дальнейшего, более глубокого изучения индивидуальных свойств личности судовых специалистов и применения полученных знаний в практике мореплавания. Анализ психологических проблем при выявлении особенностей психологического взаимодействия членов экипажа морских судов в экстремальной ситуации был проведен на основе применения психологического тестирования, который отражает лишь косвенный подход к изучению поставленной задачи. Но даже полученные результаты говорят о необходимости специальной психологической подготовки судоводителей и судомехаников, направленной на формирование безопасной культуры мореплавания.

В период непрерывной подготовки и переподготовки судовых специалистов необходимо акцентировать внимание на существующей проблеме для того, чтобы человек осознавал тот факт, что

опыт не защищает от ошибок профессиональной деятельности, а надежность человека имеет предел и обусловлена индивидуальными свойствами личности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондарева, О.М., Рагулина, И.Р., Левченко, О.В., Бондарева, Е.В. Стрессом можно управлять: анализ проявления психического состояния человека в стрессовых ситуациях. //Балтийский морской форум: материалы X Международного Балтийского морского форума 26 сентября - 1 октября 2022 года [Электронный ресурс]: в 7 томах. Т. 2. «Морская техника и технологии. Безопасность морской индустрии», X Международная научная конференция. – Калининград: Изд-во БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ», 2022. – С. 4-13.
2. Даниленко, А.А., Даниленко А.Ан. Профессиональная надёжность плавсостава как важнейшее условие безопасности судоходства //Эксплуатация морского транспорта. 2008, №3 (53).
3. Куликов, Л. В. Психология настроения. СПб.: Изд-во С.-Петербургского университета, 1997. – 228 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://psycabi.net/testy/59422-metodika-opredeleniya-dominiruyushchego-sostoyaniya-polnyj-ds-8-i-sokrashchennyj-ds-6-varianty-oprosnika>
4. Смирнов, В.Н. Психология управления персоналом в экстремальных условиях: учеб. пособие для студ. ВУЗов. – М. : Издательской центр «Академия», 2007. - 256 с.
5. Даниленко, А.А. Психологические основы управления: учеб. пособие для вузов / А.А. Даниленко. - С-Пб.: Изд-во ГМА им. С.О. Макарова, 2000.- 124с.
6. Психология толпы. Правила личной безопасности [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://lafemmod.ru/raznoe/psixologiya/416-psixologiya-tolpy.html>.
7. Клименко, В.Д., Сазонов, А.Е. Учет человеческого фактора в судоходных компаниях. Морские информационные технологии: Сб. науч. трудов, выпуск 2., - СПб.: Элмор, 2002. - 164 с.
8. Смирнов, Б.А., Долгополова, Е.В. Психология деятельности в экстремальных ситуациях. – Харьков: Изд-во Гуманитарный центр, 2008. – 276 с.
9. Бондарев, В.А., Бондарева, О. М. Психологическая надежность штурманского состава – основа безопасности мореплавания в экстремальных условиях. // Научно-технические разработки в решении проблем рыбопромыслового флота и подготовки кадров. Материалы 10-й межвузовской научно-технической конференции аспирантов, соискателей и докторантов, 12-13 ноября 2009г., - Калининград: Издательство БГАРФ, 2010. - С. 41-57.

RESEARCH OF PERSONAL CHARACTERISTICS AFFECTING EMOTIONAL STATES AND BEHAVIOR IN EMERGENCIES AT SEA

¹Bondareva Olga Mikhailovna, Candidate of Psychological Sciences, Associate Professor

²Ragulina Izumrud Ramazanovna, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor

³Ragulin Andrey Vladimirovich, kadet

⁴Bondareva Ekaterina Vitalievna, Master's degree student

^{1,2,3}Baltic Fishing Fleet State Academy FSBEI HE "KSTU", Kaliningrad, Russia,
e-mail: ¹va.bondarev@gmail.com; ²izragulina@mail.ru; ³andrey_ragulin03@mail.ru

⁴Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
"Baltic Federal University I. Kant", Russia

In the article, according to the selected methodology of L.V. Kulikov, testing of cadets, enlisted men and officers of ship crews was conducted to study personal characteristics that affect emotional states and behavior in emergency situations at sea. A comparison of the results of testing the cadet staff with the results of senior seafarers is given, and deviations in the main characteristic of the emotional background of the cadet staff according to the parameter "emotional stability" are revealed.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА РАСПОРА НА ПОВЕДЕНИЕ СУДОВЫХ ПЛАСТИН В УСЛОВИЯХ СЛУЧАЙНОГО ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО НАГРУЖЕНИЯ

¹Бураковский Евгений Петрович, д-р техн. наук, профессор

²Бураковский Павел Евгеньевич, канд. техн. наук, доцент

³Павлов Андрей Викторович, студент

⁴Юсып Вячеслав Михайлович, капитан 1 ранга, начальник кафедры теории, устройства и живучести корабля

^{1,4}Балтийское высшее военно-морское училище им. адмирала Ф. Ф. Ушакова, Калининград, Россия, e-mail: ¹e_burakovsky@mail.ru; ⁴v-y48@yandex.ru

^{2,3}Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ», Калининград, Россия, e-mail: ²paul_b@mail.ru; ³pavlov_92@mail.ru

Исследуется влияние коэффициента распора на процесс накопления остаточных прогибов в пластинах обшивки корпусов судов под действием случайных эксплуатационных нагрузок. Отмечено, что для более обоснованной оценки технического состояния корпусов судов с прогрессирующими дефектами типа гофрировки целесообразно учитывать влияние изменения граничных условий на процесс накопления.

1. Постановка задачи

Анализ получаемых судами повреждений корпусных конструкций показал, что одним из наиболее распространенных эксплуатационных дефектов является гофрировка обшивки бортовых перекрытий [1]. Подобные повреждения являются следствием действия интенсивных локально распределенных нагрузок, носящих случайный характер. Учитывая, что гофрировка относится к прогрессирующим дефектам, для оценки технического состояния корпусов судов необходимо располагать аппаратом, позволяющим прогнозировать её параметры и оценивать допускаемый срок эксплуатации судна. Существующие методики [2, 3] применимы лишь при постоянстве условий эксплуатации судна и, кроме того, не учитывают изменение граничных условий для пластин в процессе эксплуатации. Таким образом, перспективным направлением совершенствования оценки технического состояния корпусов судов с прогрессирующими дефектами типа гофрировки является внедрение математического аппарата, позволяющего учитывать влияние реальных условий эксплуатации и изменения распорных характеристик обшивки на процесс накопления прогибов пластин. Кроме того, при назначении нормативной стрелки прогиба пластин целесообразно применение вероятностных подходов [1].

2. Моделирование процесса накопления остаточных прогибов

В настоящей работе было исследовано влияние коэффициента распора (K_p) на процесс накопления остаточных прогибов в пластинах различной толщины. Значения K_p изменялись в диапазоне от 0,1 до 0,3 с шагом 0,05. Кроме того, анализ результатов выполнялся с использованием представленных в [1] данных, полученные при жестком распоре $K_p=1$. Толщины обшивки t изменялись от 8 мм до 14 мм, в качестве материала принималась судокорпусная сталь с пределом текучести $\sigma_T=235$ МПа. С целью упрощения анализа распределение интенсивности внешних нагрузок принималось усеченным экспоненциальным с плотностью вероятности $f(q)$, определяемой зависимостью

$$f(q) = \frac{\lambda e^{-\lambda(q-q_{min})}}{1 - e^{-\lambda(q_{max}-q_{min})}}, \quad (1)$$

где q_{min} , q_{max} – минимальное и максимальное значения интенсивности нагрузок, учитываемых при рассмотрении процесса накопления прогибов;

λ – параметр экспоненциального распределения.

В рамках проведенного анализа принималось, что $q_{min}=1,6$ МПа, а $q_{max}=4,8$ МПа, что соответствует реальным значениям интенсивности локально распределенных эксплуатационных нагрузок.

Для осуществления моделирования процесса накопления прогибов для каждого значения коэффициента распора и толщины обшивки по методике, представленной в [1], строилась статическая кривая, а затем предельная кривая накопления по зависимости, приведенной в [1]. Характерные зависимости приведены на рис. 1, где цифрой 1 обозначена статическая кривая, цифрой 2 – предельная кривая накопления. Для осуществления моделирования указанные кривые, а также кривые накопления для соответствующих уровней внешних нагрузок, аппроксимировались полиномом шестой степени.

Анализ результатов при вариации коэффициента распора показал, что данный параметр оказывает существенное влияние, как на статическую кривую, так и на предельную кривую накопления, что, в свою очередь, должно влиять на процесс накопления прогибов под действием случайных эксплуатационных нагрузок.

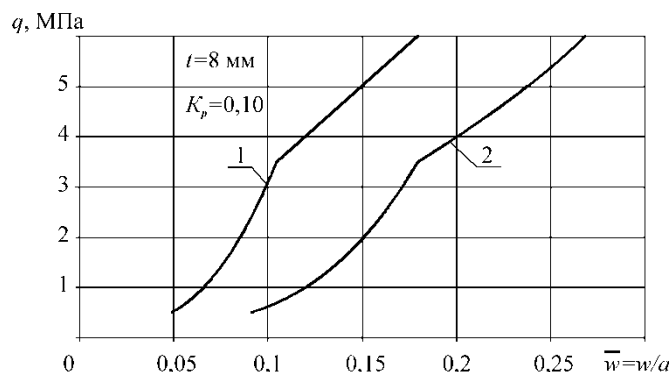


Рис. 1. Статическая и предельная кривая накопления для пластины толщиной при коэффициенте распора $K_p=0,1$ и толщине пластины $t=8$ мм

Ниже представлены результаты моделирования процесса накопления остаточных прогибов в пластинах наружной обшивки при различных значениях коэффициента распора. В процессе вычислительного эксперимента были рассмотрены четыре толщины наружной обшивки, параметры распределения интенсивности внешних нагрузок варьировались.

3. Результаты моделирования и их обсуждение

Так, на рисунке 2 приведены результаты моделирования процесса накопления остаточных прогибов при $\lambda=2,50$ МПа⁻¹. Видно, что влияние коэффициента распора на накопленный прогиб весьма существенно. Так, для пластин с $t=8$ мм увеличение K_p в диапазоне 0,10–1,0 приводит к уменьшению w/a на 22%.

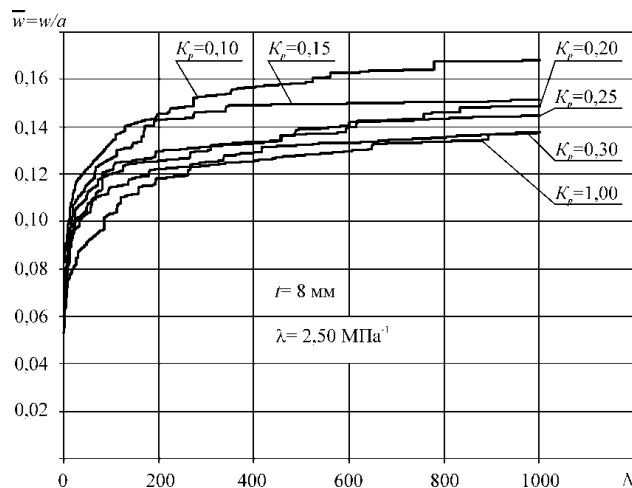


Рис. 2. Накопление прогибов при $t=8$ мм и $\lambda=2,50$ МПа⁻¹

Следует отметить, что при данном значении параметров распределения интенсивности внешней нагрузки ($\lambda=2,50 \text{ МПа}^{-1}$) преобладают нагрузки сравнительно небольшой интенсивности, поэтому после числа нагружений $N=1000$ процесс накопления ещё не стабилизировался, т.е. кривые накопления не вышли на горизонтальный участок.

Результаты моделирования процесса накопления остаточных прогибов при $\lambda=1,25 \text{ МПа}^{-1}$ представлены на рисунке 3. Видно, что при относительно малых толщинах пластин ($t= 8 \text{ мм}$ и $t= 10 \text{ мм}$) влияние коэффициента распора на процесс накопления можно считать существенным лишь при $K_p < 0,2$. При значениях коэффициента распора, превышающих указанный предел, для решения практических задач можно использовать зависимости, полученные для пластин, работающих в условиях жёсткого распора. С увеличением толщины пластин влияние коэффициента распора на процесс накопления остаточных прогибов становится более существенным.

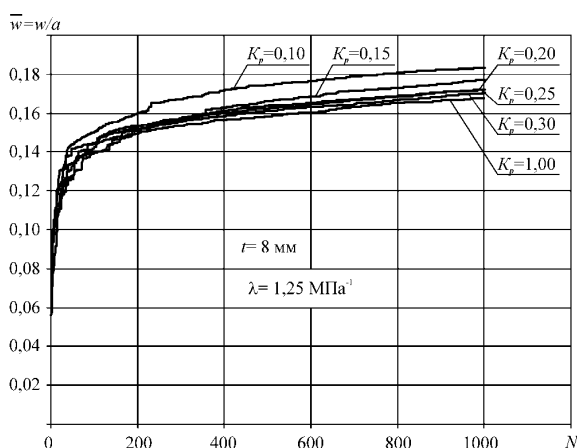


Рис. 3. Накопление прогибов при $t= 8 \text{ мм}$ и $\lambda=1,25 \text{ МПа}^{-1}$

Проведенный анализ показал, что с увеличением t влияние K_p на отношение w/a становится более существенным. В рамках настоящего исследования были построены зависимости, аналогичные представленным на рисунке 3, но для других толщин обшивки. Помимо толщины 8 мм, в рамках настоящего исследования рассматривались толщины 10 мм, 12 мм и 14 мм. Таким образом, было исследовано влияние двух факторов на процесс накопления: толщины обшивки и коэффициента распора. Для первого фактора задавались четыре уровня, для второго – шесть уровней, пять из которых были равноотстоящими. Вариация K_p во всем рассмотренном интервале его значений (от 0,1 до 1,0) для пластины толщиной $t= 8 \text{ мм}$ приводит к изменению накопленного прогиба на 9 %. С увеличением толщины пластины t до 10 мм это изменение достигает 16%. Для пластин с $t= 12 \text{ мм}$ и $t= 14 \text{ мм}$ изменение w/a при вариации коэффициента распора в исследованном диапазоне составляет 25% и 34% соответственно.

Для пластин с толщиной $t= 12 \text{ мм}$ и $t= 14 \text{ мм}$ влияние коэффициента распора проявляется и при его значениях, превышающих $K_p=0,2$. Так, при увеличении коэффициента распора с 0,20 до 1,0 наблюдается уменьшение относительного значения накопленного прогиба w/a с 0,132 до 0,121 при $t= 12 \text{ мм}$, т.е. уменьшение составляет 8%. Для пластины толщиной $t= 14 \text{ мм}$ этот эффект ещё более существенен. Здесь при увеличении коэффициента распора с 0,20 до 1,0 накопленный прогиб уменьшается почти на 14%.

На рисунке 4 приведены результаты моделирования процесса накопления остаточных прогибов представлены при $\lambda=0,625 \text{ МПа}^{-1}$. Как видно из приведенных данных, при экспоненциальном распределении интенсивности внешних нагрузок с параметром $\lambda=0,625 \text{ МПа}^{-1}$ наблюдается та же тенденция, что и в случае $\lambda=1,25 \text{ МПа}^{-1}$, т.е. увеличение толщины пластин сопровождается повышением влияния коэффициента распора на процесс накопления прогибов. При этом изменение коэффициента распора во всем исследованном диапазоне его значений (от 0,1 до 1,0) для пластины толщиной $t= 8 \text{ мм}$ приводит к изменению накопленного прогиба на 10 %, т.е. на 1% больше, чем при $\lambda=1,25 \text{ МПа}^{-1}$. При больших толщинах пластин влияние изменения коэффициента распора на процесс накопления при $\lambda=0,625 \text{ МПа}^{-1}$ менее выражено, чем при $\lambda=1,25 \text{ МПа}^{-1}$. Так, при толщине пластины $t= 10 \text{ мм}$ уменьшение коэффициента распора с 1,0 до 0,1 приводит к росту прогибов на

12%. При $t=12$ мм и $t=14$ мм изменение накопленного прогиба при вариации K_p в исследованном диапазоне составляет 19% и 29% соответственно, что на 4–6% меньше, чем в случае $\lambda=1,25$ МПа⁻¹.

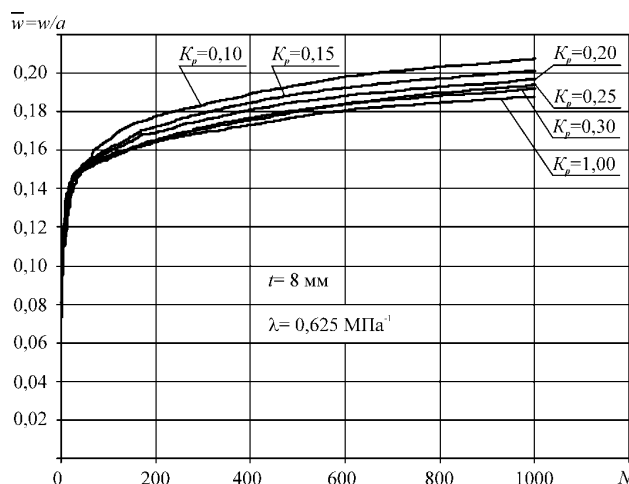


Рис. 4. Накопление прогибов при $t=8$ мм и $\lambda=0,625$ МПа⁻¹

На рисунке 5 приведены результаты моделирования процесса накопления остаточных прогибов при $\lambda=0,125$ МПа⁻¹.

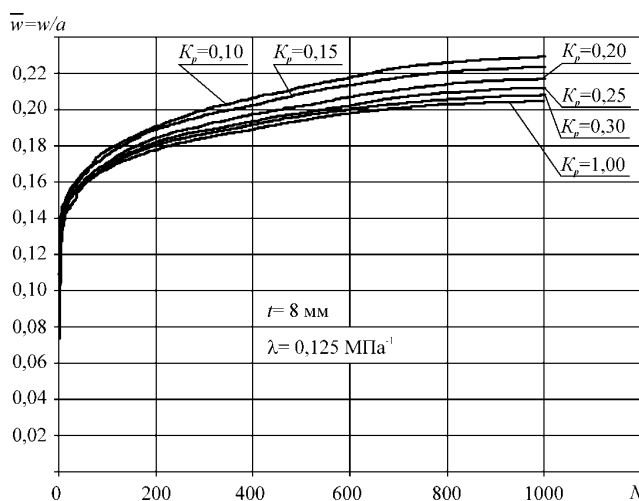


Рис. 5. Накопление прогибов при $t=8$ мм и $\lambda=0,125$ МПа⁻¹

Из графиков видно, что увеличение K_p от 0,1 до 1,0 для пластины при $t=8$ мм приводит к изменению накопленного прогиба на 12%. В случае $t=10$ мм снижение K_p с 1,0 до 0,1 приводит к росту прогибов на 8%. Для значений $t=12$ мм и $t=14$ мм рост накопленного прогиба при изменении коэффициента распора в исследованном диапазоне составляет 12% и 22% соответственно.

Заключение

Как следует из представленного выше анализа, коэффициент распора может оказывать существенное влияние на процесс накопления остаточных прогибов в пластинах судового корпуса при действии на них случайных эксплуатационных нагрузок высокой интенсивности. При этом, как уже отмечалось выше, гофрировка относится к прогрессирующим дефектам, т.е. в процессе эксплуатации судна нередко наблюдается рост стрелок прогиба пластин за период между освидетельствованиями судна. При этом рост стрелок прогиба приводит к существенному изменению распорных характеристик обшивки, связанному с падением значений коэффициента распора.

Учитывая вышеизложенное, можно сделать вывод, что для более обоснованного прогнозирования стрелок прогиба пластин и оценки допустимого срока эксплуатации корпуса судна с гофрировкой

наружной обшивки целесообразно использовать математический аппарат, позволяющий учитывать влияние коэффициента распора на процесс накопления прогибов. При наличии соответствующих данных по характеристикам внешних нагрузок предлагаемый подход позволяет прогнозировать стрелки прогиба в условиях изменения распорных характеристик обшивки даже в случае изменения условий эксплуатации судна. При этом следует заметить, что используемые в действующих нормативных документах [2] зависимости для прогнозирования стрелок прогиба пластин и оценки допустимого срока эксплуатации судна получены при условии постоянства характеристик потока внешних нагрузок, что не позволяет их эффективно использовать в такой ситуации. Кроме того, они не учитывают влияние коэффициента распора на процесс накопления, которое, как показано выше, может быть весьма существенным.

Таким образом, предложенный в настоящей статье подход позволяет более обоснованно определять стрелки прогибов пластин в заданных условиях эксплуатации судна, а также оценивать допустимый срок эксплуатации конструкций до достижения прогибами пластин некоторого нормативного прогиба [2, 3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бураковский, Е.П. Нелинейные задачи упруго-пластического деформирования судовых корпусных конструкций: монография / Е.П. Бураковский, П.Е. Бураковский. – Калининград: Филиал ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия» в г. Калининграде, 2019. – 440 с.
2. Приложения к правилам классификационных освидетельствований судов в эксплуатации / Российский Морской Регистр Судоходства. – СПб.: РМРС, 2020. – 123 с.
3. Максимаджи, А.И. Оценка технического состояния корпусов морских судов / А.И. Максимаджи, Л.М. Беленький, А.С. Брикер, А.Ю. Неугодов. – Л.: Судостроение, 1982. – 156 с.

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE SPREAD COEFFICIENT ON THE BEHAVIOR OF SHIP PLATES UNDER RANDOM OPERATIONAL LOADING CONDITIONS

¹Burakovskiy Evgeny Petrovich, Dr. hab., professor

²Burakovskiy Pavel Evgenievich, Ph. D., assistant professor

³Pavlov Andrey Viktorovich, student

⁴Yusyp Vyacheslav Mikhaylovich, captain of the 1st rank, head of the department of theory, design and survivability of the ship

^{1,4}Baltic Higher Naval College named after Admiral F. F. Ushakov, Kaliningrad, Russia,
e-mail: ¹e_burakovsky@mail.ru; ⁴v-y48@yandex.ru

^{2,3}Baltic Fishing Fleet State Academy FSBEI HE "KSTU", Kaliningrad, Russia,
e-mail: ²paul_b@mail.ru; ³pavlov_92@mail.ru

The article examines the influence of the expansion coefficient on the process of accumulation of residual deflections in the plates of the hull plating under the action of random operational loads. It is noted that for a more substantiated assessment of the technical condition of ship hulls with progressive defects such as corrugation, it is advisable to take into account the influence of changes in boundary conditions on the accumulation process.

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ОБВОДОВ В НОСОВОЙ ОКОНЕЧНОСТИ НА ЕЕ ЗАРЫВАЕМОСТЬ В ВОЛНУ

¹Бураковский Евгений Петрович, д-р техн. наук, профессор

²Бураковский Павел Евгеньевич, канд. техн. наук, доцент

³Юсып Вячеслав Михайлович, капитан 1 ранга, начальник кафедры теории, устройства и живучести корабля

^{1,3} Балтийское высшее военно-морское училище им. адмирала Ф. Ф. Ушакова, Калининград, Россия, e-mail: ¹e_burakovsky@mail.ru; ³v-y48@yandex.ru

²Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ», Калининград, Россия, e-mail: paul_b@mail.ru

Исследуется влияние формы обводов в носовой оконечности судна на характеристики процесса зарываемости в волну, такие, как уходящая под воду длина палубы, глубина погружения и гидродинамическая сила. Поведение судна на встречном волнении в условиях зарываемости моделируется системой уравнений вертикальной и килевой качки, содержащей дополнительные члены для учёта зарывания носа судна в волну. Показано, что использование предложенной авторами конструкции цилиндрической носовой оконечности патент № 2761360 [3] может способствовать повышению безопасности мореплавания.

1. Постановка задачи

Как уже неоднократно отмечалось, одной из наиболее опасных ситуаций при попадании судна в штормовые условия является зарывание носовой оконечности в волну на встречном волнении [1]. Возникновение данной ситуации может сопровождаться как разрушением корпуса судна, так и его гибелью в результате потери остойчивости. Поэтому представляется интересным выполнить оценку влияния формы обводов в носовой оконечности судна на его поведение на встречном волнении в условиях зарывания носовой оконечности в волну.

2. Моделирование динамики судна на встречном волнении в условиях зарывания носовой оконечности в волну

Для моделирования динамики судна использовалась система дифференциальных уравнений вертикальной и килевой качки [2], модифицированная с учетом особенностей взаимодействия носовой оконечности с волной в условиях зарываемости [1]. Также было проведено сопоставление полученных результатов с данными моделирования в рамках упрощенного подхода, предложенного А.В. Герасимовым, В.А. Мореншильдт и Ю.А. Нецветаевым. В рамках данного подхода считается, что влияние вертикальной качки на килевую мало, при этом обратное влияние существенно. Соответственно при применении такого подхода в дифференциальном уравнении килевой качки отсутствуют члены, зависящие от вертикальной качки. Учет зарывания носовой оконечности в волну также осуществлялся в рамках методики, изложенной в [1]. В рамках настоящей работы исследованы три варианта обводов носовой оконечности: традиционно применяемая форма обводов носовой оконечности (рис. 1); традиционно применяемая форма обводов носовой оконечности с уменьшением высоты борта до ее значения на миделе (рис. 2); предложенная авторами форма носовой оконечности согласно [3] (рис. 3). Разработанная авторами конструкция (патент № 2761360) характеризуется цилиндрической формой корпуса в носовой оконечности и не имеет аналогов в мировой практике, что подтверждается патентом РФ на изобретение. В процессе исследования считалось, что судно идет на регулярном встречном волнении. Высота волн и скорость хода судна варьировались в диапазоне от 8 до 16 метров и от 3 до 9 узлов соответственно.

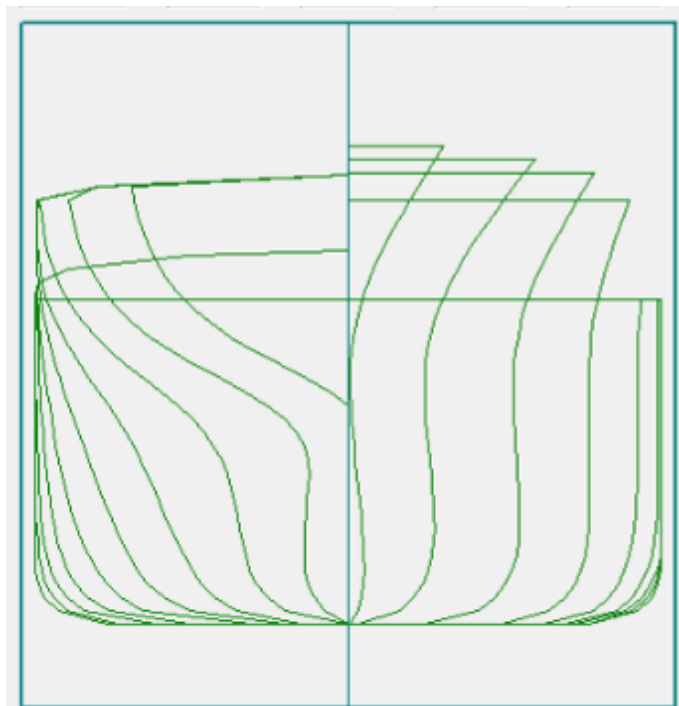


Рис. 1. Традиционно применяемая форма обводов корпуса судна (вариант 1)

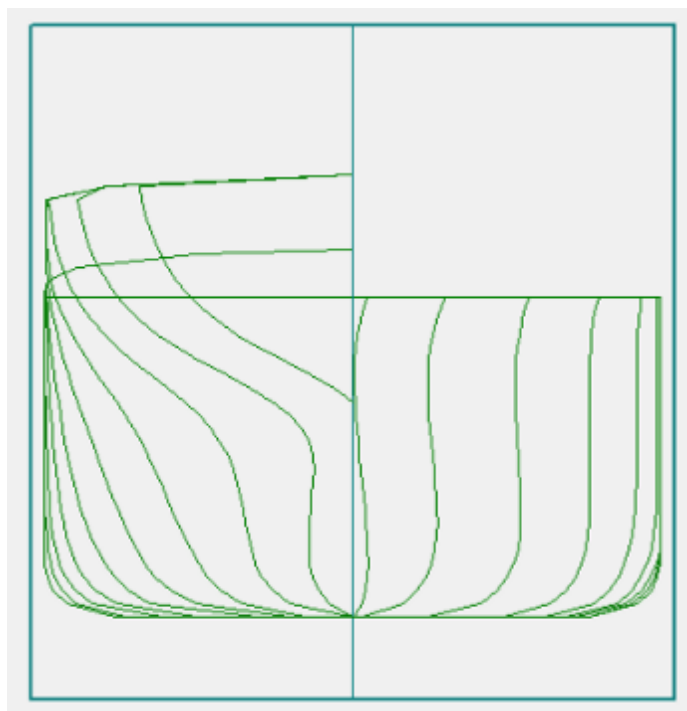


Рис. 2. Модификация традиционно применяемой формы обводов корпуса судна за счет реализации равной высотой борта на миделе и в носовой оконечности (вариант 2)

Результаты расчета исследуемых параметров представлены в таблицах 1–3. В таблице 1 представлена величина гидродинамической силы P , которую воспринимает нос судна, зарываясь во встречную волну. Для удобства анализа данная сила приведена к безразмерному виду путем деления на весовое водоизмещение судна D .

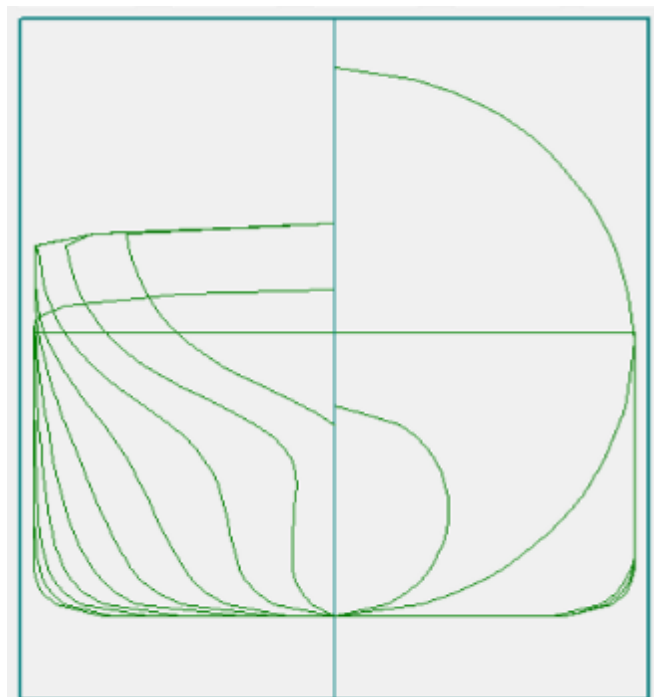


Рис. 3. Обводы корпуса судна с цилиндрической носовой оконечностью согласно [3] (вариант 3)

3. Результаты исследования

Таблица 1

Относительная величина давления на носовую оконечность P/D

Скорость судна, уз	3			6			9		
Высота волны, м	8	12	16	8	12	16	8	12	16
Традиционная форма носовой оконечности (вариант 1)	0,000	0,055	0,094	0,000	0,060	0,101	0,002	0,064	0,101
Традиционная форма носовой оконечности с уменьшением высоты борта (вариант 2)	0,018	0,049	0,089	0,022	0,054	0,093	0,024	0,055	0,091
Новая форма носовой оконечности (вариант 3)	0,0006	0,0022	0,0051	0,0006	0,0023	0,0058	0,0007	0,0027	0,0062

Следует отметить, что для исследованных вариантов водоизмещение отличалось незначительно и находилось в пределах от 26400 т до 27100 т. Как видно из таблицы 1, при больших значениях высот волн предложенная в [3] конструкция позволяет уменьшить величину гидродинамической силы более, чем на порядок. Так, при скорости хода 3 узла и высоте волны 16 м гидродинамическая сила для предлагаемой конструкции (вариант 3) в 18 раз меньше, чем для традиционной (вариант 1). Следует отметить, что уменьшение высоты борта в носовой оконечности (вариант 2) ведет к росту гидродинамической силы по сравнению с исходной конструкцией (вариант 1) при высоте волны порядка 8 м. Однако при увеличении высоты волны до 16 м наблюдается обратный эффект. Это объясняется тем, что при сравнительно небольших высотах волн для традиционной формы обводов (вариант 1) заливаемость вообще отсутствует, что проявляется в отсутствии воздействия гидродинамической силы. Данное обстоятельство демонстрирует основное отличие в поведении исходной и модифицированной конструкции, для которой высота борта в носу ограничена ее величиной на миделе. Уменьшение высоты борта в носу, характерное для модифицированной формы обводов (вариант 2), приводит к тому, что уже при высоте волны 8 м начинает проявляться явление заливаемости палубы. Увеличение высот волн для варианта 1 и варианта 2 формы обводов приведет

к тому, что носовая оконечность будет зарываться в волну, однако в случае традиционной формы обводов (вариант 1) площадь палубы в плане будет больше, чем для модифицированной формы (вариант 2), что и ведет к упомянутому росту гидродинамической силы.

В таблице 2 представлена зависимость глубины погружения носовой оконечности от скорости хода судна и высоты волны для трёх рассматриваемых вариантов обводов в носовой оконечности. При этом учитывается суммарное перемещение носовой оконечности в результате вертикальной и килевой качки. Видно, что для традиционной формы носовой оконечности и её модификации глубина погружения находится примерно на одном уровне. Для предлагаемой конструкции глубина погружения на ниже на величину от 18% до 23%, чем для традиционной формы обводов.

Таблица 2

Глубина погружения носовой оконечности, м

Скорость судна, уз	3			6			9		
	8	12	16	8	12	16	8	12	16
Высота волны, м									
Традиционная форма носовой оконечности (вариант 1)	5,65	8,79	12,34	5,86	9,15	12,46	6,03	9,23	12,16
Традиционная форма носовой оконечности с уменьшением высоты борта (вариант 2)	5,92	9,42	12,86	6,17	9,59	12,71	6,25	9,39	12,28
Новая форма носовой оконечности (вариант 3)	4,60	6,97	9,32	4,71	7,14	9,59	4,84	7,35	9,85

В таблице 3 представлены результаты расчёта погруженной в воду длины палубы в носовой оконечности для трёх значений скорости судна и трёх высот волн. Для удобства представления результаты приведены в безразмерном виде, переход к которому осуществлён делением погруженной длины палубы $L_{погр}$ на длину судна L .

Таблица 3

Длина палубы, уходящая под воду $L_{погр}/L$

Скорость судна, уз	3			6			9		
	8	12	16	8	12	16	8	12	16
Высота волны, м									
Традиционная форма носовой оконечности (вариант 1)	0,00	0,27	0,36	0,00	0,30	0,39	0,04	0,34	0,41
Традиционная форма носовой оконечности с уменьшением высоты борта (вариант 2)	0,26	0,36	0,42	0,29	0,39	0,45	0,33	0,42	0,48
Новая форма носовой оконечности (вариант 3)	0,022	0,032	0,041	0,023	0,034	0,043	0,024	0,036	0,046

Видно, что при увеличении высоты волны до значений порядка 12–16 м длина погруженной части палубы в случае обводов [3] почти на порядок меньше, чем для двух других вариантов. В случае высоты волны 8 м для традиционной формы носовой оконечности заливаемость отсутствует или не превышает 4% длины судна, в предлагаемой конструкции заливание происходит примерно на 2% длины.

Следует отметить, что сопоставление результатов, полученных с использованием методики [2], с результатами использования применения упрощённого подхода, предложенного А.В. Герасимовым, В.А. Мореншильдт и Ю.А. Нецветаевым, показало целесообразность применения последнего при моделировании продольной качки морских транспортных судов в условиях зарывания носовой оконечности в волну. Расхождения в параметрах вертикальной и килевой качки, а также величинах гидродинамической силы, глубины зарывания носовой оконечности и погруженной длины палубы, при использовании указанных подходов не превышают 5%. При этом использование упрощённого подхода ведет к снижению затрат вычислительных мощностей, что является весьма существенным преимуществом в случае реализации алгоритма контроля безопасности судна в штормовых условиях с использованием бортовой интеллектуальной системы.

Заключение

Проведенное исследование позволяет сделать вывод о существенном влиянии формы обводов в носовой оконечности на безопасность судна на встречном волнении. Показано, что применение разработанной авторами формы носовой оконечности [3] позволяет предотвратить потери судов, связанные с возникновением явления зарываемости носовой оконечности во встречную волну.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бураковский, Е.П. Конструктивное обеспечение безопасности мореплавания: монография / Е.П. Бураковский, П.Е. Бураковский, В.А. Дмитриевский. – СПб.: Лань, 2020. – 300 с.
2. Мореходность судов и средств океанотехники. Методы оценки: монография / ФГУП Крыловский государственный научный центр ; под. ред. И.К. Бородая. – СПб.: ФГУП «КГНЦ», 2013. – 256 с.
3. Патент № 2761360 Российская Федерация, МПК В63В 1/06 (2006.01), В63В 43/02 (2006.01). Носовая оконечность корпуса судна : №2021111637 : заявл. 22.04.2021: опубл. 07.12.2021 / Бураковский Е.П., Бураковский П.Е., Юсуп В.М. ; заявитель ФГБОУ ВО «КГТУ». – 9 с. : ил. – Текст : непосредственный.

INFLUENCE OF THE FORM OF THE CONTOURS IN THE BOW END ON ITS BURYING INTO THE WAVE

¹Burakovskiy Evgeny Petrovich, Dr. hab., professor

²Burakovskiy Pavel Evgenievich, Ph. D., assistant professor

³Yusup Vyacheslav Mikhaylovich, captain of the 1st rank, head of the department of theory, design and survivability of the ship

^{1,3} Baltic Higher Naval College named after Admiral F. F. Ushakov, Kaliningrad, Russia,
e-mail: ¹e_burakovsky@mail.ru; ³v-y48@yandex.ru

²Baltic Fishing Fleet State Academy FSBEI HE "KSTU", Kaliningrad, Russia,
e-mail: paul_b@mail.ru

The article studies the influence of the bow contour shape on the wave burying process characteristics, such as the submerged length of the bow, immersion depth and hydrodynamic force. The vessel dynamics are modeled using a modified system of heave and pitch equations, taking into account the bow burying in the wave. It is shown that the use of the design with a cylindrical bow proposed by the authors can contribute to increasing the safety of navigation.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ СУДОВ В ГРУППЕ СЕТЕВЫМ ПЛАНИРОВАНИЕМ

¹Волков Евгений Леонидович, канд. техн. наук, доцент

²Терлыч Станислав Владимирович, канд. техн. наук, доцент

^{1,2}ФГБОУ ВО «Херсонская государственная морская академия», Россия,
e-mail: yevvolkov@yandex.ru

Рассматривается использование сетевой модели при прогнозировании поведения группы судов находящихся «on scene», в пределах определенной акватории, между которыми возникают взаимодействия, выражающиеся как события расположенные в вершинах графа, а работа выражена через время наступления события, по которому можно судить не только о факте возникновения опасного сближения или угрозы столкновения, но и очередности возникновения события, что позволяет правильно выбрать маневр расхождения с учетом всех имеющихся угроз.

Введение

При выборе безопасного маневра расхождения с одиночным судном, соблюдая требования правил МППСС-72, при маневрировании в группе судов, необходимо учитывать не только изменение параметров сближения с другими судами группы, но и невыполнение некоторыми судами их обязательств в соответствии с правилами МППСС-72. Выбор оптимального пути при решении задач рейсового задания, каждая из которых представляет собою событие позволяет рассматривать математические модели оптимизации процесса достижения события - выбор оптимального пути, учет навигационных препятствий, маневрирование в группе судов, определение приоритетных, в плане расхождения, судов-целей, соблюдение правил расхождения судов МППСС-72 и другие. Решение задач рейсового задания и безопасности плавания требует использования математических методов оптимизации процессов с использованием автоматизированных компьютерных систем высокого быстродействия. Маневрирование судов в группе представляет собой сложный процесс, для реализации которого необходимо четкое взаимодействие судов в группе и беспрекословное выполнение правил МППСС-72. В судоходстве, как правило, одновременно расходятся несколько судов. Поэтому возникает потребность в учете параметров движения каждого из них соответствующей оценкой возможности столкновения и/или возможности опасного сближения. Поэтому процесс расхождения судов в группе требует системного подхода к планированию процесса маневрирования множества судов в группе достичь которого возможно используя методы сетевого планирования. Использование методов сетевого планирования позволяют оценить влияние различных отклонений при расхождении, от запланированного маневра, на ситуацию чрезмерного сближения и, главное, помогают выбрать другой маневр расхождения, из прогнозируемых, а именно: заранее планировать последовательность и тип маневра расхождения с отдельными целями как элементами, которые могут рассматриваться с помощью теории графов. Рассматривая процесс расхождения судов в группе как процесс достижения события, а результатом проделанной работы является наступление события – безопасное прохождение базовым судном опасного судна-цели. Объектом управления в системах сетевого планирования, касаясь судовождения является судоводитель, который обладает элементами управления движением судна, информационными и навигационными ресурсами, предназначенные для достижения намеченной цели. Действия судоводителя направленные на достижение события расхождения с иным судном целью, используя при этом оптимальный путь достижения события, возможно используя сетевой график как один из методов сетевого планирования [1]. Для представления процесса расхождения судов в виде сетевого графика необходимо прохождение каждого судна, локально расположенного вблизи базового судна и участвующего в маневре расхождения («on scene»), представить как отдельное событие и изобразить их в виде сетевого графика, состоящего из вершин соединенных связями, соответствующими последовательности и очередности параметров сближения судов, которые так или иначе участвуют в маневре расхождения.

Актуальность исследования

В работе [2] рассмотрен метод автоматического выбора оптимальной стратегии расхождения судов в случае снижения их скоростей на постоянных курсах. Приведен пример опасной ситуации сближения судов и выбор оптимальной стратегии их расхождения снижением скорости активным торможением. Осуществлено имитационное моделирование маневра расхождения, подтверждающее корректность предложенного метода. В работе [3] предложена вариация модели управления, в виде мультиагентной системы. В которой был применен сетевый подход к структуре организационного управления с выделенными береговыми центрами управления и контроля для создания интегрированного информационного поля и вычислительных мощностей разнородных проблемно-ориентированных структур для решения задач управления динамическими системами. В публикации [4], вероятностная оценка принятия решений судоводителем, для обоснования математических зависимостей, лежащих в основе оценки принятия решений судоводителем, рассматривается вероятностный подход. Предмет исследования – человеческий фактор судовождения в «нотации» Пуассона. Цель исследования заключается в установлении случайной величины, характеризующей процесс принятия судоводителем решений, и закона её распределения. В работе [5] предлагается метод решения задачи гарантированного предотвращения столкновений судов на неограниченном горизонте планирования в непредсказуемой навигационной обстановке. Определяются области возможных столкновений на основе множеств достижимости судов-целей в пространстве скоростей. Из рассмотренных работ отметим, что разработка общей стратегии маневрирования судов в группе, для предотвращения столкновения и / или опасного сближения до сих пор актуальны и требуют дальнейшего исследования. Во многих исследованиях рассматриваются стратегии последовательного расхождения судов в группе, согласно требованиям МППСС-72, расхождения маневрированием только собственным судном во всех случаях опасного сближения, а также внешним управлением движения судов в трафике. Однако до сих пор существует необходимость разработки стратегии, которая будет учитывать все требования существующих правил предупреждения столкновения судов МППСС-72, независимо от того должно ли судно уступить дорогу, или нет, а в зависимости от того выполняет ли судно-цель свои обязательства, согласно требованиям, правил.

Именно этому направлению исследования предназначена данная статья.

Постановление задачи

Целью данной статьи является исследование поведения судов в группе, при одновременном опасном сближении во исполнение требований правил МППСС-72, и планирование дальнейших действий исходя из возникающей ситуации.

Результаты исследования

При маневрировании судов в группе возникает необходимость рассматривать выбор маневра одновременного расхождения базового судна S_0 с двумя и более судами. Следует подчеркнуть, что, правила МППСС предусматривают маневрирование пары судов, потому как являются бинарной системой координации, при расхождении судов.

Итак, рассмотрим ситуацию маневрирования базового судна S_0 в группе S_n судов, где $n = 5$ (Рис.1).

Текущую ситуацию сближения базового судна с n -М количеством целей можно формализовать как множество целей M , декомпозицию которой возможно провести, в зависимости от наличия возникновения опасного сближения, как предложено в [6]. Декомпозиция множества целей M , в зависимости от степени опасности столкновения базового судна с каждой из них, будет выглядеть следующим образом: суда цели S_1 и S_3 принадлежат к четвертому подмножеству M_4 , дистанция l_i к которым уменьшается, однако дистанция кратчайшего сближения l_{imin} больше предельно-допустимой дистанции, т. е. относительное перемещение судов является безопасным.

Судно S_2 принадлежит к шестому подмножеству M_6 , то есть цель, которая находится во второй области взаимных обязанностей, в которой базовое судно должно уступить дорогу, а судно цель – следовать с неизменными параметрами движения [6].

Судно S_4 , принадлежит к пятому подмножеству M_5 , которое содержит цели, с которыми судно находится в первой области взаимных обязанностей. Это означает, что в текущий момент времени базовое судно может не совершать маневра для расхождения. Но если судном S_4 не будут

предприняты действия для предупреждения столкновения по достижению дистанции сближения до обычного l_{1d} и экстренного l_{2d} маневрирования, то судно цель С4 перейдет к подмножеству М8. К подмножеству М8 относятся цели, которые находятся в четвертой области взаимных обязанностей, – области экстренного маневрирования, когда оба взаимодействующих судна должны принять срочные меры для предотвращения столкновения.

Рассмотрим ситуацию опасного сближения базового судна C_0 с целью С2, когда в районе предполагаемого расхождения находится еще одно судно С4. В этом случае матрица ситуационного возмущения $W = \{\omega_{ij}\}$ будет иметь вид [6]:

$$W = \begin{vmatrix} 0 & \omega_{02} & \omega_{04} \\ \omega_{20} & 0 & \omega_{24} \\ \omega_{42} & \omega_{40} & 0 \end{vmatrix}$$

в которой для данного случая значения ситуационных возмущений ω_{02} и ω_{20} не равны нулю.

Следовательно, между судами C_0 и С2 возникает взаимодействие, характер которого определяется бинарным координатором, реализованном в МППСС-72, и суда выполняют согласованный маневр расхождения, компенсирующий ситуационное возмущение, т. е. обеспечение обращения значений ситуационных возмущений ω_{02} и ω_{20} в ноль. При этом стратегия расхождения, формируемая оперирующим судном, зависит от начальных значений ситуационных возмущений $\omega_{04}=\omega_{40}$ и $\omega_{24}=\omega_{42}$.

При таких обстоятельствах $\omega_{04}=0$ и $\omega_{24}=0$ наличие судна С4 не вызывает появления его взаимодействия с оперирующим судном и с целью. В этой ситуации G (1) возникает только взаимодействие Vz02 между оперирующим судном C_0 и опасной целью С2 и координатор, исходя из относительной позиции судов и их статусов предписывающий взаимодействующим судам координирующие сигналы [6,7].

Эти сигналы определяют их поведение в процессе расхождения, предписывая каждому из них взаимные обязанности, что позволяет судам сделать выбор стратегий расхождения. При этом одно из судов сохраняет свои параметры движения, в то время как второе судно выполняет маневр расхождения или оба судна принимают согласованные маневры расхождения.

Рассмотрим ситуацию G(2), когда $\omega_{04} = 1$ и $\omega_{24} = 0$. В этом случае помимо взаимодействия Vz02 между судами C_0 и С2 возникает взаимодействие Vz04 между судами C_0 и С4. Следовательно, координатор формирует координирующие сигналы оперирующему судну, которые предписывают ему тип поведения, то есть маневрировать или сохранять неизменные параметры движения, или же противоречить друг другу. В случае согласованных координирующих сигналов оперирующее судно должно уступить дорогу судам С2 и С4 маневром расхождения, который может реализоваться одним из двух возможных вариантов: общим маневром для обоих судов С2 и С4 или двумя последовательными маневрами для каждого из судов [5,6].

Указанное выше будет справедливым в случае последовательного расхождения судов, при котором опасное сближение с судном С2, как событие a_{02} , возникает раньше, по времени, чем опасное сближение с судном С4. В противном случае, когда событие a_{04} , опасного сближения базового судна C_0 с судном целью С4 наступает раньше, то и соответственно стратегия расхождения также должна быть иной.

Поэтому необходимо проанализировать ситуацию одновременного сближения нескольких судов как совокупность прогнозируемых событий. Опасное сближение судов, как событие, что является достижение дистанции минимально допустимого сближения l_{min} между указанными судами и зависит от времени до наступления события опасного сближения $t_{кр}$, пары судов в группе.

При маневрировании судов в группе, когда опасно сближаются три судна одновременно, два события A_{02} и A_{04} будут иметь место, это опасное сближение базового судна C_0 и С2 и опасное сближение C_0 и С4 соответственно. При том могут возникать условия, при которых:

1. событие A_{02} наступает раньше, чем событие A_{04} ;
2. Событие A_{04} наступает раньше, чем событие A_{02} ;
3. событие A_{02} (A_{04}) наступает одновременно с событием A_{04} (A_{02});

Ранее было указано, что событие A_{ij} зависит от $t_{кр}$, поэтому перечисленные условия возможно записать как $t_{кр02} < t_{кр04}$ или $t_{кр02} > t_{кр04}$ или $t_{кр02} = t_{кр04}$.

В случае сближения базового судна C_0 с судном целью C_4 , по требованиям к правилу 17.А.П, МППЗС -72, судно C_4 должно уступить дорогу, но в случае непринятия соответствующих маневров судном C_4 , базовое судно C_0 должно собственным маневром предотвратить столкновение и/или опасное сближение. Поэтому по l_{min} нужно считать дистанцию экстренного маневрирования l_{2d} и соответственно, для судов, принадлежащих к подмножеству M_8 , наступлением события A_{04} необходимо считать достижение дистанции l_{2d} .

На рисунке (1) изображена ситуация опасного сближения нескольких судов в группе, принадлежащих к разным подмножествам [6].

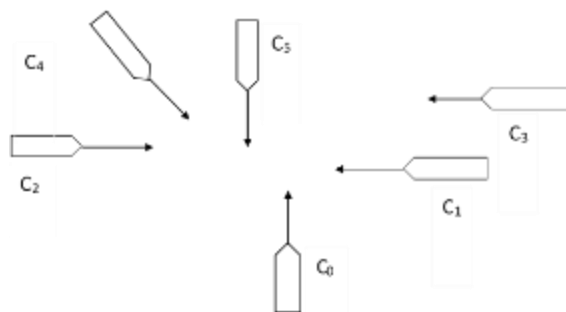


Рис. 1. группа судов, локально расположенных вблизи базового судна и участвующая в маневре расхождения (on scene).

Принадлежность каждого судна к определенным подмножествам M_i определяет цели, которые безопасны и опасны, и предполагает последовательное различие базового судна с остальными судами-целями. Однако это возможно только в условиях, когда все суда, участвующие в маневре расхождения, выполняют правила предотвращения столкновения судов МППСС-72, а также, что очень важно, верно оценивают принадлежность собственного судна к судну которое должно уступить дорогу, или к судну которому другое судно должно уступить дорогу, и одинаково трактуют требования правил МППСС-72. В противном случае, когда любое судно не выполняет свои обязательства согласно требованиям правил МППСС-72, ситуация опасного сближения может возникнуть с любым судном в группе. Именно для таких случаев, в данной статье предлагается использовать сетевую модель, для прогнозирования ситуаций опасного сближения и планирования расхождения судов в группе (рис. 2)

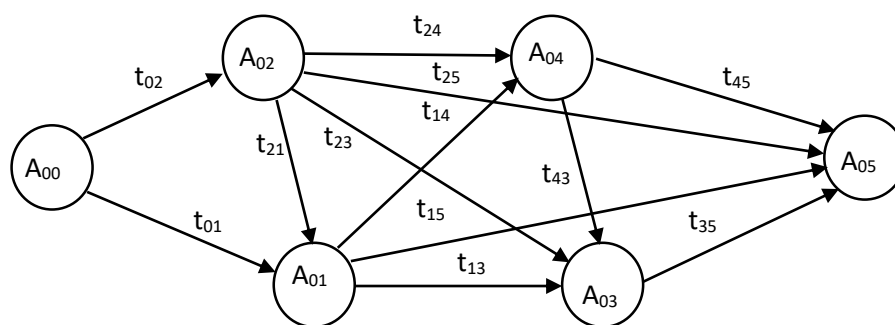


Рис. 2. сетевая модель группы судов, участвующих в маневре расхождения, изображена с помощью сетевого графика.

Сетевая модель отображает совокупность прогнозируемых событий. Время t_{ij} есть время между последовательно возникающими событиями кратчайшего сближения судов. Время кратчайшего сближения t_{ij} ($t_{01,02,21...45}$) может быть рассчитано по формуле [6]:

$$t_{ij} = \frac{l_{ijo} \cos(K_{otij} - \alpha_{ijo})}{V_{otij}}$$

где l_{ijo} и α_{ijo} соответственно начальное расстояние и пеленг на цель; K_{otij} и V_{otij} соответственно относительный курс и скорость.

Выводы

Для анализа ситуации опасного сближения судов в группе с базовым судном предложено использование сетевой модели с построением сетевого графика, в котором работа рассматривается как время до наступления события, а событие является ситуацией опасного сближения.

Использование предложенной модели позволяет прогнозировать последовательность расхождения судов в группе с учетом требований правил МППСС-72 и выполнением требований правил каждым из судов в группе, участвующих в процессе расхождения.

Учет движения судов, как линейного, так и вращательного, и изменение текущей позиции судов при последовательном расхождении является перспективным направлением дальнейшего исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Системы сетевого планирования и управления опытно-конструкторскими разработками / под ред. Л. С. Мещанинова. Новосибирск: НГУ, 2006. –140 С.

2. Федоров, Д.Б., Бурмака, И.А. Автоматическое определение параметров оптимальной стратегии расхождения судов при снижении их скоростей на постоянных курсах. Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, IX(31), Issue: 250, 2021 Feb.. –50 С.

3. Алексеев, А.А., Попов, В.В. Управляющая модель безопасности мореплавания в морской операционной зоне порта и сетцентрическим методом управления с построением математической конфигурации мультиагентной системы. // Эксплуатация морского транспорта. Ежеквартальный сборник научных статей ISSN 1992-8181 4(109) 2023. Новороссийск: ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова, 2023. – 185 с.

4. Фадюшин, С.Г. Вероятностная оценка принятия решений судоводителем. // Эксплуатация морского транспорта. Ежеквартальный сборник научных статей ISSN 1992-8181 4(109) 2023., Новороссийск: ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова, 2023. – 185 с.

5. Жук А.С. Множества безопасных конфигураций судно-судно в пространстве скоростей. Эксплуатация морского транспорта. Ежеквартальный сборник научных статей ISSN 1992-8181 3(108) 2023., ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова, г. Новороссийск 2023 – 213 с.

6. Волков, Е. Л. Анализ маневрирования судов в группе при сближении нескольких судов. // Современные информационные и инновационные технологии на транспорте (MINTT-2020): сборник материалов XII Международной научно-практической конференции, 27-29 мая 2020 г. Херсон: Херсонская государственная морская академия, 2020. - 300 с.

7. Цимбал, М. М. Гибкие стратегии расхождения судов / М. М. Цимбал, И. А. Бурмака, Е. Е. Тюпиков. – Одесса: КП ОГТ, 2007. - 424 с.

FORECASTING THE BEHAVIOR OF SHIPS IN THE GROUP BY NETWORK PLANNING

¹Volkov Evgeny Leonidovich, candidate of technical sciences, assistant professor

²Terlych Stanislav Vladimirovich, candidate of technical sciences, assistant professor

^{1,2}FSBEE HE "Kherson State Maritime academy", Kherson, Russia,
e-mail: yevvolkov@yandex.ru

The article considers the use of a network model in predicting the behavior of a group of vessels located "on scene", within a certain water area, between which interactions occur expressed as events located at the vertices of the graph, and the work is expressed through the time of the event, which can be used to judge not only the fact of a dangerous approach or threat of collision, but also the order of occurrence the occurrence of an event, which allows you to choose the right divergence maneuver, taking into account all the existing threats.

ПРОБЛЕМЫ ДОКУМЕНТИРОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРАКТИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ НА СУДАХ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО КОНВЕНЦИОННЫМ СПЕЦИАЛЬНОСТЯМ

¹Ермаков Сергей Владимирович, канд. техн. наук, директор Морского института

²Морозова Светлана Юрьевна, ст. преподаватель кафедры судовождения
и безопасности мореплавания

^{1,2}Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ»,
Калининград, Россия, e-mail: ¹sv.ermakov@bgarf.ru; ²nach_uo@bgarf.ru

Идентифицированы и наглядно проиллюстрированы проблемы оформления документов, подтверждающих в целях первичного дипломирования стаж плавания и выполнение программы практической подготовки на судах обучающихся морских образовательных организаций, определены источники этих проблем и кратко описаны пути их решения.

Практически любой нормативный правовой акт, будь то закон, постановление, приказ, правила, инструкция или положение, в результате правотворческой деятельности не может получиться идеальным, какие бы профессионалы над ним не работали. Здесь возможны и пробелы, и противоречия, и неточность, и неясность, и неопределенность формулировок, приводящие к различным их трактовкам. Эти недостатки начинают проявляться после вступления нормативного правового акта в силу и начала правоприменения. Для устранения этих недостатков, предупреждения проблем регулирования, уполномоченные на то органы издают инструкции, дают разъяснения по применению спорных норм, вносят поправки в «сырые» нормативные правовые акты [1, 2].

8 ноября 2021 года Министр транспорта Российской Федерации подписал приказ № 378 «Об утверждении Положения о дипломировании членов экипажей морских судов» [3]. Положение вступило в силу 1 марта 2022 года. Нельзя, конечно, сказать, что оно стало началом новой эпохи в дипломировании, однако новелл в новом документе всё-таки немало. Вместе с тем, объект исследования, результаты которого представлены в настоящей статье, присутствовал практически во всех сменявших друг друга или одновременно существовавших и существующих международных и национальных нормативных правовых актов, регулирующих дипломирование моряков. Речь идёт о стаже работы на судне или плавательном цензе, наличие в том или ином объёме которого практически всегда является обязательным условием дипломирования (получения квалификационного документа, позволяющего занятия соответствующей ему должности на судне).

Так, тоже Положение [3] в своём пункте 3 параграфа 37 определяет, что среди прочего «для получения диплома вахтенного помощника капитана морского судна валовой вместимостью 500 и более... предъявляются... документы, подтверждающие наличие стажа работы на судне не менее 12 месяцев как части учебной программы, в том числе не менее 6 месяцев с выполнением обязанностей по несению вахты под непосредственным руководством капитана морского судна, дипломированного специалиста или квалифицированного руководителя практики, в том числе стажировки по исполнению всех функций вахтенного помощника капитана». (Далее, стаж «с выполнением обязанностей под руководством, в том числе стажировку» вне зависимости от специальности будет поименован как специальный стаж).

В соответствии с пунктом 19 Положения [3] учёт стажа на судне осуществляется на основании информации, указанной в мореходной книжке и/или ином документе, содержащим сведения о работе моряка и/или документов, подтверждающих выполнение учебной программы морской образовательной организации. Очевидно, что первая пара «и/или» не имеет большого смысла, так как мореходная книжка не содержала и не содержит всего объёма информации, требуемого для учёта стажа Положением [3]. Сам же документ, содержащий сведения о работе моряка, обезличился.

Наименование «справка о плавании», содержащееся в старом Положении [4], перестало быть нормативным (несмотря на это, далее будет использовано именно словосочетание «справка о плавании»). Однако эта меньшая проблема. Отсутствие утверждённой формы документа, содержащим сведения о стаже плавания, или, что ещё хуже, навязывание корпоративных форм, размещение в официальных источниках различных организаций бланков (иногда даже с указанием в верхнем колонтитуле номера формы, при том, что она никем утверждена не была) приводит к тому, что обучающиеся МОО эти бланки заполняют на судах самостоятельно или это делают должностные лица из числа экипажа – в обоих случаях с потерей (порой невосполнимой) значимой информации.

Так, очень часто при заполнении справки о плавании игнорируется специальный стаж в случаях, когда он действительно имел место быть. Возможных причин здесь две. Во-первых, используемая на судне или в компании форма изначально не предусматривает внесение данных о специальном стаже. Во-вторых, лицо, которое составляет (заполняет) справку о плавании не считает нужным или возможным указывать требуемые сведения, не понимая их значимость.

Вместе с тем, сведения о специальном стаже могут и быть в справке о плавании, но быть некорректными. В частности, в справке в предназначенных для этого строках могут отсутствовать фамилия, имя и отчество лица, осуществлявшего руководством стажировки, и (или) его квалификация по диплому (как того требует Положение [3]). Иногда вместо квалификации по диплому указывается должность. Однако самой распространённой ошибкой является указание всех необходимых сведений, но в строках для рядового состава (рис .1).

2.1 в том числе (только для судоводителей)/ navigators only:		
a) стаж плавания иного, чем прибрежное плавание и плавание по ВВПРФ/ total time of sea going service coastal & RF in land water ways service:	месяцев/ months	Для практикантов не заполняется
b) стаж плавания в прибрежном плавании/ near-coastal service:	месяцев/ months	дней/days
c) стаж плавания во внутренних морских водах РФ, на ВВП РФ и акваториях морских портов РФ/ RF in land sea waters, RF in land water ways & RF port waters service:	месяцев/ months	дней/days
d) выполнял обязанности, связанные с использованием аппаратуры ГМССБ/ carried out duties connected with using GMDSS equipment: да/yes* нет/none*	месяцев/ months	дней/days
2.2 в том числе (для первичного получения квалификационных документов/for the first certificate on) с выполнением обязанностей/ as a trainee performing duties of :		
a) вахтенного помощника – стажёра(практиканта)*, вахтенного механика – стажёра(практиканта)*/officer in charge of navigational/engineering* watch под руководством дипломированного специалиста /under the guidance of certified of Верно		
<i>Иванова Ивана Ивановича, старшего помощника капитана</i>		
ф.и.о.(печатными буквами)/Name (in block letters) и его квалификация по диплому/and his qualification according to the CoC	03 месяцев/ months	15 дней/days
b) электромеханика-стажера (практиканта)*, реф. механика-стажера(практиканта)*/ electro or refrigeration* engineer Officer под руководством дипломированного специалиста / under the guidance of certified officer:		
ф.и.о.(печатными буквами)/Name (in block letters) и его квалификация по диплому /and his qualification according to the CoC	месяцев/ months	дней/days
c) по судоремонту/workshop skill training (для судомехаников, электромехаников, рефмехаников/ for officer in charge of an engineering watch, electro or refrigeration engineer officer):	месяцев/months	дней/days
d) для рядового состава/ratings: по несению вахты на ходовом мостике/ в МО*/ associated with navigation keeping или по техническому обслуживанию судового электрооборудования/ холодильных установок*/or in electrical/ refrigeration* equipment под наблюдением дипломированного специалиста / under supervision of certified officer: Не верно		
<i>Иванова Ивана Ивановича, старшего помощника капитана</i>		
ф.и.о. (печатными буквами)/Name (in block letters) и его квалификация по диплому /and his qualification according to the CoC	03 месяцев/ months	15 дней/days

Рис. 1. Примеры корректного (верного) и некорректного (неверного) заполнения справок о плавании для практикантов-судоводителей (для практикантов-механиков и практикантов-электромехаников примеры будут аналогичными)

Логика лица, оформляющего справку о плавании, здесь очевидно и проста. Матрос, моторист, электрик – это, действительно, должности рядового состава, не говоря уже о практиканте или кадете. Однако эта логика ошибочна. Указанные строки подлежат заполнению в отношении тех лиц, кто обучается по программам рядового состава (матроса, моториста, электрика), а не занимает эти должности на судне. Кроме того, следует обратить внимание, что выполнение обязанностей

«офицерского» стажёра должно осуществляться под руководством (!) дипломированного специалиста, а несение вахты рядовым составом (будущими матросами, мотористами и электриками) под наблюдением (!).

Проблема игнорирования специального ценза имеет пока только одно «серое» решение. Специальный стаж может быть подтверждён отдельным документом, который может быть действителен только вместе со «своей» справкой о плавании. Указанный цвет подобного решения проблемы объясняется тем, что такая справка-подтверждение также, как и порядок её заполнения, никак не закреплена нормативно. Одновременно Положение [3] закрепляет вариативность документов, которые могут быть представлены для подтверждения требуемого стажа плавания.

Должности, указываемые в справке о плавании – это отдельный сегмент рассматриваемой проблемы документирования. Во-первых, до сих пор случается, что претенденты на рабочий диплом судового офицера представляют в целях первичного дипломирования документы, которые действительно подтверждают стаж работе на судне, но в должностях, не имеющих ничего общего по выполняемым функциям с запрашиваемым рабочим дипломом. Как правило, к таким должностям относятся рыбообработчик, стюард и т.п. Удивляет парадоксальная уверенность таких претендентов в том, что для рабочего диплома вполне достаточно самого факта годичного нахождения в море. Вместе с тем, подобный стаж можно считать непригодным для дипломирования и потерянным для обучающегося.

Здесь будет уместно заметить и то, что различие в указании должностей в справке о плавании, мореходной книжке, судовой роли, Книги регистрации практической подготовки, в трудовом соглашении является однозначным основанием для непринятия к учёту представленного претендентом на рабочий диплом стажа плавания.

Вместе с тем, сам факт работы на судне в должности иной, чем практикант или кадет, противоречит самой концепции и философии практической подготовки на судах, которые полагают процесс обучения первичным. Конечно, выполняя обязанности, например, матроса, курсанта или студента может вполне осваивать смежные с офицерскими компетенции, а в свободное от вахт или работ время заниматься специальностью. Однако эффективность такого формата практической подготовки будет минимальна, а в некоторых случаях и стремиться к нулю. Достаточной мотивации к обучению, а порой и физических сил, на надлежащее освоение специальности у практикантов, занимаемых должности, может и не хватить. Безусловно, бывают и исключения, когда и курсант сам по себе стремиться к знаниям, несмотря на занятость на палубе или в машине, и офицерский состав попадает грамотным, понимающим кадровые проблемы флота и желающий способствовать процессу обучения практиканта на борту судна. Однако ещё раз – это скорее исключение, чем правило. Одновременно со сказанным следует понимать, что количество кадетских программ, учебных и учебно-производственных судов на настоящий момент не обеспечивает всех потребностей морских образовательных организаций при том, что низкоквалифицированный труд крайне востребован.

Есть ещё один проблемный момент, касающийся оформления справок о плавании будущих вахтенных помощников капитана и наименования тех позиций, которые прописываются в документе как должность. Речь идёт о дилемме – палубный практикант (deck cadet) или штурманский практикант (navigational cadet). Точнее, дилеммы как таковой нет, но есть некоторое различие между формальным пониманием наименования и его реальным (фактическим) общепринятым содержанием. Прилагательное «палубный» должно по своему смыслу обозначать здесь принадлежность к палубной команде, а не как ни к штурманской службе. Однако, как правило, практикантов, обучающихся на вахтенных помощников капитанов, так и прописывают в судовых ролях – deck cadet. Более того, это наименование, по сути, закреплёно нормативно в англоязычном наименовании Книги регистрации практической подготовки, рекомендуемой Кодексом ПДНВ [5] – On board training record book for officers in charge of a navigational watch (deck cadets). Но официальная, утверждённая Росморречфлотом и размещённая на сайте агентства русскоязычная версия этой книги возвращает описанное выше противоречие. Выражение в скобках переведено в этой книге как «практикант-судоводитель», а не как палубный практикант (рис. 2).



Рис. 2. Титульный лист Книги регистрации практической подготовки практиканта-судоводителя

Несколько парадоксальными в справках о плавании видятся такие наименования должностей, как матрос-практикант, кадет-электрик и т.п. Здесь очевидны два варианта трактовки. Первый – такими наименованиями обозначаются обучающиеся на рядовой состав. Второй – лица, занимаемые должности с подобными наименованиями, работают на двух фронтах.

В итоге, все должности на морских судах, которые могут быть заняты обучающимися в целях практической подготовки, можно разделить (табл. 1) на оптимальные, соответствующие той самой идеальной концепции практической подготовки, допустимые, обусловленные конъюнктурой, и недопустимые, которые никак не имеют отношения к практической подготовке.

Таблица 1

Шифр специальности	Оптимальные наименования	Допустимые наименования		Недопустимые наименования
		традиционные	парадоксальные	
26.05.05	штурманский практикант, практикант-судоводитель, стажёр вахтенного помощника капитана, вахтенный помощник-стажёр, дублёр вахтенного помощника капитана, вахтенный помощник-дублёр	палубный практикант, матрос (с указанием классности или без неё), Ordinary Seaman (OS), Able Seaman (AB)	матрос-практикант	стюард, мессман, рыбообработчик
26.05.06	машинный практикант, практикант-механик, вахтенный механик-стажёр	моторист (с указанием классности или без неё), oiler, wiper	практикант-моторист	
26.05.07	практикант-электромеханик, ЕТО-cadet, электромеханик-стажёр	электрик, электрик судовой (с указанием классности или без неё)	практикант-электрик	

При всём сказанном следует заметить, что ни Положение [3], ни Конвенция ПДНВ не содержат прямых указаний или ограничений по должностям, которые может занимать в процессе практической подготовки претендент на рабочий диплом. Вместе с тем оба документа определяют практическую подготовку и стаж работы на судне как часть одобренной учебной программы, а это формально значит, что на борту судна обучающийся не может занимать должность иной, чем кадет, если, конечно, учебная программа не предусматривает иного. Другими словами, морская образовательная организация может прописать в программе практики возможность работы даже в должности стюарда, если в свободные от выполнения обязанностей время он проходит обучение по специальности и несёт не менее 4 часов соответствующей вахты. Вместе с тем, думается, что учебной программе, включающей такую программу практики, будет довольно-таки проблематично получить и сохранять статус «одобренная».

Вернёмся к упомянутому выше пункту 37 Положения [3], согласно которому обязательным условием для первичного дипломирования вахтенных помощников капитана является 6 месяцев

несения вахты «под руководством» (ранее названные специальным цензом). Однако в соответствующих пунктах Положения не конкретизируется какой-именно вахты (точнее, конкретизируется единожды – ходовая вахта упоминается только в пункте 20), и в итоге в справках о плавании упорно, из раза в раз появляется упоминание о палубной вахте, что является не только не корректным, но и не имеющим отношение к первичному дипломированию.

Если в Положении [3] понятие «палубная вахта» отсутствует, то в Конвенции ПДНВ оно есть, но появляется впервые и встречается только в части 5 «Несение вахты в порту» главы VIII части А Кодекса ПДНВ. Таким образом, очевидно, что палубная вахта никакого отношения к вахте, являющимся необходимым условием для дипломирования ВПК, не имеет, в отличие от самостоятельной ходовой навигационной вахты. Подтверждает это и Правило II/1 Конвенции ПДНВ, в пункте 2.3 которого указано, что претендент на рабочий диплом должен «...в ходе требуемого стажа работы на судне выполнять обязанности по несению вахты на мостике (!) под руководством капитана или квалифицированного лица командного состава в течение периода не менее шести месяцев».

Для будущих механиков такой проблемы нет – как в Положении [3], так и в Конвенции ПДНВ специальный ценз везде увязывается открытым текстом с несением вахты в машинном отделении или с несением машинной вахты. Для электромехаников ещё проще – специальный стаж для них не предусматривает несение вахты.

Очень часто справки о плавании содержат лишнюю информацию и атрибуты. Так, практикантам могут заполнить пункт «Только для судоводителей» (рис. 1), предназначенный для специалистов с рабочими дипломами. Видимо здесь срабатывает курсантский обычай называть обучающихся наименований квалификаций, которой он должен получить по окончанию обучения.

Другой момент – в справках о плавании для практикантов-судоводителей часто кроме подписи капитана наличествует подпись старшего механика, которая требуется только для визирования документов машинной команды. Также не требуется визирование справок о плавании судовладельцем или его представителями.

Несколько спорным и дискуссионным является присутствие в справках о плавании таблиц, в которых отмечается выполнение тех или иных функций по рабочему диплому (рис. 3).

в должности, согласно судовой роли/by the crew list in the capacity of:			
с выполнением функций по квалификационному документу/performing functions appropriate to the Certificate held:			
Судовождение/Navigation	да/yes* нет/none*	Судовые механические установки/Marine engineering	да/yes* нет/none*
Обработка и размещение грузов/Cargo handling and stowage	да/yes* нет/none*	Электрооборудование, электронная аппаратура и системы управления/Electrical, electronic & control engineering	да/yes* нет/none*
Управление операциями судна и забота о людях на судне/Controlling the operation of the ship & care for persons on board	да/yes* нет/none*	Техническое обслуживание и ремонт/Maintenance & repair	да/yes* нет/none*
Радиосвязь/ Radiocommunications			да/yes* нет/none*

Рис. 3. Таблица функций

С одной стороны, Положение [3] указывает, что специальный стаж должен включать стажировку с отработкой всех функций по диплому. Однако, в распространённых сейчас бланках эта таблица должна быть заполнена в соответствии с квалификационным документом. Здесь дилемма заключается в понимании того, какой квалификационный документ должен приниматься во внимание – тот, который давал право занимать соответствующую должность, или тот, на который претендует обучающийся. Первый вариант видится здесь более очевидным, а, вследствие этого, таблица функций не подлежащая заполнению практикантом. Факт же отработки всех функций по диплому должен фиксироваться и фиксируется в Книге регистрации практической подготовки (КРПП).

Введение в оборот принципиально новых по содержанию и структуре Книг регистрации практической подготовки, которые, как уже было упомянуто выше, рекомендованы ИМО в Кодексе ПДНВ и Росморречфлотом, имеет свои плюсы и минусы. К первым относится то, что КРПП не привязаны к наименованию и количеству практик, которые могут претерпевать довольно-таки частые изменения, а структурированность задач, подлежащих решению (выполнению) обучающимся на борту судна, делает документирование отработки функций на порядок более наглядной. Однако КРПП должны сопровождаться методическими рекомендация, разработанными МОО, чтобы как

обучающиеся, так и лица, отвечающие за подготовку на борту судна, понимали, как пользоваться этим документом и что именно нужно и можно заполнять на той или иной практике. В противном случае процесс заполнения КРПП будет несколько отвязан от содержания образовательной практики, одновременно совпадая с ней по этому содержанию. Иными словами, академическое (теоретическое) обучение, которое должно лежать в основе выполнения той или иной задачи практики, может случиться уже после окончания практики. Для примера: курсант сдаёт зачёт на судне по ЭКНИС на практике, завершающей второй год обучения, тогда как знакомство с теорией и принципами построения этой системы у него произойдет только на выпускных курсах.

Роль морских образовательных организаций в первичном дипломировании переоценить сложно. Существующая в настоящее время практика первичного дипломирования предполагает, что оригиналы справок о плавании и заполненные надлежащим образом КРПП претендент на рабочий диплом предоставляет именно в МОО, специалист которой оценивает достоверность представленной в справках информации, считает стаж (как общий, так и специальный) и выдает для дальнейшего предоставления в дипломный отдел сводную справку о выполнении учебной программы, за которую и несёт ответственность. Кроме документов, выпускник МОО, являющийся претендентом на рабочий диплом, предъявляется специалисту МОО практически тот же комплект документов, который прописан в Положении [3], в том числе и результаты медицинского освидетельствования, пройденного в соответствии с российским законодательством. Необходимость в предоставлении последних обусловлена тем, что справка о выполнении учебной программы кроме всего прочего подтверждает наличие у претендента способности выполнять функции по рабочему диплому в том числе и по состоянию здоровья. Очевидно, что проблемы с цензом (возможно, изначально не видные обучающимся или недооценённые им), незаполненная Книга регистрации практической подготовки, отсутствие медицинского заключения поставят обучающемуся неприятный и непреодолимый шлагбаум на пути к рабочему диплому и профессии.

Таким образом, существующая, имеющая множество различных, часто некорректных подходов практика заполнения справок о плавании представляет собой совокупность проблем, а не стройный единообразный общепринятый алгоритм, содержащий ответвления для любой ситуации. Причин тому две, и они тесно связаны. Во-первых, каждое лицо, заполняющее справки о плавании, имеет своё видение об объёме, содержании и форме предоставления информации, или не имеет его вовсе (особенно, когда дело касается стажа плавания для первичного дипломирования). Второй причиной является отсутствие в правовом поле какого-либо единого для всех администраций морских портов и моряков кодекса правил (инструкции, порядка), в котором можно было бы найти ответ на любой вопрос. Думается, что здесь было бы рациональным не только разработать и ввести в действие такой нормативный документ, но и утвердить форму (или формы) предоставления сведений о стаже работы на судне. Множественное число здесь использовано не случайно, так как единая универсальная форма с наличием выбора для пользователя заполнять только имеющие отношение к субъекту части (строчки и ячейки) часто приводит к путанице – заполнению ненужного и игнорирование подлежащего заполнению. Именно нормативный документ и набор утверждённых форм, дифференцированных по совокупности различных признаков, позволит приблизить процесс оформления справок к идеальному.

Формы и порядок их заполнения также необходимы и для учёта практики по судоремонту для претендентов на дипломы вахтенного механика и электромеханика и работы по обслуживанию береговых объектов ГМССБ для судовых радиоспециалистов (пункты 32 и 33 Положения [3] соответственно). В отношении практики по судоремонту здесь необходимо заметить, что сама формулировка соответствующей нормы Положения, а именно: «...для получения... дипломов... дополнительно к стажу работы на судах учитывается практика по судоремонту продолжительностью не менее двух месяцев», является источником разночтений. Здесь не до конца понятно, входит ли требуемый ремонтный стаж в основной, равный 12 месяцев (т.е. может учитываться вместо стажа работы на судне) или идёт в дополнение к нему. Практика дипломирования показывает, что это дополнительное требование по стажу, и два месяца судоремонта должны быть сверх стажа работы на судне. К этому отсылает и упоминание того, что ремонтного стажа должно быть не менее (!) двух месяцев. В противном случае, т.е. при включении стажа по судоремонту в общие 12 месяцев, в формулировке, исходя из здравого смысла, было бы указание на «не более».

Другая проблема, связанная с практикой по судоремонту – параллельный учёт этой практики со стажем плавания. Эту проблему можно определить вопросами: «Допускается ли одновременный

учёт практики и плавательного стажа на судне, находящимся в эксплуатации? Можно ли для машинного практиканта в одной и той же справке стаж плавания позиционировать и как судоремонтный стаж. Возвращаясь к здравому смыслу, анализируя существующие реалии работы машинных команд на борту судна, думается, что на эти вопросы можно дать положительные ответы. Машинные практиканты, мотористы и другие члены машинной команды в течение одного рейса могут одновременно обслуживать действующие механизмы и заниматься ремонтом неисправных.

В целях первичного дипломирования вполне оправданным будет вообще отказаться от справок о плавании в традиционном виде, передав их функцию Книгам регистрации практической подготовки.

Таким образом, описанные в настоящей работе проблемы документирования результатов практической подготовки на судах обучающихся по конвенционным специальностям размывают процесс дипломирования на соответствующей его стадии, дают повод для противоречивых трактовок норм права, создают неудобства правоприменителю и искусственные препятствия морякам, и, являясь следствием проявления человеческого фактора и наличия пробелов в праве, могут быть минимизированы только посредством устранения этих двух причин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермаков, С.В. Юридические аспекты снятия ограничения «только нерыбопромысловое судно» / С.В. Ермаков, Е.В. Мулина // Новые стратегии и технологии морского судоходства и промысла. Материалы Второй национальной научно-технической конференции на базе ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет». 31 марта 2023 года. [Электронный ресурс] / отв. за вып.: Т.С. Станкевич. – Калининград: Изд-во БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ», 2023. – С. 46-49.

2. Ермаков С.В. Математический парадокс правил учёта стажа работы на судне / С.В. Ермаков, С.Ю. Морозова // Новые стратегии и технологии морского судоходства и промысла. Материалы Третьей национальной научно-технической конференции на базе ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет». 28 марта 2024 года. [Электронный ресурс] / отв. за вып.: Т.С. Станкевич. – Калининград: Изд-во БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ», 2024. – С. 46-48.

3. Положение о дипломировании членов экипажей морских судов (утв. приказом Минтранса России от 8 ноября 2021 года № 378 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/727233053> (дата обращения: 03.10.2024).

4. Положение о дипломировании членов экипажей морских судов (утв. приказом Минтранса России от 15 марта 2012 года № 62 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/902338716> (дата обращения: 03.10.2024).

5. Международная конвенция о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты 1978 года, с поправками. Кодекс по подготовке и дипломированию моряков и несению вахты, с поправками. – Лондон: Международная морская организация, 2017. – 425 с.

PROBLEMS OF DOCUMENTING THE ONBOARD TRAINING RESULTS FOR STUDENTS STUDYING UNDER THE BASED OF STCW CONVENTION REQUIREMENTS PROGRAMS

¹Ermakov Sergey Vladimirovich, PhD, Nautical Institute Director

²Morozova Svetlana Yurievna, Senior Lecturer of Navigation and Maritime Safety Department

^{1,2}Baltic Fishing Fleet State Academy FSBEI HE "KSTU",
Kaliningrad, Russia, e-mail: ¹sv.ermakov@bgarf.ru; ²nach_uo@bgarf.ru

The problems of preparing documents confirming, for the purposes of the first certification, the length of seagoing service and the completion of the onboard training program of maritime educational organizations students are identified and clearly illustrated, the sources of these problems are determined and the ways of solving them are briefly described.

О БЕЗОПАСНОСТИ СУДОВ В СЛУЧАЕ НАСТУПЛЕНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО РЕЗОНАНСА

¹Жуйков Михаил Станиславович, инженер-судоводитель

²Гуральник Борис Самуилович, канд. техн. наук, доцент

³Кубрин Сергей Сергеевич, д-р техн. наук, профессор ИПКОН РАН

¹ Действующий 2-й помощник капитана, e-mail: zms97@yandex.ru

² Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ», Калининград, Россия, e-mail: boris.guralnik@mail.ru

³ ИПКОН РАН, ФГОУ Московская государственная академия водного транспорта, Москва, Россия, e-mail: s_kubrin@mail.ru.

Посвящено параметрическому резонансу судов, который может возникать при воздействии внешних сил (волн) на судно и приводить к опасной качке и авариям. Для определения условий наступления параметрического резонанса используется диаграмма устойчивости, которая показывает области устойчивого и неустойчивого состояния. Параметрическая качка зависит от параметров судна (водоизмещение, остойчивость, частота собственных колебаний) и параметров волн (частота, амплитуда). В работе проведены расчеты для двух контейнеровозов, которые показывают, что они могут попадать в зону неустойчивого состояния при разных скоростях и курсовых углах.

Анализ случаев попадания судов в параметрическую качку

При оценке мореходности судов при плавании в условиях морского волнения в основном рассматривают бортовую, продольную и вертикальную качку. Колебания при качке чаще всего являются периодическими и гармоническими и определяются решениями дифференциальных уравнений соответствующих видов качки.

В тоже время в теории [1], [2], [3] рассматривается и другой вид колебаний, возникающих в случаях, когда под воздействием внешних сил в процессе движения изменяются параметры самого качающегося судна.

В этом случае коэффициенты дифференциальных уравнений, зависящие от параметров системы, т.е. судна, становятся явными функциями времени. Такие колебания называются параметрически-возбуждаемыми или параметрическими. Параметрический резонанс проявляется в виде неожиданного возрастания углов крена судна без видимых изменений параметров волнения. Параметрическое возбуждение наблюдается только при определённых соотношениях между частотой внешнего воздействия и частотой собственных колебаний судна и поэтому сходно с резонансом [2].

Параметрические возбуждения могут быть причинами смещения груза, и аварийных происшествий с грузами и судами. Например, наступление параметрического резонанса, возможно, является причиной начального смещения разжижающегося груза, рассмотренного в [4], причиной потери при недостаточном креплении палубных грузов или потерь перевозимых контейнеров [5].

В разборе аварии судна «Trans Summer» [4] указано, что вначале большая волна накренила большой балкер на угол более 20°, после чего у судна появился постоянный крен около 10°. Далее, под действием смещающегося разжиженного груза крен быстро продолжал расти, экипаж покинул судно, и в течение 103 минут судно опрокинулось.

В [5] отмечается, что потери контейнеров при перевозках на контейнеровозах происходят при тяжелой погоде, когда у судна развивается значительный крен. Судя по описанию аварии, потери контейнеров на контейнеровозе «Svendborg Maersk» произошли из-за наступления параметрического резонанса. 14 февраля 2014 года судно попало в шторм в Бискайском заливе. Вследствие этой аварии произошло обрушение и падение за борт контейнеров. Часть контейнеров при этом упало в море, но предварительно их количество считалось незначительным. Однако, когда

«Svendborg Maersk» прибыл в Малагу 17 февраля, выяснилось, что на судне не хватает 520 контейнеров. После расследования случая стало известно, что рядом с местом инцидента наблюдались значительные волны высотой 13,40 м, которые явились причиной параметрического резонанса контейнеровоза «Svendborg Maersk» и возникновения опасной качки с углом крена до 41° при малой скорости судна и, как следствие потери контейнеров.

Эти примеры свидетельствуют о том, что условия наступления параметрического резонанса требуют дополнительного изучения.

Условия попадания в параметрический резонанс

Следуя [2], попробуем определиться с условиями наступления параметрического резонанса. В [2] совместно рассматриваются бортовая и вертикальная качка. За счёт вертикальной качки восстанавливающий момент при бортовой качке становится периодической функцией времени, что может явиться причиной возникновения параметрического резонанса.

Рассматривая дифференциальное уравнение бортовой качки, сделав необходимые преобразования и замены, в конечном итоге, оно было сведено к канонической форме уравнения Матье [2], решением которого являются специальные функции. В результате решения уравнения Матье получена диаграмма устойчивости (рис. 1), на которой показаны области устойчивого состояния, где наблюдаются гармонические колебания и неустойчивого состояния, где возможно возникновения параметрического резонанса.

Как видно из рис. 1, попадание в зону устойчивого и неустойчивого состояния зависит, в конечном итоге, от двух параметров:

$$q = 2 * P * \zeta_0 * (w^2 / \sigma^2) \quad (1)$$

$$a = 4 * w^2 / \sigma^2 \quad (2)$$

где: $P = (VO + SO * Zg) / VO * GMO$

ζ_0 – амплитуда вертикальной качки, м,

w – частота собственных колебаний судна, 1/с,

σ – частота волн, 1/с.

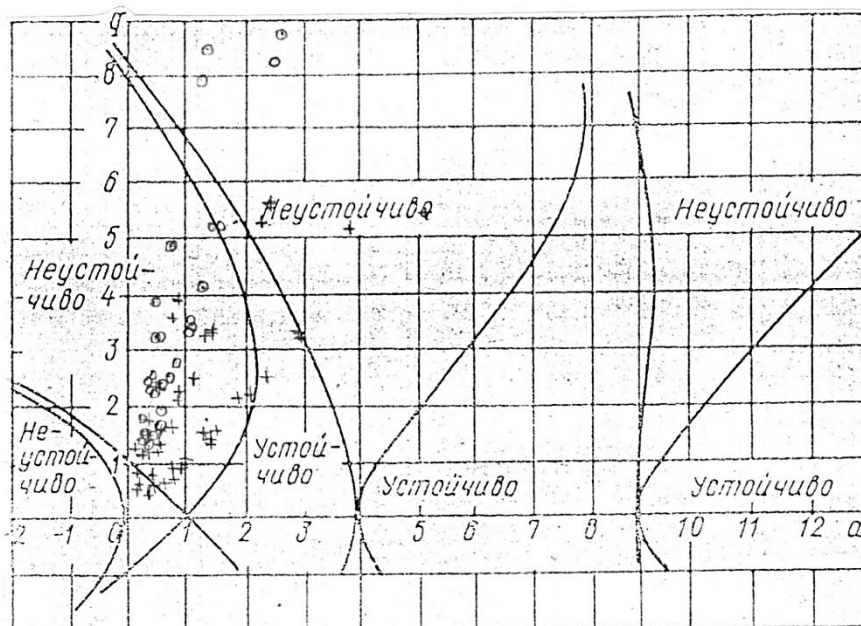


Рис. 1. Диаграмма устойчивости Айнса-Стретта

Параметр q комплексный и учитывает состояние нагрузки и остойчивости судна в рассматриваемом случае, отношение квадратов частот собственных колебаний судна и частот волн и амплитуду вертикальной качки судна.

Параметр a зависит от отношения квадратов частот собственных колебаний судна и частот волн.

Параметр ρ можно определить с использованием гидростатических таблиц и данных по результатам контроля остойчивости судна.

Для оценки и прогнозирования попадания конкретного судна в зоны устойчивого и неустойчивого состояния также необходимо знать частоту собственных колебаний судна w . Период собственных колебаний судна для нахождения частоты собственных колебаний можно рассчитать с помощью «капитанской» формулы:

$$\tau_c = C \cdot B / (GM_0)^{0,5} \tag{3}$$

где B – ширина судна, м;

GM_0 – метацентрическая высота судна в заданном случае нагрузки, м;

C – инерционный коэффициент судна [6]. При оперативных расчётах можно принять $C = 0,8$, величина C также может быть вычислена по методике ММО [7] или с использованием рекомендаций [8].

Величину C для большинства типов судов обычно определяют опытным путём во время опыта кренования, которое выполняется в порожнем состоянии. Однако, величина инерционного коэффициента в грузу практически всегда меньше, чем в порожнем состоянии. Таким образом, все эти способы нахождения C имеют погрешности.

О величинах погрешности можно судить по графику изменения величины C для фидерного контейнеровоза (1400 TEU), приведённому на рис. 2.

Данный график получен по результатам замеров τ_c при разных состояниях загрузки судна. Наибольшие значения C соответствуют состоянию судна без контейнеров с некоторым количеством балласта. Разность в инерционных коэффициентах между порожним судном и в грузу составляет 20%.

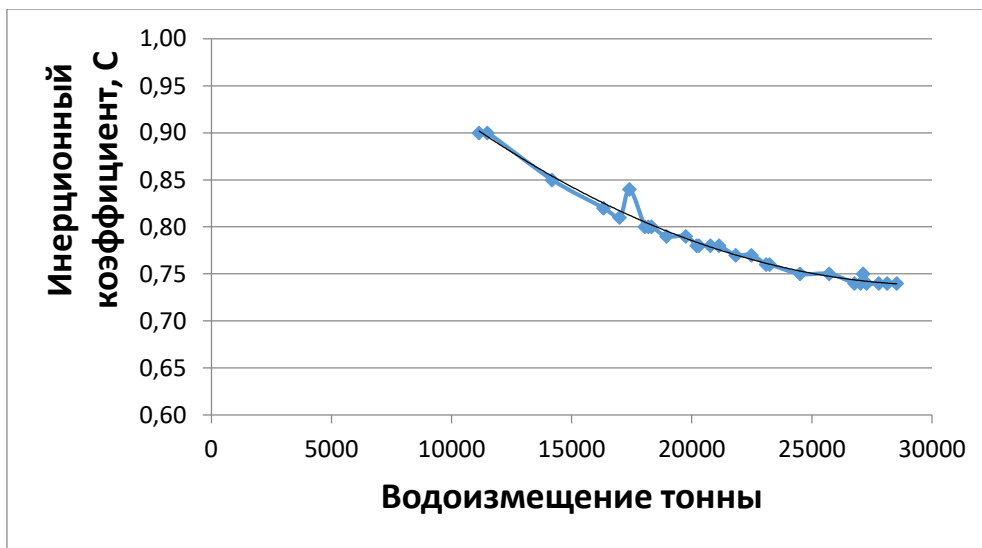


Рис. 2. Зависимость инерционного коэффициента C от водоизмещения судна «FD»

В нашем случае, на данном этапе исследования, будем принимать в расчётах $C = 0,80$. Тогда $w = 2 \cdot \pi / \tau_c$.

Также, на данном этапе исследования, амплитуду вертикальной качки ζ_0 будем принимать равной полувысоте волн.

Для учёта нерегулярности реального волнения в качестве характерных рекомендуется [9] принимать средние значения $\bar{\lambda}$ и $\bar{\tau}$, поскольку именно эти значения оказываются наиболее вероятными.

$$\bar{\lambda} = K_\lambda \cdot 1,56 \cdot \bar{\tau} \tag{4}$$

$$\bar{\tau} = \beta \cdot 3,10 \cdot (h_{3\%})^{0,5} \tag{5}$$

где $h_{3\%}$ - высота волн 3% обеспеченности, м;

K_λ – коэффициент, зависящий от степени нерегулярности волнения, $K_\lambda = 0,8$ [9];

β - коэффициент, зависящий от степени развитости волнения, $\beta = 0,7$ для развивающегося волнения, $\beta = 1,50$ для волнения зыби [9].

В таком случае, при чисто лаговом волнении $\sigma = 2*\pi/\bar{\tau}$.

При косых курсовых углах судна по отношению к волнению в формулы для q и a вместо частоты σ следует подставлять кажущуюся частоту волнения, определяемую по формуле:

$$\sigma_k = \sigma - (\sigma^2/g)*\text{COS}(\varepsilon) \quad (6)$$

где ε – угол между вектором скорости движения волн и вектором скорости судна.

Используя данный алгоритм с учётом вышеназванных допущений были проведены расчёты возможности появления параметрического резонанса у двух контейнеровозов вместимостью 658 TEU и 1400 TEU, при нескольких состояниях нагрузки и при движении со скоростями 5,10, 15 и 20 узлов и курсовых углах по отношению к волнению $0^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$ и 180° .

В расчётах принято $\varepsilon = 0^\circ$ - попутное, а $\varepsilon = 180^\circ$ чисто встречное волнение. При $\varepsilon = 150^\circ$ волнение в скулу, а $\varepsilon = 90^\circ$ чисто лаговое волнение.

Некоторые результаты расчётов приведены на рис. 1,3 и 4.

Расчётные точки для двух контейнеровозов при разных скоростях и курсовых углах дополнительно нанесены на диаграмму устойчивости рис. 1.

Как видно из рис. 1 рабочие соотношения параметров q и a , для двух рассматриваемых судов, практически всё время находятся в зоне неустойчивого состояния, где возможно возникновения параметрического резонанса.

Расчет диаграммы устойчивости

Рабочий диапазон параметра a (см. рис 3), для обоих судов, заметно сужается при увеличении загрузки, т.е. водоизмещения судна. При увеличении загрузки и при росте скорости судна параметр q уменьшается, и некоторые рабочие точки контейнеровоза «FD» приходят в зону устойчивости.

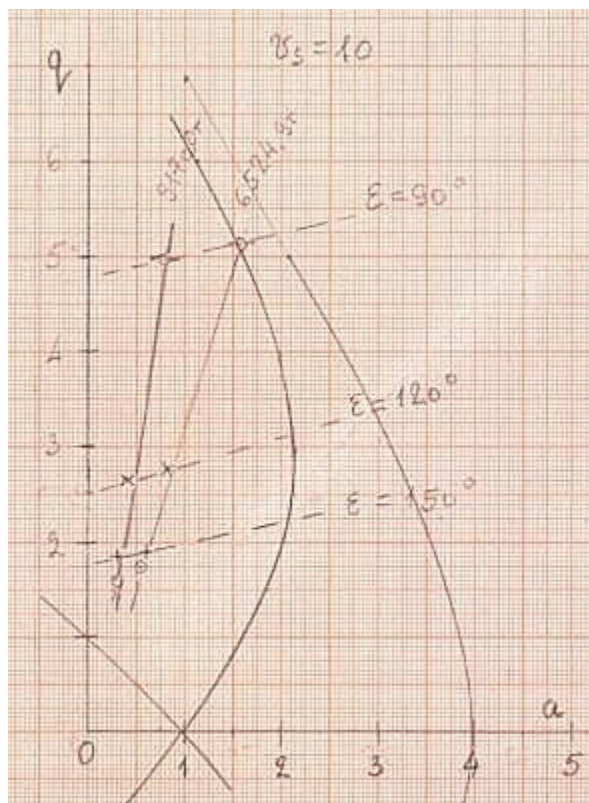


Рис. 3. Рабочие диапазоны параметров q и a для контейнеровозов «FD» и «F»

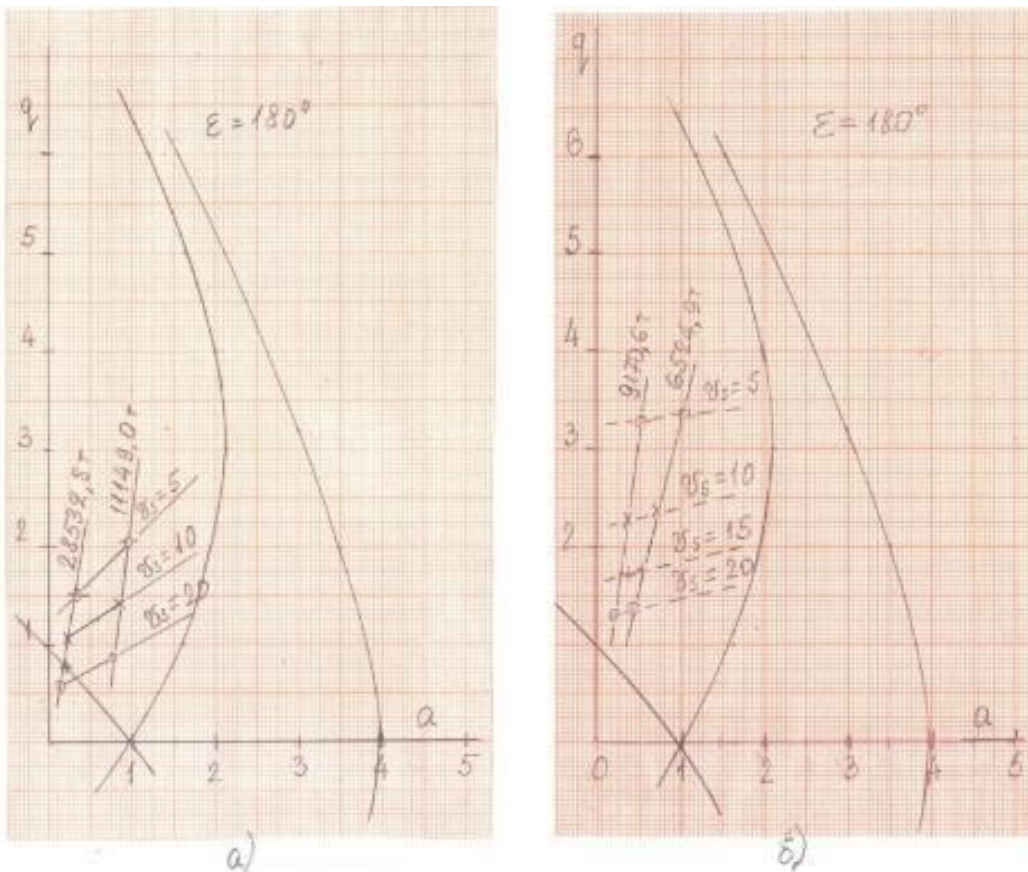


Рис. 4. Рабочий диапазон параметров q и a для контейнеровоза «F»

На рис 4 показано, как влияет изменение курсового угла, для двух состояний загрузки, при скорости $V_s = 10$ узлов на положение судна «F» в зоне неустойчивости.

Таким образом, продолжая исследования зависимости переменных уравнения для конкретных типов судов, можно найти соотношения параметров a и q попадающих в зоны устойчивости, что в свою очередь исключит попадание судна в резонансную качку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семёнов-Тян-Шанский, В.В, Благовещенский, С.Н, Холодилин, А.Н. Качка корабля. Л.: Судостроение, 1969. - 292 с.
2. Ремез, Ю.В. Качка корабля. Л.: Судостроение, 1983. - 327 с.
3. Луговский, В.В. Нелинейные задачи мореходности корабля. Л.: Судостроение, 1966. - 235 с.
4. Гуральник, Б.С, Сирота, А.К, Якута, И.В, Кубрин, С.С. Оценка вероятности успешной эвакуации экипажа балкера в случае разжижения груза. / Гуральник Б.С, Сирота А.К, Якута И.В, Кубрин С.С. //Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2019. – №4. – С. 66-72.
5. Analysis of Marine Casualties and Incidents Involving Container Vessels. Summary Report, September 2020. –24 P.
6. Липис, В.Б, Ремез, Ю.В. Безопасные режимы штормового плавания судов. М.: Транспорт, 1982. – 117 с.
7. Международный кодекс остойчивости судов в неповреждённом состоянии (Кодекс ОСНС 2008 года), (рез. MSC. 267(85)) с поправками. – СПб.: АО «ЦНИИМФ»
8. Благовещенский, С.Н, Холодилин, А.Н. Справочник по статике и динамике корабля. В двух томах. Том 2. Динамика (качка) корабля. Л.: Судостроение, 1975. – 174 с.
9. Бородай И. К., Нецветаев Ю.А. Мореходность судов. Л.: Судостроение, 1982. - 287 с.

ON THE SAFETY OF SHIPS IN THE EVENT OF A PARAMETRIC RESONANCE

¹Zhuikov M. S., Marine navigator

²Guralnik B. S., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

³Kubrin S. S., Doctor of Technical Sciences, Professor IPCON RAS

¹Acting 2nd Mate, e-mail: zms97@yandex.ru

²Baltic Fishing Fleet State Academy FSBEI HE "KSTU",
Kaliningrad, Russia, e-mail: boris.guralnik@mail.ru

³IPCON RAS, Moscow State Academy of Water Transport, Moscow, Russia,
e-mail: s_kubrin@mail.ru

The scientific work is devoted to the parametric resonance of ships, which can occur when exposed to external forces (waves) on the ship and lead to dangerous rolling and accidents. To determine the conditions for the onset of parametric resonance, a Ains-Strett diagram is used, which shows the areas of stable and unstable condition. The parametric rolling depends on the parameters of the vessel (displacement, stability, frequency of own oscillations) and wave parameters (frequency, amplitude). Calculations for two container ships have been carried out in the work, which show that they can fall into an unstable zone at different speeds and heading angles.

ПРИМЕНЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ СОЗДАНИЯ МОРСКОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ АСТРОНАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Кириллов Николай Олегович, канд. техн. наук, доцент,
доцент кафедры судовождения и безопасности мореплавания

Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ»,
Калининград, Россия

Обосновано повышение роли и места мореходной астрономии в судовождении. Рассмотрена краткая история развития автоматизированных астронавигационных систем в отечественном военно-морском флоте. Рассмотрена возможность применения космических технологий в виде астровизирующих устройств на базе КМОП-матриц для создания морской астроинерциальной навигационной системы. Обобщен опыт применения этих технологий для создания авиационной астроинерциальной навигационной системы в отечественных военно-космических силах. Рассмотрена общая структура и принцип работы экспериментального образца морской астроинерциальной навигационной системы с системой наведения и стабилизации в условиях качки, представленного Пермской научно-производственной приборостроительной компанией. Показана актуальность и насущная необходимость скорейшей организации ее серийного производства и оснащение ей судов флота.

Мореходная астрономия в течение достаточно длительного времени была и остается в настоящее время надежным средством навигационного обеспечения судовождения.

Это обусловлено, прежде всего, полной автономностью астрономических средств и методов и возможностью их применения в любом районе Мирового океана.

Решение задач мореходной астрономии, таких как определение места судна и поправки курсоуказания может выполняться с применением различных средств и методов.

Однако применение традиционных средств мореходной астрономии, таких как навигационный секстан, судовой пеленгатор, хронометр, специальные астронавигационные пособия не обеспечивает в полной мере достаточно высокой эффективности обеспечения судовождения.

Связано это с тем, что для измерения основного в традиционной мореходной астрономии астронавигационного параметра, такого как высота светила, необходимо одновременно наблюдать как само светило, так и линию видимого горизонта, что не всегда представляется возможным.

В дневное время можно получить астронавигационный параметр только по разновременным наблюдениям Солнца, что требует достаточно большого времени для выполнения обсервации.

Сам процесс измерения высот светил требует от судоводителя определенных умений и навыков, которые достигаются только регулярными тренировками, чем многие судоводителя пренебрегают, полностью полагаясь на систему спутниковой навигации.

Сами действия судоводителя по измерению высоты светила можно отнести к чисто «ручной» технологической операции, которая в настоящее время никак не автоматизирована.

Устранение вышеперечисленных впервые началось в Военно-морском флоте и выполнялось по следующим направлениям [1]:

- искусственное моделирование плоскости горизонта с помощью специальных гироскопических приборов;
- создание новых измерительных устройств, в том числе работающих не только в оптическом, но радиодиапазоне;
- создание алгоритмов и программ автоматизированного решения задач мореходной астрономии.

Так с начала 50-х годов для отечественного ВМФ последовательно были разработаны и введены в эксплуатацию астронавигационные системы «Лира» и «Сегмент», радиосекстан «Самум»,

оптические астрокорректоры «Волна» и «Шлюз», радиооптический секстан «Сайга», радиоастронавигационная система «Снегирь», радиоастронавигационный комплекс «Салют» и «Мачта» [2].

Создание и внедрение таких систем позволило практически полностью устранить недостатки «классической» мореходной астрономии на тех военных кораблях и судах, где они были установлены.

Однако на судах гражданского флота подобные разработки внедрены не были в силу ряда причин, а именно:

- сложность конструкции, значительные масса и габариты, высокая стоимость;
- необходимость большие финансовые затраты на разработку и создание;
- определенная закрытость всей информации, связанной с разработкой и эксплуатацией АНС;
- определенная переоценка возможностей систем спутниковой навигации.

Однако анализ опыта эксплуатации систем спутниковой навигации, особенно широко применяемой в гражданском судоходстве американской системы GPS, показал реально существующую возможность сбоя в работе спутниковой системы по различным причинам, особенно в районах военных конфликтов.

Это заставило вновь задуматься о повышении эффективности средств и методов мореходной астрономии.

Поистине революционной предпосылкой для этого явилось появление матричных фотоприёмников на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС-матриц).

Упрощенно прибор с зарядовой связью можно рассматривать как матрицу близко расположенных конденсаторов со структурой металл-диэлектрик-полупроводник.

В качестве полупроводника в ПЗС обычно используется кристаллический кремний, а в качестве изолятора - оксиды кремния. Поэтому такую структуру иногда называют металл-оксид-полупроводник (МОП). Электрический сигнал в ней представлен не током или напряжением, как в большинстве других твердотельных приборах, а зарядом. При соответствующей последовательности тактовых импульсов напряжения на электродах МОП-конденсаторов зарядовые пакеты можно переносить между соседними элементами прибора.

Использование ПЗС-матриц привело к созданию широкопольных приборов звёздной ориентации, решающих задачу по изображению произвольного участка небесной сферы.

Первоначально подобные приборы нашли широкое применение в отечественных космических аппаратах [3]. Дальнейшее развитие звёздных датчиков привело к замене светочувствительной ПЗС-матрицы матрицей на КМОП-элементах [4].

КМОП-матрица это светочувствительная матрица, изготовленная по технологии комплементарной металл-оксид-полупроводник структуры (КМОП). В данном случае под термином комплементарная понимается использование полевых транзисторов с изолированным затвором с каналами разной проводимости.

Это позволяет с помощью механизма произвольного доступа выполнять считывание выбранных групп пикселей, так называемое кадрированное считывание, которое уменьшает размер захваченного изображения и увеличивает скорость считывания по сравнению с ПЗС-матрицей.

Использование КМОП-матриц сокращает время получения одного кадра до десятых долей секунды, а также заменяет механический затвор электронным [5].

Немаловажным достоинством КМОП-матриц по сравнению с ПЗС-матрицей являются меньшие габариты, масса, энергопотребление и более дешевое производство, особенно при больших размерах матриц.

Опыт применения ПЗС-матриц и КМОП-матриц в системах ориентации космических аппаратов показал их высокую точность и эффективность, а так же возможность применения в авиационной навигации [6].

С учетом этого опыта была разработана авиационная астроинерциальная навигационная система АНС-2009, принятая на вооружение и устанавливаемая на стратегических бомбардировщиках ТУ-160 и других самолетах стратегической, военно-транспортной и боевой авиации Военно-космических сил Российской Федерации [7].

При этом удалось добиться существенного уменьшения габаритов и, что немаловажно, стоимости системы по сравнению астронавигационными системами военно-морского флота.

Повышения надежности и точности удалось добиться путем исключения из состава системы механического устройства наведения на светило и гиростабилизированной платформы.

Опыт применения такой астроинерциальной навигационной системы показал теоретическую и практическую возможность разработки подобной системы морского применения.

Учеными, инженерами и специалистами Пермской научно-производственной приборостроительной компании была разработана астрономическая инерциальной навигационной системы с системой наведения и стабилизации в условиях качки для применения на морских подвижных объектах [8], и изготовлен ее первый экспериментальный образец. Общее устройство такой системы показано на рис 1.

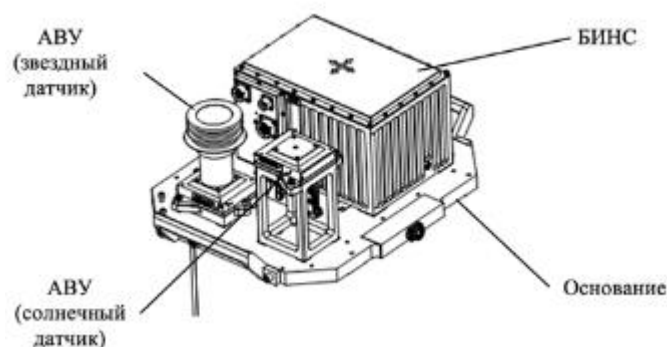


Рис.1 Общее устройство морской астроинерциальной навигационной системы

В состав такой астроинерциальной навигационной системы входят жесткое основание, астровизирующие устройства (АВУ) на КМОП-матрицах и бесплатформенная инерциальная навигационная система (БИНС).

Отличительной особенностью конструкции такой системы, в отличие рассмотренных выше астронавигационных систем военно-морского флота, является жесткое соединение астровизирующих устройств с корпусом бесплатформенной инерциальной навигационной системы. Это обеспечивает неподвижность приборных осей астровизирующих устройств и бесплатформенной инерциальной навигационной системы относительно друг друга, что сводит к минимуму погрешности пересчёта углов пространственной ориентации, измеренных этими устройствами.

Для повышения надежности система имеет два астровизирующих устройства, так называемый солнечный датчик для измерения астронавигационных параметров Солнца, и звездный датчик для измерения астронавигационных параметров навигационных звезд.

Поле зрения датчиков составляет примерно 50° (рис.2). Засветка звездного датчика происходит при отклонении Солнца от оптической оси на 40° , то есть в дневное время возможна работа обоих датчиков.

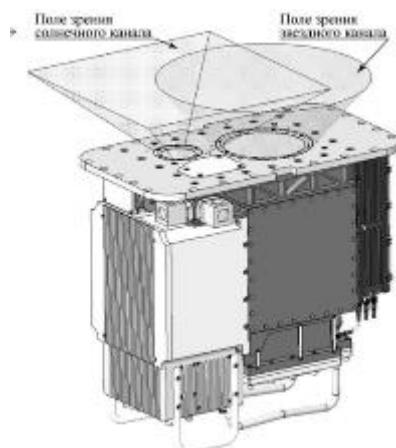


Рис.2 Поле зрения астровизирующих устройств морской астроинерциальной навигационной системы

В процессе работы бесплатформенная инерциальная навигационная система вырабатывает направление инерциального меридиана и плоскость гироскопического горизонта, а так же определяет текущие и прогнозируемые значения углов пространственной ориентации системы в топцентрической системе координат, а именно курс, крен и дифферент.

Полученные значения используются для перевода в углы пространственной ориентации во второй экваториальной системе астрономической координат, а именно часовой угол и склонение для решения задачи опознавания светила, координаты которого снимаются с астровизирующего устройства.

После опознавания светила по заложенным в память вычислительного устройства астрономическим координатам звёзд на кадре определяется точная ориентация астровизирующего устройства во второй экваториальной астрономической системе координат.

Таким образом измеряются прямое восхождение и склонение оптической оси астровизирующего устройства, используемые для решения задачи определения места судна, а так же угол его поворота относительно собственной оптической оси для решения задачи определения поправки курсоуказания.

Накопление кадров производится до того момента, пока среднеквадратическая погрешность определения углов ориентации астровизирующего устройства снизится до нескольких угловых секунд. В зависимости от условий на это требуется от одного до 20–30 кадров.

Значения всемирного времени, необходимые для решения астрономических задач могут поступать в систему либо из навигационного комплекса при его наличии на судне, либо вводиться в систему при включении либо по сигналам точного времени либо от спутниковой навигационной системы. При этом точное всемирное время поддерживается собственной внутренней системой точного времени.

Структура функционирования морской астроинерциальной навигационной системы при определении места судна и поправки курсоуказания с использованием звездного датчика показана на (рис. 3).



Рис. 3 Структура функционирования морской астроинерциальной навигационной системы при определении места судна и поправки курсоуказания с использованием звездного датчика

Благодаря широкому полю зрения астровизирующего устройства не требуется его наведение на отдельные светила. Параметры оптической системы и светочувствительной матрицы подобраны таким образом, что обеспечивается гарантированное попадание не менее 4 различных звёзд в поле зрения астровизирующего устройства.

Время получения одиночного кадра астровизирующим устройством составляет несколько десятых долей секунды, то есть для полноценного измерения астронавигационных параметров 4 звёзд требуется не более нескольких секунд.

Система позволяет наблюдать днем не только Солнце, но и навигационные звезды. Для выделения изображений звезд на фоне засветки неба, то есть для наблюдений звезд днем, осуществляется процесс накопления кадров.

Для предотвращения сбоев в определении углов ориентации в зависимости от оценки качества и информативности полученного астровизирующим устройством изображения предусмотрена отбраковка некачественного кадра.

При невозможности выполнения астронавигационных наблюдений бесплатформенная инерциальная навигационная система выполняет счисление в автономном режиме, либо в режиме совместной работы с навигационным комплексом или другими средствами навигации объекта. При восстановлении условий выполнения астронавигационных наблюдений астровизирующее устройство автоматически переходит в режим выдачи данных для обеспечения определения географических координат и поправки курсоуказания.

Общий вид экспериментального образца морской астроинерциальной навигационной системы с системой наведения и стабилизации в условиях качки показан на (рис. 4).



Рис.4 Общий вид экспериментального образца морской астроинерциальной навигационной системы с системой наведения и стабилизации в условиях качки, представленный Пермской научно-производственной приборостроительной компанией

К настоящему времени этот экспериментальный образец прошел наземные натурные испытания, в ходе которых была подтверждена обоснованность инженерных, конструкторских и алгоритмических решений, положенных в основу созданной морской астроинерциальной навигационной системы.

В ходе разработки и испытаний были учтены отличия в будущей морской эксплуатации системы от эксплуатации на летательном аппарате, для чего:

- увеличены поля зрения астровизирующих устройств за счет обеспечения возможности их искусственного наведения системы на выбранные участки неба;
- обеспечена гиостабилизация системы в направлении выбранных участков неба;
- все элементы системы выполнены в морском водозащищенном корпусе;
- предусмотрена возможность принудительной очистки оптического канала с внешней стороны от брызг, морской соли и других загрязнений.

В качестве дальнейшего совершенствования системы рассматривается вопрос о применении высокочувствительной и высокоточной матрицы, работающей в инфракрасном диапазоне, что позволит проводить измерения астронавигационных параметров в любых метеоусловиях.

Помимо этого рассматривается вопрос о включении в состав рассматриваемой астроинерциальной системы приемника спутниковой навигации, что позволит создать глубоко интегрированную астроинерциальноспутниковую навигационную систему.

Доведение морской астроинерциальной навигационной системы до серийного производства и оснащение ей судов флота приведет к поистине революционным измерениям в применении средств и методов мореходной астрономии в судовождении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Кириллов, Н.О. Современные средства и методы мореходной астрономии. – Калининград: Издательство БГА РФ, 2017. 108 с.
2. Костин, В.Н. История развития отечественных морских астронавигационных систем. // Навигация и гидрография. № 11, 2000. С. 133-137.
3. Кириллов, Н.О. Основные направления развития методов и средств мореходной астрономии. // Международный Балтийский морской форум. –т. 2, 2022. С. 49-56.
4. Аванесов, Г.А., А.А. Фарш, А.А., Бессонов, Р.В., Зоман, Я.Л., Кудели, М.И. Звездный координатор БОКЗ-М и перспективы его развития. // Материалы XIV Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. – СПб.: Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2007. 28 с.

5. Бессонов, Р.В., Белинская, Е.В., Брысин, Н.Н., Воронков, С.В., Куркина, А.Н., Форш, А.А. Звёздные датчики ориентации в астроинерциальных системах летательных аппаратов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 15, № 6, 2018. С. 9-20.

7. Аванесов Г.А., Р.В. Бессонов Р.В., А.Н. Куркина Р.В., М.Б. Людомирский М.Б., И.С. Катин И.С., Н.Е. Ямщиков Н.Е. Принципы построения астроинерциальной системы авиационного применения. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 10, № 2, 2013. С. 9-29.

8. <https://topwar.ru/77965-kret-razrabotal-sistemu-astronavigacii-dlya-tu-160.html> (дата обращения: 13.10.2024).

9. Костин В.Н., Лаврентьев А.В. О коррекции навигационных параметров при работе астронавигационной системы в инфракрасном диапазоне излучения // Навигация и гидрография. – № 49, 2017. С. 32–37.

APPLICATION OF SPACE TECHNOLOGIES TO CREATE A MARINE AUTOMATED ASTRONAVIGATION SYSTEM

Kirillov Nikolay Olegovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Navigation and Safety of Navigation

Baltic Fishing Fleet State Academy FSBEI HE "KSTU", Kaliningrad, Russia

The paper substantiates the increasing role and place of nautical astronomy in navigation. A brief history of the development of automated astronavigation systems in the domestic Navy is considered. The possibility of using space technologies in the form of astrovising devices based on CMOS matrices to create a marine astroinertial navigation system is considered. The experience of using these technologies to create an aviation astroinertial navigation system in the domestic military space forces is summarized. The general structure and operating principle of an experimental model of a marine astroinertial navigation system with a guidance and stabilization system under pitching conditions, presented by the Perm Scientific and Production Instrument-Making Company, are considered. The relevance and urgent need for the earliest possible organization of its serial production and equipping the fleet with it are shown.

КОЛЛЕКТИВНЫЕ СПАСАТЕЛЬНЫЕ СРЕДСТВА НА РЫБОПРОМЫСЛОВЫХ СУДАХ, ДИНАМИКА СТОИМОСТИ, ДОСТУПНОСТЬ, ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО РАЗВИТИЮ

¹Тимофеев Владимир Константинович, д-р воен. наук, профессор,
профессор кафедры СБМ Морского института

²Сирота Александр Константинович, капитан дальнего плавания,
доцент кафедры СБМ Морского института

^{1,2}Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ»,
Калининград, Россия, e-mail: tvkfpmp@mail.ru

Рыбопромысловые суда (РПС), использующие орудия лова, имеют специфическую форму корпуса, надстроек, размещение устройств на верхней палубе. Численность экипажа РПС значительно больше, чем у торговых. Это оказывает влияние на размещение, количество и виды коллективных спасательных средств. В статье, на примере аварийного случая, рассматривается использование коллективных спасательных средств РПС в штормовых условиях и факторы, влияющие на их развитие.

Цель исследования – провести анализ использования коллективных спасательных средств на РПС. Рассмотреть факторы, влияющие на укомплектование и размещение их на РПС. Сформулировать направления исследований в этой области.

1. Гибель рыболовного судна «ARGOS GEORGIA» в Атлантическом океане

24 июля 2024 г. рыболовное судно «Argos Georgia» под флагом острова Святой Елены (рис. 1) затонуло в районе Фолклендских островов (Южная Атлантика). На борту находилось 27 человек. 14 - было спасено, они находились на 2-х из 3-х имеющихся спасательных плотов (один плот не раскрылся), 8 - погибли, 5 пропали без вести.

Среди 27 человек, находившихся на борту судна, были 10 граждан Испании, 5 – Индонезии, 8 – России, 2 – Уругвая и 2 – Перу. Трое россиян погибли. Все в возрасте от 30 до 58 лет.

Причина – в результате сильного волнения, нарушилась водонепроницаемость корпуса и судно затонуло [1].



Рис. 1 Внешний вид рыболовного судна «Argos Georgia» с расположенными на палубе коллективными спасательными средствами

Метеоусловия: температура забортовой воды +4°C, высота волны 7 – 8 метров, сильный ветер. Судно построено в 2018 г. в Турции, длина - 53,85 метра, ширина – 13 метров. валовая вместимость - 2,004 тонн.

Для спасения членов экипажа использовали и спасательные плоты, в которых они находились до 20 часов. Плоты переворачивались, на волнении и людям приходилось забираться в них

вновь. Момент подхода судов участвующих в спасении показан на видео (// Электрон. дан. Режим доступа URL: <https://yandex.ru/video/preview/1578660707731819668> (дата обращения 10.09.2024)) (рисунки 2, 3).



Рис.2 Момент попытки подтянуть плот к борту судна-спасателя



Рис.3 Открытый люк спасательного плота

Выводы:

- штатные спасательные средства не в полной мере обеспечили безопасность членов экипажа (из 27 человек - 14 спасено, погибло 8 и пропало без вести 5 человек), один из 3-х спасательных плотов не раскрылся;
- спаслись в основном те люди, которые находились в 2-х спасательных плотках;
- использование спасательных плотов для спасения людей имело ряд негативных последствий
- плоты переворачивались на волнах; людям приходилось повторно забираться в них;
- за 20 часов нахождения в таких условиях наступало обессиление и переохлаждение:
- подтянуть спасательные плоты к борту спасательных судов и высадить людей, при ветре и волнении быстро не удавалось.

2. Факторы влияющие на укомплектование и размещение коллективных спасательных средств на рыбопромысловых судах

2.1 Международная конвенция по безопасности рыболовных судов

Торремолиноская (Испания) Международная конвенция по безопасности рыболовных судов 1977 г. дополненная в 2012 г. поправками, принятыми на Международной конференции в г. Кейптаун (ЮАР) (далее Конвенция).

Глава I «Общие положения» содержит:

- Правило 6 «Проверка и освидетельствование»;
- Правило 7 «Освидетельствования спасательных средств и прочего оборудования».
- Часть В «Требования к судну» содержит:
- Правило 5 «Количество и типы спасательных шлюпок и плотов и дежурных шлюпок»;
- Правило 6 «Готовность и размещение спасательных шлюпок и плотов и дежурных шлюпок»;
- Правило 7 «Посадка в спасательные шлюпки и плоты» и др.

Их содержание сводится к следующему:

1. Проверка и освидетельствование РПС производится организацией уполномоченной Правительством страны, в Российской Федерации – Российский Морской Регистр Судоходства (РС).
2. Период освидетельствования РПС не должен превышать 5 лет, с выдачей «Международного свидетельства о безопасности рыболовного судна»;
3. Ежегодное освидетельствование в пределах трех месяцев до или после каждой ежегодной даты Международного свидетельства о безопасности рыболовного судна.
4. Перед тем как одобрить спасательные средства и устройства, РС должен убедиться, что спасательные средства и устройства прошли все положенные испытания.
5. Каждое РПС (не зависимо от размеров) должно иметь как минимум 2 спасательные шлюпки. Далее перечисляются требования к количеству спасательных шлюпок и плотов для судов различной длины корпуса (от 12 до 24 метров, от 24 до 45 метров, от 45 до 75 метров и более 75 метров), деление судна на отсеки и его противопожарная защита.

При определении количества шлюпок и плотов на судне так же должно учитываться:

- предусмотрена ли возможность перемещения шлюпок и плотов с одного борта на другой борт в пределах одной палубы;
- при оставлении судна, каждая спасательная (дежурная) шлюпка должна собирать до 9 спасательных плотов;

Если расстояние от места спуска шлюпки до воды более 4,5 метра, должны быть предусмотрены дополнительные меры безопасности.

На основании проведенного анализа положений Конвенции и проектов рыбопромысловых судов АО «Нордик Инжиниринг» составлена таблица 1 [2, 3].

Таблица 1

Шлюпки и плоты на рыболовных судах

Длина судна от 12 до 24 метров	
1	Шлюпки и плоты должны вмещать до 150% людей на судне, на каждом борту.
2	Если плоты можно переместить с борта на борт, то количество плотов должно вмещать 100% людей на судне.
3	Если характер рейса и погодные условия благоприятны, то количество шлюпок и плотов должно обеспечивать размещение 50% экипажа, на каждом борту.
Длина судна от 24 до 45 метров	
1	Спасательные шлюпки и плоты должны вмещать 100% людей на борту судна.
2	При возможности перемещения спасательных плотов с борта на борт, их количество может отличаться от побортного.
3	В любом случае количество мест в спасательных средствах должно обеспечить посадку 200% количества людей на борту.
Длина судна от 45 до 75 метров	
1	Спасательные шлюпки и плоты должны вмещать 100% людей на борту судна.
Длина судна более 75 метров	
1	Спасательные шлюпки и плоты должны вмещать 100% людей на борту судна.
2	Если судно соответствует требованиям Конвенции в части деления на отсеки и противопожарной защите.

Ежемесячно, по графику, должна проводиться проверка состояния и укомплектование спасательных шлюпок и плотов. Результаты проверок заносятся в судовую журнал.

Вывод: количество коллективных спасательных средств на рыбопромысловых судах определяется Международной конвенцией по безопасности рыболовных судов 1977/2012г.г. и проектом данного судна который учитывает различные условия – от длины судна и его данных по делению на отсеки и уровня противопожарной защиты до условий работы судна в море. Но в любом случае РС должно иметь комплект коллективных спасательных средств, обеспечивающих посадку в них 100% или 200% членов экипажа в зависимости от расположения спасательных средств.

2.2 Сведения о современных рыбопромысловых судах РФ

По данным Ассоциации судовладельцев рыбопромыслового флота (АСРФ), в настоящее время строится 49 новых судов [4]. Данные о некоторых судах приведены ниже.

Супертраулер-процессоров (проект СТ 192), 11 судов, рисунок 4.



Технические характеристики:

Дедвейт 5 700 тонн

Длина 108,2 м

Ширина 21,0 м

Вместимость груз. трюмов 5 500 м³

Скорость полного хода 15 узлов

Экипаж 139 человек

Рис. 4. Супертраулер-процессоров проекта СТ 192

Крупнотоннажный траулер-процессор (проект 170701), 10 судов, рисунок 5.



Технические характеристики:

Длина 81,6 м
 Ширина 16,0 м
 Скорость 15 узлов
 Водоизмещение 5500 тонн
 Экипаж 80 человек

Рис. 5. Крупнотоннажный траулер-процессор проекта 170701

Краболов для добычи и перевозки живого краба (проект 571215), 13 судов, рисунок 6.



Технические характеристики:

Длина 57,70 м
 Ширина 12,60 м
 Скорость полного хода 12,6 узлов
 Экипаж 20-24 человек

Рис. 6. Краболов проекта 571215

Выводы:

- количество членов экипажа на крупнотоннажных рыбопромысловых судах, которые работают в открытом океане, около 100 и более человек;
- конфигурация надстроек на верхней палубе позволяет размещать коллективные спасательные средства, как правило, побортно;
- количество мест в спасательных средствах должно соответствовать 200% количеству экипажа (людей на борту судна);
- спасательные шлюпки свободного падения практически отсутствуют.

2.3 Экономические и внешне политические факторы

Стоимость спасательных средств для рыбопромысловых судов за последние 3 года повысилась, в среднем на 25% [3, 4]. Причины: прекращение поставок из «недружественных стран, за этим последовало подорожание параллельного импорта и увеличение расходов на логистику.

Спасательные плоты. В период с 2020г. по 2023г. отечественные производители подняли цены на 17% [4]. Повышение было вызвано изменением валютного курса и повышением расходов на логистику. В этот же период выпуск отечественных спасательных плотов снизился на 30%, что на фоне санкционных ограничений иностранных поставок создало предпосылки к возникновению ажиотажного спроса. У сервисных компаний и шипчандлеров Северо-Запада России повышение цен на спасательные плоты составил около 30%, а на Дальнем Востоке 50-70%.

Повышение цен на плоты из «недружественных» стран составило до 300% по наиболее востребованным позициям. Динамика цен на спасательные плоты приведена на рисунке 7.

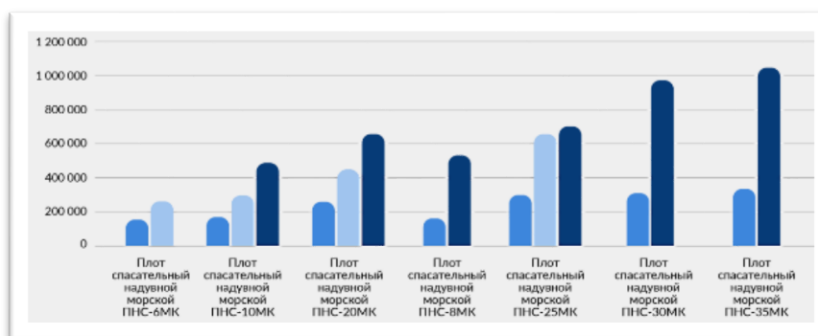


Рис. 7. Динамика цен на спасательные плоты, где

■ Цена РФ 2019
 ■ Цена РФ 2023
 ■ Цена импорт 2023

Дежурные шлюпки. В современных условиях, судовладельцы стремятся к замене более дорого импортного ассортимента на более дешёвую продукцию отечественных и китайских производителей. Это в какой-то степени, позволяет обеспечивать суда коллективными спасательными средствами. Однако и отечественные производители спасательных средств и производители из Китая тоже повышают цены на свою продукцию. Оно составило от 15 до 200% по отдельным видам. Однако по ряду позиций спасательного оборудования отмечено снижение его стоимости. Динамика цен на дежурные шлюпки представлена на рисунке 8.

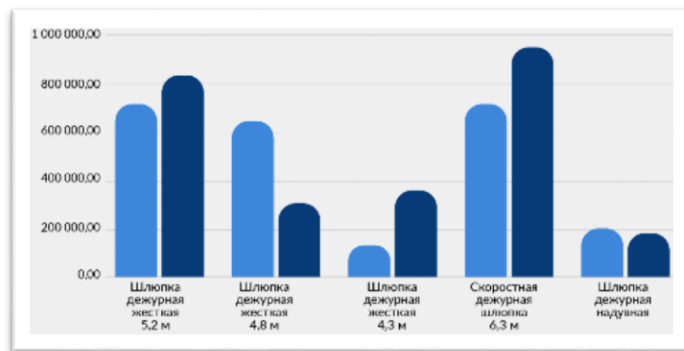


Рис. 8. Динамика цен на дежурные шлюпки, где: ■ 2021 ■ 2023

Так же произошло подорожание гидротермокостюмов, радиооборудования, аварийно-спасательного имущества, пиротехники и другого спасательного оборудования.

Средняя стоимость комплектования рыбопромысловых судов аварийно-спасательным оборудованием, в млн рублей на конец 2023 г. приведена на рисунке 9 [4].

Длина судна:	от 12м до 24м	от 24м до 45м	от 45м до 75м	свыше 75м
Экипаж в среднем	8	18	24	80
Состав оборудования				
Шлюпка дежурная с СПУ	-	1	1	1
Плоты спасательные	3хпсн10	2хпсн20	2хпсн25	6хпсн25
Круги спасательные	4	4	6	8
Жилеты спасательные	9	20	27	88
Гидротермокостюмы	8	8	12	80
Подъемное устройство	1	1		
Радиооборудование	1	1(2)	2	2
Пиротехника	1	1	1	1
АСИ	1	1	1	1
Стоимость комплекта оборудования на судно	1,2	5,7	8,1	12,3

Рис. 9. Средняя стоимость комплектации рыбопромыслового судна аварийно-спасательным оборудованием (млн рублей)

К выше рассмотренному необходимо добавить, что порой коммерческий интерес, вопросы «производственной необходимости» у судовладельцев превалируют над вопросами безопасности.

Таким образом, с учетом вышеизложенного можно констатировать что вопросы, связанные с использованием, размещением и комплектованием на рыбопромысловых судах средств коллективного аварийно-спасательного оборудования требуют внимательного разностороннего исследования.

История развития спасательных средств на судах содержит факты, когда прообраз спасательного круга, предложенного Леонардо да Винчи в конце XV века, был официально утвержден в качестве обязательного спасательного средства лишь в 1915 г.

3. Направления исследований в рассматриваемой области

1. Основные направления в сфере повышения безопасности людей при использовании коллективных аварийно-спасательных средств:

- безопасная посадка и высадка в/из спасательные шлюпки и плоты при сложных погодных условиях;
 - безопасное нахождение людей в спасательных шлюпках и плотях длительное время, в условиях, когда спасательные самолеты/вертолеты и суда не могут быстро оказать помощь.
2. Исследования в сфере, рационального использования пространств палубы или помещений рыбопромыслового судна, для безопасного хранения и использования необходимого комплекта коллективных спасательных средств. [5,6].
 3. Рассмотрение вариантов размещения на рыбопромысловых судах спасательной шлюпки свободного падения.
 4. В сфере размещения людей в спасательных шлюпках и плотях, с учетом нахождения в утепленной или защитной одежде и необходимости оказания первичной медицинской помощи.
 5. Модернизация, создание радионавигационного оборудования для коллективных спасательных средств рыбопромысловых судов.
 6. Разработка предложений по повышению эффективности обучения людей при использовании коллективных спасательных средств (демонстрационные материалы, видеофильмы и др.). Оборудование мест приема пищи на судах видео демонстрационными средствами для показа материалов по использованию спасательных средств.
 7. Анализ существующих и разработка проектов, новых материалов и средств отечественного производства материалах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Материалы о гибели судна // Электрон. дан. Режим доступа URL: <https://ria.ru/20240730/sudno-1962971005.html?ysclid=m0xqbjc31w838084430> (дата обращения 11.09.2024).
2. Торремолиноская Международной Конвенции по безопасности рыболовных судов 1977 г., измененная Кейптаунским соглашением 2012 г. // Электрон. дан. Режим доступа URL: <https://base.garant.ru/72902674/1cafb24d049dcd1e7707a22d98e9858f/> (дата обращения 06.09.2024).
3. Материалы судостроительной компании Нордик инжиниринг // Электрон. дан. Режим доступа URL: <https://nordic-kb.ru/analytics4> (дата обращения 06.09.2024).
4. Материалы Ассоциации судовладельцев рыбопромыслового флота (АСРФ) // Электрон. дан. Режим доступа URL: <https://fsarf.ru/analytics/spasatelnye-sredstva-dlya-rybopromyslovykh-sudov-dinamika-stoimosti-i-dostupnost> (дата обращения 06.09.2024).
5. Тимофеев, В.К., Сирота А.К., Киценко В.Н. / под общей редакцией Тимофеева В.К./ «Маневрирование и управление рыбопромысловым судном». Учебное пособие. Калининград: из-во БГАРФ, 2018, - 192 с.
6. Тимофеев, В.К., Гуральник, Б.С., Бураковский, П.Е. Обеспечение безопасности экипажей рыбопромысловых судов при работе в потенциально опасных районах Мирового океана. Монография. /под общ. редакцией Тимофеева В.К./ – Калининград: изд-во БГАРФ, 2020. – 153 с.

COLLECTIVE RESCUE FACILITIES ON FISHING VESSELS, COST DYNAMICS, ACCESSIBILITY, DEVELOPMENT PROPOSALS

¹Timofeev Vladimir Konstantinovich, Doctor of Military Sciences, Professor, professor of the department

²Sirota Alexander Konstantinovich, long-distance sailing captain, associate professor of the department

^{1,2} Baltic Fishing Fleet State Academy FSBEI HE "KSTU", Kaliningrad, Russia, e-mail: tvkfpmp@mail.ru

Fishing vessels (RPS) using fishing gear have a specific shape of the hull, superstructures, and placement of devices on the upper deck. The number of RPS crew is significantly larger than that of commercial ones. This has an impact on the placement, number and types of collective rescue equipment. The article, using the example of an emergency case, examines the use of collective rescue vehicles of the RPS in stormy conditions and the factors influencing their development.

УДК 629.7.085.27

**МЕХАНИКА И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СТАРТА БПЛА
ИЗ ТРАНСПОРТНО-ПУСКОВОГО КОНТЕЙНЕРА НА КОРАБЛЕ**

Давлюд Игорь Игоревич, канд. техн. наук, докторант

Балтийское высшее военно-морское училище им. адмирала Ф. Ф. Ушакова,
Калининград, Россия, e-mail: sawefew2@yandex.ru

Проведен анализ существующих устройств для хранения и старта беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Разработан облик контейнера для хранения и старта множества беспилотных летательных аппаратов, размещаемый в вертикальной пусковой установке корабля. Стартовое оборудование простое и не требует дефицитных элементов, проработана механика старта БПЛА. Такое решение не требует отдельного пространства на палубе или помещения в погребе корабля. Разработан математический аппарат расчета эксплуатационных характеристик БПЛА при их старте.

В настоящее время идет активная разработка, производство и применение безэкипажных систем военно-морскими силами различных государств. Анализ опыта военной операции в САР и специальной военной операции (СВО) на Украине показывает, что ведение современных боевых действий немислимо без применения беспилотных средств различного назначения. Особенно остро это ощущается в ВМФ: применение безэкипажных катеров (БЭК) в ходе проведения СВО изменило состав сил на Черном море [1].

Как показывает практика [1], одним из возможных решений гарантированно поражать БЭК, является применение ударных беспилотных летательных аппаратов-«камикадзе» (далее – БПЛА). В середине октября 2023 г. проведены успешные испытания таких БПЛА против малоразмерных моторных лодок [2].

Задача настоящего исследования заключается в разработке облика устройства для хранения и запуска БПЛА самолетного типа из вертикальных пусковых установок (ВПУ) кораблей, модели его функционирования, а также методики расчета основных эксплуатационных характеристик и параметров.

В настоящее время размещение БПЛА на кораблях затруднительно, в связи с отсутствием штатных для этого мест. Решение данного вопроса, в большинстве случаев связано с необходимостью значительного изменения внешней и внутренней архитектуры корабля [3]. Такой подход является неприемлемым для военного корабля, поскольку при этом возможны существенные изменения некоторых его эксплуатационных и технических характеристик. Таким образом, решение задачи хранения и взлета БПЛА должно сводиться к поиску иных способов, с применением специального средства, удовлетворяющего следующим основным требованиям:

- единый контейнер для всех типов БПЛА, форма и размер которого соответствует универсальному транспортно-пусковому контейнеру (ТПК) для имеемой ВПУ;
- все механизмы старта, аппаратура и иные вспомогательные узлы и агрегаты должны размещаться в ТПК;
- использование разработанного ТПК из штатной ВПУ.

Реализация вышеуказанных требований позволит решить проблему ограниченного пространства корабля и расширить область применения ВПУ.

Стоит отметить, что в подавляющем большинстве современных корабельных ракетных комплексов, ракеты содержатся в ТПК, которые размещены на кораблях в ВПУ. Применение ТПК позволяет снизить массу ракеты, повысить ее надежность и боеготовность, упростить операции по транспортировке, хранению и загрузке. ТПК обеспечивает:

- поддержание заданного режима температуры и влажности, контроль этих параметров на всех этапах эксплуатации;
- защиту ракет от всех видов атмосферных воздействий, пыли, солнечной радиации;
- защиту ракеты от механических повреждений;
- подготовку к старту и старт ракет.

Таким образом, выбор ТПК, как основы для разработки устройства хранения и старта БПЛА очевиден и обоснован.

В общем случае, ТПК представляет собой контейнер формы цилиндра или параллелепипеда, изготовленный из металла или композитных материалов, герметично закрытый с торцов защитными крышками. Передняя (верхняя) крышка выполнена разрушаемой (реже – с приводом открывания). Внутри ТПК находится все необходимое стартовое оборудование. Подключение к бортовой системе управления осуществляется через электроинформационный разъем, смонтированный на корпусе.

ТПК в составе стартового комплекса позволит создать для БПЛА наиболее благоприятные условия хранения, упростить многие технологические операции при подготовке к старту и старте БПЛА. Это дает возможность оптимизировать конструкцию различного оборудования, задействованного при подготовке к старту и непосредственно при старте БПЛА.

Анализ открытых источников, патентно-информационный поиск показал актуальность данной проблемы и некоторые варианты ее решения. Так, БПЛА типа RQ-4 Global Hawk, MQ-9 Reaper, MQ-1 Predator [4] поставляются в контейнерах. Однако старт данных БПЛА из контейнеров не предусмотрен – он предназначен только для транспортировки.

Немецкий концерн STN Atlas представил техническое решение контейнерного транспортирования, хранения и старта БПЛА типа KZO [5]. Контейнер размещается на колесном автомобильном шасси. Старт БПЛА осуществляется из наклонной контейнерной пусковой установки с помощью стартового ракетного двигателя. Однако такое решение обладает существенными недостатками: схема запуска стартового ракетного двигателя – проточная, т.е. открыты передняя и задняя крышки ТПК, что в условиях корабельного базирования и вертикального старта недопустимо; значительное время подготовки БПЛА к старту (до 30 минут), что снижает оперативность применения БПЛА и в ряде операций делает его бесполезным.

В 2022 году научно-производственная компания «Атри» представила военный БПЛА «Одуванчик», устойчивый к осадкам и порывам ветра [6]. Позже был продемонстрирован контейнер для его хранения и запуска, в том числе и морских носителей (рис. 1).



Рис. 1. БПЛА «Одуванчик» с контейнером для хранения и запуска

ТПК «Ампель» обеспечивает взлет и посадку БПЛА, заряд бортовых аккумуляторов, а также хранение в постоянной готовности к вылету. БПЛА, размещенный в ТПК «Ампель» может оснащаться различной нагрузкой для решения комплексных задач по наблюдению, обнаружению, выдаче целеуказания, постановки помех и уничтожения надводных целей.

Компанией AeroVironment был разработан контейнер для хранения и запуска дронов Switchblade (рис. 2).



Рис. 2. Размещение и пуск БПЛА Switchblade

По заявлениям производителя, представленные контейнеры можно размещать и эксплуатировать на кораблях [7].

Немецкая компания Rheinmetall, переоборудовала стандартный морской контейнер в мобильную пусковую установку для 126 БПЛА [8]. Предположительно, данную пусковую установку используют для БПЛА типа Hero-120, произведенный израильской компанией UVision (рис. 3).



Рис. 3. Немецкая пусковая установка для БПЛА

Данные БПЛА способны работать на дальностях до 60 км, оставаясь в воздухе до 60 мин и поражать цели как фугасными, так и бронебойными боевыми частями. Модульная конструкция пусковой установки дает возможность адаптировать количество ячеек под различные размеры контейнеров: от 3 до 12 метров в длину.

Помимо сухопутного применения, эксперты отмечают серьезный потенциал использования данной контейнерной пусковой установки и на кораблях (рис. 4). Барражирующие боеприпасы, развернутые с морских носителей, могут эффективно поражать корабли и суда противника.



Рис. 4. Пусковая установка для БПЛА, установленная на морском носителе

Однако все представленные выше решения лишены универсальности и не могут быть использованы в ВПУ кораблей, требуют определенного места для их размещения. Вместе с этим, данные контейнеры имеют весьма ограниченную емкость и плотность размещения (в ТПК «Ампель» вертикально размещается один БПЛА, в ТПК компания AeroVironment – шесть, но в наклонном положении), что снижает ударные возможности корабля.

Для использования множества БПЛА разработан ТПК, лишенный вышеуказанных недостатков. ТПК состоит из герметичного корпуса стандартного размера и формы для применения в ВПУ корабля. В верхней части корпуса установлена разрушаемая с помощью пиропатронов крышка. Вдоль всего корпуса, по центру, закреплена силовая балка с опорами на торцах и направляющими, обеспечивающими удержание при хранении и вертикальное движение БПЛА при старте (рис. 5). На направляющих установлены контактные группы для заряда бортовых аккумуляторов БПЛА, а также передачи полетной информации.

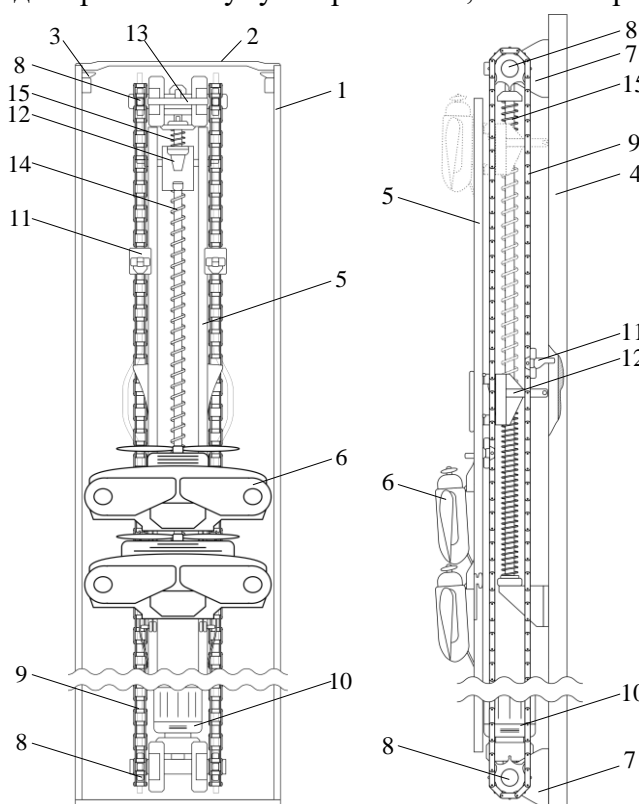


Рис. 5. Устройство ТПК для множества БПЛА: 1 – корпус ТПК; 2 – разрушаемая крышка; 3 – пиропатроны; 4 – силовая балка; 5 – направляющие; 6 – БПЛА; 7 – опора; 8 – цепной блок; 9 – цепь; 10 – электродвигатель; 11 – зацепы; 12 – каретка; 13 – спусковой механизм; 14 – пружина силовая; 15 – пружинный амортизатор

На опорах закреплены пара цепных блоков, через которые перекинуты пара замкнутых параллельных бесконечных цепи, движущихся синхронно с помощью электрического двигателя.

Работает ТПК следующим образом. При активации старта, на пиропатроны подается напряжение питания и они, срабатывая, разрушают переднюю крышку ТПК. Вместе с этим, подается питание на электрический двигатель, приводящий в движение цепь, на звеньях которой, равномерно по всей длине цепи, смонтированы зацепы (здесь и далее принимается пара зацепов, расположенных на параллельных цепях). Максимально возможное количество зацепов (m_{max}) определяется условием:

$$\begin{cases} z:l \\ m_{max} \leq \frac{2(H_{ТПК} - \Delta H_{ТПК1} - \Delta H_{ТПК2} - 2R) + 2\pi R}{z_{min}}, \\ z_{min} \geq \pi R + 2h_p + h_{\delta} \end{cases}, \quad (1)$$

где: z – расстояние между зацепами;

$H_{ТПК}$ – длина ТПК;

$\Delta H_{ТПК1}$ и $\Delta H_{ТПК2}$ – минимальное необходимое расстояние для нормальной работы сверху и снизу ТПК соответственно (зазоры);

R – радиус цепного барабана;

h_p – высота подвижной системы;

h_{δ} – высота нерабочей зоны сверху;

z_{min} – минимально-возможное расстояние между зацепами;

l – длина цепи ($l=2h+2\pi R=2(H_{ТПК}-\Delta H_{ТПК1}-\Delta H_{ТПК2}-2R)+2\pi R$).

При движении первого зацепа с точки начала движения (А на рис. 6), его опора входит в зацепление со штырями каретки, увлекая ее вниз по направляющей и сжимая пружину. В точке старта БПЛА (В на рис. 6) опора зацепа выходит из зацепления со штырями каретки и продолжает свободное движение. Каретка, достигнув верхней плоскостью спускового механизма, фиксируется на нем. При этом верхняя плоскость каретки упирается в упоры.

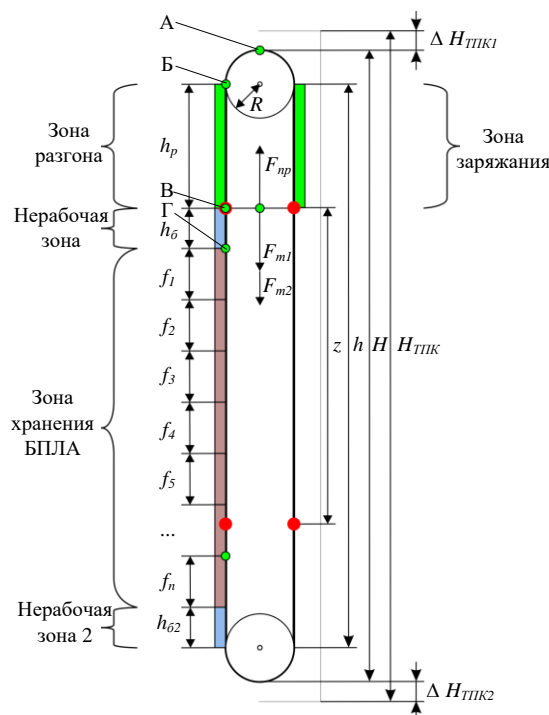


Рис. 6. Расчетная схема ТПК: А – точка начала движения цепи; Б – точка активации старта; В – точка старта БПЛА; Г – расположение первого БПЛА; h_p – высота подвижной системы; h_{δ} – высота нерабочей зоны сверху $h_{\delta 2}$ – высота нерабочей зоны снизу; f – длина БПЛА; z – расстояние между зацепами; h – длина прямолинейного участка цепи; H – расстояние между крайними блоками; $H_{ТПК}$ – высота ТПК; $\Delta H_{ТПК1}$ – зазор сверху ТПК; $\Delta H_{ТПК2}$ – зазор снизу ТПК; R – радиус цепных блоков; F_{np} – рабочее усилие сжатой пружины; F_{m1} , F_{m2} – силы тяжести БПЛА и каретки соответственно

Обогнув нижний цепной блок, зацеп движется вдоль направляющей вверх к первому (очередному) БПЛА (Г на фиг. 6). При начале движения БПЛА происходит разрушение удерживающего его штыря. Движение происходит до точки старта (В на фиг. 6), где находится каретка, на которую опускается БПЛА.

Двигаясь вверх, зацеп достигает точки активации старта (Б на фиг. 6) и поворачивает рычаг спускового механизма. Под действием силы энергии сжатой пружины (F_{np}) система БПЛА-каретка начинает разгон вверх по направляющей на разгонном участке (h_p). В динамике движения данной системы можно выделить две фазы. В первой фазе происходит разгон механически связанной системы БПЛА-каретка. Во второй фазе, по достижении кареткой пружинного амортизатора, начинается ее торможение, при этом происходит отделение БПЛА и его свободное движение вверх. Скорость БПЛА в момент отрыва от каретки определяется по формуле:

$$V_{старта} = \sqrt{\frac{(F_{np} - g(m_{БПЛА} + m_{каретка}))h_p}{m_{БПЛА} + m_{каретка}}}, \quad (2)$$

где: F_{np} – рабочее усилие сжатой пружины;
 g – ускорение свободного падения;
 $m_{БПЛА}$ – масса БПЛА;
 $m_{каретка}$ – масса каретки.

После отрыва БПЛА от каретки, на него действует только сила тяжести, поэтому максимальная высота выброса до полной остановки определяется:

$$H_{выб} = \frac{V_{старта}^2}{2g}. \quad (3)$$

Благодаря непрерывному движению цепи весь цикл повторяется. После старта последнего БПЛА, электрический двигатель останавливается. Время, необходимое, для старта всех БПЛА находится:

$$t_{ТПК} = \frac{z - \frac{\pi R}{2}}{V_{ТПК}} + (n-1) \frac{z}{V_{ТПК}}, \quad (4)$$

где: $V_{ТПК}$ – скорость движения цепи (линейная).

Максимальное количество (емкость) размещаемых БПЛА (n_{max}) определяется выражением:

$$n_{max} = 2 \frac{H_{ТПК} - \Delta H_{ТПК1} - \Delta H_{ТПК2} - 2R - h_p - h_{\delta} - h_{\delta2}}{f_n}, \quad (5)$$

где: $h_{\delta2}$ – высота нерабочей зоны снизу;
 f_n – длина БПЛА.

Полученное значение округляется с недостатком до целого: $n_{max} \approx n$.

Плотность размещения БПЛА (по занимаемой площади) в ТПК характеризуется коэффициентом плотности ($K_{плS}$) – количеством БПЛА на единицу площади ТПК и определяется по формуле:

$$K_{плS} = \frac{n}{S_{ТПК}}, \quad (6)$$

где: $S_{ТПК}$ – площадь поперечного сечения ТПК.

В ВПУ снаряженный ТПК находится в постоянной готовности к применению, без необходимости его обслуживания. Поскольку БПЛА одноразового действия, то их посадка не предусмотрена.

Для примера расчета основных эксплуатационных характеристик полученного устройства, приняты следующие значения основных параметров, указанные в таблице:

№ п/п	параметр	обозначение	значение	ед. измерения
1	высота ТПК	$H_{ТПК}$	8	м
2	Площадь поперечного сечения ТПК	$S_{ТПК}$	0,64	м ²
2	радиус цепного барабана	R	0,1	м
3	зазор	$\Delta H_{ТПК1,2}$	0,2	м
4	длина зоны разгона	h_p	1	м
5	длина БПЛА	f	0,3	м
6	масса БПЛА	$m_{БПЛА}$	5	кг
7	масса каретки	$m_{кар}$	2	кг
8	скорость движения цепи	$V_{БПЛА}$	2	м/с
9	высота буфера	h_b	0,2	м
10	высота буфера 2	h_{b2}	0,1	м
11	рабочее усилие сжатой пружины	F_{np}	4000	Н

По формулам (2-6), рассчитаны и получены следующие значения:

- емкость ТПК: $n=42$ шт.;
- время старта всех БПЛА: $t_{ТПК}=27,6$ с;
- начальная скорость БПЛА: $V_{старта}=33,5$ м/с;
- максимальная высота выброса БПЛА катапультной ТПК: $H_{выб}=57,3$ м;
- плотность размещения по площади: $K_{плс}=70$ ед;

Таким образом, разработанный ТПК, приспособлен к использованию в ВПУ корабля без каких либо доработок последней. При этом, ТПК обладает большой емкостью и плотностью размещения БПЛА на корабле. Габариты полученного ТПК, элементы крепления и внешний вид идентичны с ТПК для ракет, чем достигается универсальность применения и скрытность используемого вооружения от средств разведки противника.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимохин, А Борьба с безэкипажными катерами / А. Тимохин // Обзорение армии и флота. – 2024. – № 1. – С. 18-26
2. С корабля на бой: ВМФ получит морскую версию беспилотника-камикадзе // Электрон. дан. Режим доступа URL: <https://iz.ru/1661751/aleksei-mikhailov-roman-kretcul-vladimir-matveev/s-korablia-na-boi-vmf-poluchit-morskuiu-versiiu-bespilotnika-kamikadze> Известия» (дата обращения 17.05.2024)
3. Соловьев, В.В. Судовые взлетные и посадочные устройства беспилотных летательных аппаратов / В.В. Соловьев, С.Н. Шаров // Морской вестник. – 2015. - №1(53). – С. 65-69
4. Фетисов, В.С. Беспилотная авиация: терминология, классификация, современное состояние / В.С. Фетисов, В.В. Адамовский и др. // Photon. – 2014. – С. 21-23
5. Справочное пособие «Беспилотные летательные аппараты». – Воронеж: Научная книга, 2015. – 185 с.
6. В России представили устойчивый к осадкам дрон «Одуванчик» // Электрон. дан. Режим доступа URL: <https://lenta.ru/news/2022/08/19/bpla/> (дата обращения 17.05.2024)
7. AeroVironment // Электрон. дан. Режим доступа URL: <https://www.avinc.com/lms/switchblade> (дата обращения 17.05.2024)
8. Германия превратила контейнер в стартовую площадку для 126 БПЛА-смертников // Электрон. дан. Режим доступа URL: <https://www.vietnam.vn/ru/duc-thiet-ke-thung-container-thanh-be-phong-126-uav-tu-sat> (дата обращения 17.05.2024)

MECHANICS AND MATHEMATICAL MODEL OF LAUNCHING A UAV FROM A TRANSPORT AND LAUNCH CONTAINER ON A SHIP

Dawlyud Igor Igorevich, Candidate of Science (Technical), doctoral student

Baltic Higher Naval College named after Admiral F. F. Ushakov,
Kaliningrad, Russia, e-mail: sawefew2@yandex.ru

The article analyzes existing devices for storing and launching unmanned aerial vehicles (UAVs). A container has been developed for storing and launching a variety of unmanned aerial vehicles, placed in a vertical launcher of a ship. The launch equipment is simple and does not require scarce elements; the UAV launch mechanics have been worked out. This solution does not require separate space on deck or space in the ship's cellar. A mathematical apparatus has been developed for calculating the operational characteristics of UAVs during their launch.

ВЛИЯНИЕ ФЛЮСОВ НА СОДЕРЖАНИЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В СВАРНЫХ ШВАХ ПРИ СВАРКЕ СУДОСТРОИТЕЛЬНЫХ СТАЛЕЙ АВТОМАТИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

Игушев Валерий Федорович, канд. техн. наук, доцент

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

Исследовано воздействие состава флюса на сварку низколегированных сталей и их влияние на содержание кислородосодержащих включений в металле сварного шва.

Использование окислительных флюсов обеспечивающих хорошее формирование шва, приводит к увеличению содержания включений в виде окислов раскисляющих элементов и снижению механических свойств металла шва. Негативное влияние окислительных флюсов на содержание кислородосодержащих включений можно снизить с помощью специальной добавки, содержащей углерод.

Многочисленные факторы определяют интенсивность и характер коррозионного поражения сварных соединений в машиностроении и судостроении, их можно подразделить на внутренние и внешние. К внутренним факторам коррозии сварных швов относятся химический состав сварных швов. Содержание легирующих элементов, углерода и примесей напрямую влияют на коррозионную стойкость металла швов. Неравномерное распределение элементов или наличие вредных примесей может снизить устойчивость к коррозии. Также поры, трещины и шлаковые включения нарушают целостность металла и создают благоприятные условия для коррозии. Остаточные напряжения в металле швов также могут способствовать развитию коррозионного растрескивания. Внешние факторы коррозии сварных швов включают скорость движения жидкости. Высокие скорости потока могут усилить коррозию за счет механической эрозии защитных окисных пленок. Повышение температуры ускоряет коррозионные процессы.

Коррозионная стойкость металла шва зависит от химического состава металла. Повысить коррозионную стойкость можно при обеспечении равенства или незначительное превышение электродного потенциала металла шва по сравнению с основным металлом. При отрицательном электродном потенциале происходит интенсивное разрушение металла шва, а при положительном потенциале происходит разрушение зоны термического влияния [1].

Коррозионная стойкость и механические свойства сварных швов зависят от состава металла и от содержания неметаллических включений и газов. Наличие неметаллических включений в структуре сварного шва негативно сказывается на его пластичности и ударной вязкости. Высокое содержание неметаллических включений, в частности оксидов и сульфидов приводит к образованию хрупких участков, снижая прочность и пластичность металла.

Низкие значения ударной вязкости характерны для швов, выполненных под высокоактивными окислительными флюсами. Это связано с повышенным содержанием кислорода (до 0,40%).

Кислород в сварных швах влияет на его механические свойства и коррозионную стойкость. Кислород образует в металле шва оксиды, которые являются катодами по отношению к основному металлу, что приводит к интенсивному коррозионному разрушению. Снижение содержания кислорода в металле шва можно достичь путем применения низкоуглеродистой присадочной проволоки и слабоокислительных флюсов. Эти флюсы редко применяются для сварки низколегированных сталей, так как имеют плохие сварочно-технологические свойства.

Дефекты в сварных швах, такие как поры, трещины, шлаковые включения также снижают коррозионную стойкость. Поры и трещины являются местами концентрации напряжений. Коррозионную стойкость сварных швов можно повысить используя простые приемы. Такие как тщательный контроль качества сварки, не допускать дефектов и следить за соблюдением технологических режимов сварки.

Остановимся более подробно на влиянии неметаллических включений в металле шва на механические свойства сварных соединений из низколегированных сталей.

Неметаллические включения в сварных швах влияют на процесс кристаллизации, величину зерна, структуру и, как следствие, на механические свойства сварных соединений. Их воздействие обусловлено не только количественным содержанием, но и химическим составом. Увеличение среднего размера включений и их относительной площади приводит к ухудшению механических свойств металла шва. Напротив, повышение доли округлых включений и уменьшение их размера улучшают эти свойства.

Шаровидная форма является наиболее благоприятной, так как снижает концентрацию напряжений. Включения угловатой формы, особенно тугоплавкие, негативно сказываются на ударной вязкости и пластичности. Алумосиликаты угловатой формы оказывают более выраженное отрицательное влияние, чем включения шаровидной формы, такие как оксиды кремния и марганца.

Кислород является важным фактором, влияющим на ударную вязкость сварных соединений. Снижение содержания кислорода приводит к повышению механических свойств и ударной вязкости. Однако, при содержании кислорода менее 0,02% ударная вязкость может незначительно снизиться. Это обусловлено различными факторами, включая характер и форму образующихся сульфидных включений и легкоплавких эвтектик [2]. В присутствии взвешенных частиц оксидов и карбидов в сварочной ванне сера выделяется из расплава раньше, образуя сложные окси- и карбосульфидные включения. При отсутствии этих частиц выделение серы происходит на более поздних стадиях кристаллизации, приводя к образованию цепочек железомарганцевых сульфидов. Такие включения более хрупкие и снижают ударную вязкость металла шва.

Кроме того, кислород в металле шва способствует снижению содержания водорода. В сварке для борьбы с водородом используется специально процесс окисления металла в зоне дуги для предотвращения поглощения водорода металлом.

При низком содержании кислорода и, следовательно, оксидных включений содержание водорода в металле шва увеличивается. Водород в металле может привести к образованию холодных микротрещин и к снижению стойкости металла шва к хрупкому разрушению и снижению коррозионной стойкости металла шва. Известно также, что уменьшение количества неметаллических включений задерживает структурные превращения аустенита в феррит, что приводит к образованию низкотемпературных неравновесных структур.

Микроструктура сварных швов низколегированных сталей с пониженным содержанием кислорода характеризуется ферритной матрицей с игольчатым строением при концентрации кислорода менее 0,02%. При увеличении содержания кислорода в металле шва образуются более равновесные структуры.

Кислород влияет на структуру и свойства металла сварного шва. Влияние зависит от ряда факторов: технологии сварки, состава сварочных материалов, вида легирующих элементов, содержания неметаллических включений. Повышение содержания кислорода в металле шва приводит к укрупнению зерна феррита, уменьшению пластичности и прочности, снижению ударной вязкости.

Однако чрезмерное снижение кислорода также может негативно сказаться на свойствах металла шва, уменьшению коррозионной стойкости. Оптимальное содержание кислорода в металле сварных швов низколегированных сталей составляет 0,02 – 0,03%, что соответствует содержанию неметаллических включений около 0,045 – 0,065%.

Низколегированные стали более чувствительны к содержанию кислорода по сравнению с низкоуглеродистыми. Увеличение содержания легирующих добавок приводит к пропорциональному увеличению чувствительности к содержанию кислорода. Следовательно, структура и свойства сварных швов низколегированных сталей зависят от комплекса взаимодействия различных факторов, включая содержание кислорода, состава сварочных материалов, системы легирования. Для получения оптимальных свойств сварных швов необходимо сбалансировать эти факторы учитывая конкретные условия сварки и требования к изделию.

Первоначально провели исследования существующих флюсовых композиций, которые часто используются с низколегированной сварочной проволокой Св-08ГА при сварке металлоконструкций из низколегированных сталей. Для повышения качества сварных швов на следующем этапе разработали специальную углеродфтористую добавку, включающую в себя пыль электрофильтров алюминиевого производства. Химический состав добавки: %: $Al_2O_3 = 21-46$; $F^+ = 18-27$; $Na_2O = 8-15$; $K_2O = 0,4-6$; $CaO = 0,7-2,3$; $SiO_2 = 0,5-2,5$; $Fe_2O_3 = 2,1-3,3$; $C_{общ} = 12,5-30,2$; $MnO = 0,07-0,9$; $MgO = 0,06-0,9$; $S = 0,09-0,19$; $P = 0,10-0,18$.

Предлагаемая композиция обладает рядом преимуществ, связанных с обработкой жидкого металла. Углеродфтористая добавка, по видимому, поможет удалять кислород в виде углекислого газа (CO_2) и оксида углерода (CO), образующихся при взаимодействии фтористого углерода (CF_x) с растворенным в стали кислородом. Большая часть углерода взаимодействует с кислородом в жидком металле и удаляется из металла в газообразном виде при кристаллизации. Некоторая часть углерода растворяется в металле и науглероживает металл. Помимо удаления кислорода происходит дополнительно связывание водорода с фтором с образованием соединения HF , которое не растворяется в металле и удаляется из металла. Таким образом достигается эффективное удаление водорода из стали. Данные добавки способствуют улучшению процесса обработки жидкого металла, предотвращая нежелательное науглероживание и уменьшает содержание водорода в шве, что благоприятно сказывается на качестве сварного соединения.

Механические свойства сварных швов, особенно их вязкость, существенно определяются составом применяемого сварочного флюса и оптимально подобранным режимом сварки. При сварке низколегированных сталей наибольшее распространение получили флюсы окислительного типа. Флюс АН-348А (ГОСТ-9087-81) содержит большое количество окислов кремния и марганца и обеспечивает сварные швы высокой прочностью и вязкостью и предназначен для сварки низколегированных сталей. Флюс АН-47 (ГОСТ Р52222-2004) содержит меньшее количество окислов кремния и марганца и рекомендуется для сварки конструкций из углеродистых и низколегированных сталей включая сварку конструкций стальных мостов. Флюс АН-60 (ГОСТ Р52222-2004) является универсальным и рекомендован для сварки нелегированных углеродистых и низколегированных сталей и обеспечивает удовлетворительные механические свойства сварных швов.

Продвижение технологии сварки низколегированных сталей требует тщательного изучения влияния различных сварочных материалов на характеристики сварного шва. В рамках данного исследования провели эксперименты по оценке влияния сварочных флюсов АН-348А, АН-47 и АН-60 на процесс сварки и качество получаемого сварного шва. Сварочные работы велись автоматическим способом с использованием судостроительной стали марки D40S. Образцы представляли собой стыковые соединения без зазора и разделки кромок. Свара осуществлялась сварочной проволокой Св-08ГА под различными флюсами, после чего производилась оценка внешнего вида полученных сварных швов.

При визуальном осмотре швы соответствовали требуемым характеристикам. После тщательного анализа внешнего вида и глубины проплавления сварного шва предпочтение отдано стекловидному флюсу марки АН-348А. Широкое применение этого флюса в строительстве и судостроении обусловлено его превосходными свойствами. Флюс АН-348А обеспечивает стабильную сварочную дугу, качественное формирование шва, также снижает склонность металла шва к образованию пор и трещин. Но высокое содержание окислов кремния и марганца приводит к интенсификации окислительно-восстановительных процессов, способствующих повышению содержания кислорода в швах до 0,06% [2]. Это может привести к формированию оксидных неметаллических включений.

Для минимизации этих негативных эффектов необходимо оптимизировать параметры сварки и состав применяемых металлов и флюсов. Дополнительные исследования показали, что применение легированной проволоки, содержащей элементы раскислители, такие как кремний и марганец может существенно снизить содержание кислорода.

Уменьшить влияние окислов кремния и марганца на загрязненность металла неметаллическими включениями можно путем снижения степени протекания окислительных и раскислительных процессов с использованием углеродфтористой добавки.

На втором этапе в работе были проведены дополнительные испытания на образцах из стали D40S толщиной 18 мм. Образцы собирали встык без зазора и разделки кромок. Сварка выполнялась автоматическим способом проволокой Св-08ГА под флюсом АН-348А с углеродфтористой добавкой. Раскисление металла шва с использованием кремния, марганца и других элементов приводит к образованию оксидных включений в металле шва, которые не успевают всплыть при кристаллизации и могут оказывать негативное влияние на механические свойства сварного соединения. Для уменьшения скорости образования оксидных включений в работе использовали добавку во флюс для связывания избыточного кислорода в газообразную фазу в зоне высоких температур, когда окислы кремния и марганца имеют малое сродство к кислороду и окисляют металл.

Углеродфтористая добавка во флюс в количестве 5% позволяет несколько изменить состав флюса. Изменения во флюсе АН-348А привели к увеличению содержания Fe₂O₃, Na₂O, F, С, и снижению содержания MnO и SiO₂.

В таблице 1 приведен химический состав сварного шва, полученного при автоматической сварке стали D40S под флюсом АН-348А с углеродфтористой добавкой в количестве 5%. Такие добавки могут обеспечить содержание углерода в сварном шве, аналогичное исходному содержанию в основном металле, не вызывая при этом образования структур закалки. На рисунке 1. представлена микроструктура сварного шва, полученная при сварке стали D40S сварочной проволокой Св-08ГА под флюсом АН-348А с углеродфтористой добавкой. Структура представляет собой мелкозернистый ферритоперлит без признаков закалки.

Таблица 1

Химический состав сварного шва

	С	Si	Mn	Al	S	P
Основной металл D40S	0,12	0,95	0,79	0,03	0,018	0,019
Флюс АН -348А + 5% добавки						
Сварной шов	0,13	0,98	0,85	0,02	0,021	0,019

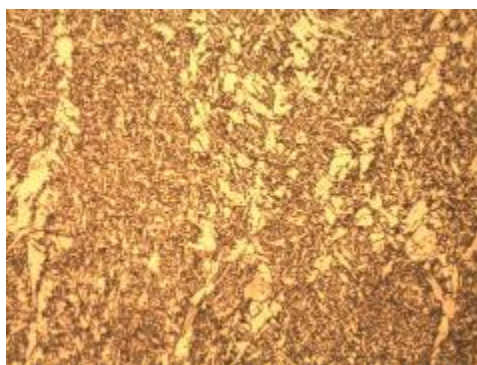


Рис. 1. Микроструктура сварного шва, выполненного сварочной проволокой Св-08ГА, ×500

Массовая доля кислорода в сварном шве с углеродфторсодержащей добавкой в количестве 5% уменьшилась по сравнению с кислородом в шве, полученным под флюсом без добавки с 0,053% до 0,032%. Фракционный газовый анализ показал, количество алюминатов и алюмосиликатов в сварных швах практически не изменился.

Для определения механических свойств и ударной вязкости сварных соединений использовали стандартные методики испытаний. Проведенные испытания показали, что механические свойства и ударная вязкость сварных швов без разделки кромок превосходили нормативные требования (Таблица 2). Это свидетельствует о высоком качестве и надежности сварных соединений.

Таблица 2

Механические свойства и ударная вязкость металла шва, выполненного под разными флюсами

Объект	Механические свойства		Ударная вязкость, Дж/см ² при T= -40°С
	Временное сопротивление, МПа	Предел текучести, МПа	
Сварной шов; сварка под флюсом			Св.шов, КСУ
АН-348А	535	390	70
АН-348А+5% добавки	565	420	126

В работе исследовалась склонность металла сварного шва к коррозии косвенным методом, предложенным ранее [4]. В данном исследовании сравнивали сварные швы, полученные при сварке под флюсом АН-348А без добавки и с добавкой. Хотя химический состав металла швов, выполненных под флюсом АН-348А без добавки и с углеродфторсодержащей добавкой был примерно одинаковым, содержание неметаллических включений различалось. Разница электрических потенциалов основного металла и сварного шва была меньше в случае шва с меньшим содержанием неметаллических включений, что должно способствовать повышению коррозионной стойкости.

Вывод. Использование углеродфтористой добавки в окислительный флюс марки АН-348А способствует уменьшению содержания кислородосодержащих неметаллических включений в сварном шве. При сварке под флюсом с добавкой можно получать сварные швы с повышенными значениями механических свойств и, особенно ударной вязкости и повышенной коррозионной стойкостью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев С.А. Основы сварки судовых конструкций. /Андреев С.А., Головченко В.С., Горбач В.Д., Руссо В.Л. СПб: Судостроение, 2006 – 552с.
2. Грабин В.Ф. Металловедение сварки плавлением. Киев: Наукова думка, 1982. 416с.
3. Потапов Н.Н. Основы выбора сварочных флюсов при сварке сталей. М.: Машиностроение, 1989. 168с.
4. Веревкин В.И., Игушев В.Ф., Терюшева С.А. //Морские интеллектуальные технологии. Повышение стойкости к коррозии судовых металлоконструкций. 4 (38) Т.2 2017. С.69-75.

THE EFFECT OF FLUXES ON THE OXYGEN CONTENT IN THE WELDING SEAMS OF SHIPBUILDING STEELS BY AUTOMATIC METHOD

Igushev Valery Fedorovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Baltic Fishing Fleet State Academy FSBEI HE "KSTU", Kaliningrad, Russia,
e-mail: igushev.vf@bgarf.ru

The work investigates the effect of the flux composition on welding of low-alloy steels and their effect on the content of oxygen-containing inclusions in the weld metal.

The use of oxidizing fluxes that ensure good formation of the seam leads to an increase in the content of inclusions in the form of oxides of deoxidizing elements and a decrease in the mechanical properties of the seam metal. The negative effect of oxidizing fluxes on the content of oxygen-containing inclusions can be reduced by using a special additive containing carbon.

СПОСОБЫ БОРЬБЫ С ОБЛЕДЕНЕНИЕМ БАЛЛАСТНЫХ СУДОВЫХ ЦИСТЕРН

¹Кудинович Игорь Владиславович, д-р техн. наук, доцент,
начальник отдела, заместитель начальника отделения

²Сыралева Мария Николаевна, ведущий инженер

^{1,2}ФГУП «Крыловский государственный научный центр»,
Санкт-Петербург, Россия, e-mail: M_Syralyova@ksrc.ru

При эксплуатации судов в арктическом регионе возможно замерзание воды в балластных цистернах, соприкасающихся с наружным холодным воздухом, что может нарушить работу балластной системы судна из-за обмерзания приемно-сливных труб и клапанов. В мировой практике судостроения для борьбы с этим явлением применяются различные методы, такие как система барботажа (впрыск воздушных или паровых пузырьков), система подогревающих змеевиков и система циркуляции воды. Представлена качественная оценка противообледенительных методов и проведено исследование эффективности методов подогрева воды и увеличение интенсивности циркуляции воды внутри цистерны (впрыск пузырьков воздуха, принудительная циркуляция воды).

Введение

При эксплуатации судов в регионах с экстремально низкими температурами заборного воздуха, к которым относится арктическая зона Российской Федерации и Северный морской путь, возможно замерзание балласта в корпусных цистернах, что может негативно сказаться на работе балластной системы судна. Маловероятно, что балластная цистерна замерзнет полностью, поскольку лед действует как дополнительная теплоизоляция. Однако проблемы во время приемки судном перевозимых грузов, вследствие невозможности оперативно выгрузить образовавшийся в цистернах лед приведет к снижению грузоподъемности судна.

Балластная вода в бортовых цистернах выступающих над ватерлинией начнет замерзать в верхней части и с боковых поверхностей, непосредственно контактирующих с холодным заборным воздухом. Степень замерзания и толщина нарастающего льда будет зависеть от солёности водяного балласта и температуры окружающего воздуха за бортом.

В соответствии с российским регистром судоходства [1], на ледаколах и судах ледовых классов Arc4 – Arc9 форпик, ахтерпик и бортовые цистерны в составе корпуса, предназначенные для воды и расположенные выше ватерлинии, а также в районе грузовых трюмов, должны оборудоваться системой обогрева. Однако, в документах зарубежных классификационных обществ, регламентирующих постройку и эксплуатацию судов, предназначенных для работы в регионах с отрицательными температурами воздуха, содержатся и другие способы по борьбе с обледенением воды в балластных цистернах.

В Руководстве по правилам контроля и управления балластными водами Канады [2], чтобы снизить риск замерзания водяного балласта рекомендованы следующие меры:

- минимизация количества балластной воды, которая находится над ватерлинией;
- установка системы воздушного барботажа, которая помогает предотвратить ледообразование и может быть использована при температурах до -30 °С;
- использование нагревателей или средств рециркуляции воды.

Согласно нормативам Germanic Lloyd, все балластные цистерны на судах ледового класса должны быть оснащены системой впрыскивания пузырьков воздуха, которые позволяют воде циркулировать, что предотвращает замерзание.

Корейский институт океанологии [3] предлагает устанавливать на суда балластную систему, сразу оснащенную устройством для подачи микропузырьков в нижний слой воды в цистерне. Этот метод позволяет предотвратить замерзание воды в судовых цистернах без установки дополнительной системы подогрева [4]. Для повышения эффективности можно дополнительно подогревать впрыскиваемый воздух или использовать пар, отбираемый из паровой магистрали [5].

Согласно китайским правилам постройки и классификации судов [6], для судов, эксплуатирующихся при отрицательных температурах наружного воздуха, рекомендуются следующие системы защиты от замерзания: система рекуперативного обогрева, система циркуляции балластной воды, и система воздушного барботажа (см. рис. 1).

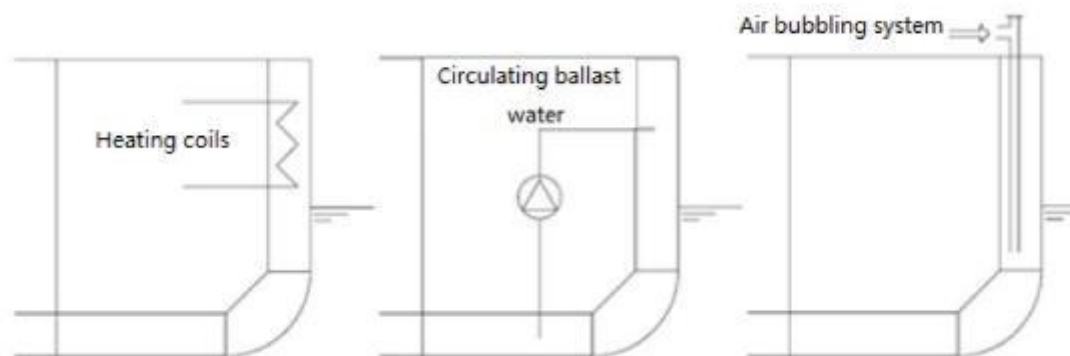


Рис. 1. Системы для борьбы с замерзанием воды в балластных цистернах

Очевидно, что метод нагрева наиболее энергоемкий. В тоже время, преимуществами установки системы подогрева является возможность регулирования температурного режима, простые отработанные технологии.

Циркуляция воды считается эффективной альтернативой системам подогрева, так как позволяет организовать водообмен между водой со дна цистерны, которая находится при температуре выше замерзания, и водой на поверхности балластной цистерны. Эта система требует значительных изменений конструкции балластных систем (установка комплекса насосов, обеспечивающих необходимую циркуляцию).

Система барботирования воздуха обеспечивает защиту от замерзания за счет постоянной циркуляции воды. Однако низкая температура в конечном счете неизбежно приводит к замерзанию в определенных частях цистерны. Этот метод также имеет недостаток, связанный с возможным переохлаждением воды и образованием кристаллов льда (балластная вода, содержащая кристаллы льда, имеет кашеобразную консистенцию, которую трудно перекачивать).

Целью данной статьи является сравнительный анализ энергоэффективности способов борьбы с обледенением балластных цистерн.

1. Качественная оценка способа обогрева и системы воздушного барботажа

Для качественной оценки методов защиты от замерзания балластных цистерн использовались следующие допущения (обоснованные в статьях [7, 8]):

1. слой льда образуется на всей внутренней поверхности балластной цистерны, граничащей с наружным воздухом;
2. толщина льда неравномерна по высоте стенки цистерны;
3. предельная толщина льда достигается в верхней части поверхности балластной цистерны и обеспечивается заданным тепловым потоком на поверхности (q_{ice}).

Система воздушного барботажа должна обеспечивать тот же тепловой поток на поверхности, что и система подогрева отсюда следует равенство:

$$\frac{\alpha_{conv}}{\alpha_{bubbling}} = \frac{\Delta T_{conv}}{\Delta T_{bubbling}},$$

где α_{conv} , $\alpha_{bubbling}$ - коэффициенты теплоотдачи на поверхности льда при свободной конвекции для систем подогрева и вынужденной конвекции для системы барботажа соответственно; разность температур при свободной конвекции $\Delta T_{conv} = T_{water} - T_{ice}$, T_{water} - температура нагреваемой воды, T_{ice} - температура замерзания морской воды; разность температур при вынужденной конвекции $\Delta T_{bubbling} = T_{sea} - T_{ice}$, T_{sea} - температура моря в районе плавания судна.

В работе [9] показано, что коэффициент теплоотдачи при воздушном барботаже асимптотически не превышает $\alpha_{bubbling}^{max} = 5000 \text{ W}/(\text{m}^2\text{C})$.

Как видно из рис. 2, минимальная разница температур в Баренцевом море составляет:

$$\Delta T_{bubbling}^{min} = 0,2 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

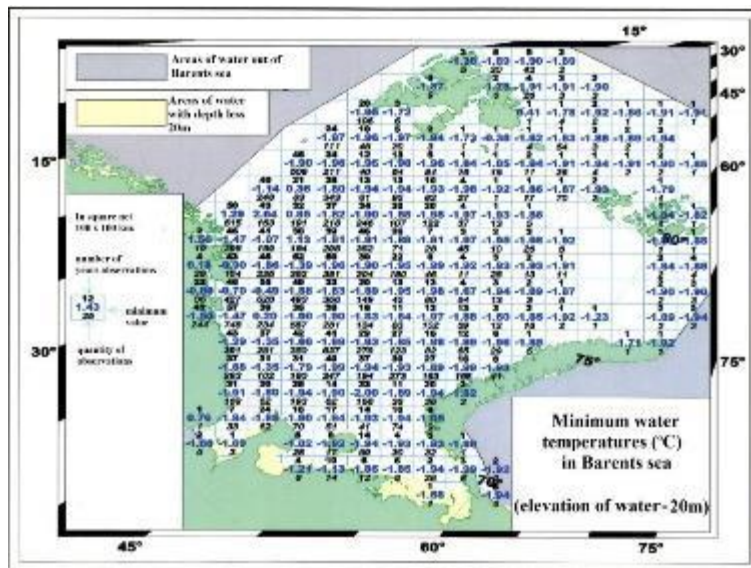


Рис. 2. Минимальные температуры воды в Баренцевом море

Зависимость теплового потока на поверхности льда (при толщине льда не более 0,1 м) от температуры наружного воздуха показана на рис.3. Как следует из рис.3, использование системы воздушного барботажа имеет ограничение по температуре наружного воздуха.

Таким образом, на основании качественной оценки можно сделать следующий вывод: системы отопления и барботажа конкурентоспособны в диапазоне температур наружного воздуха до минус 30° С, однако в экстремальных условиях системы отопления более эффективны и надежны.

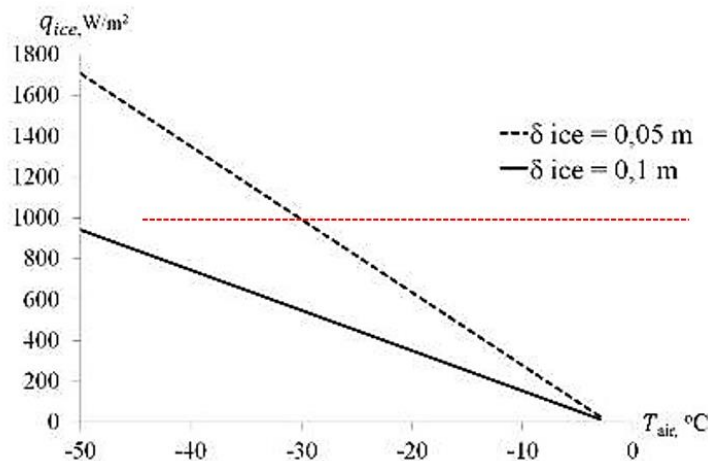
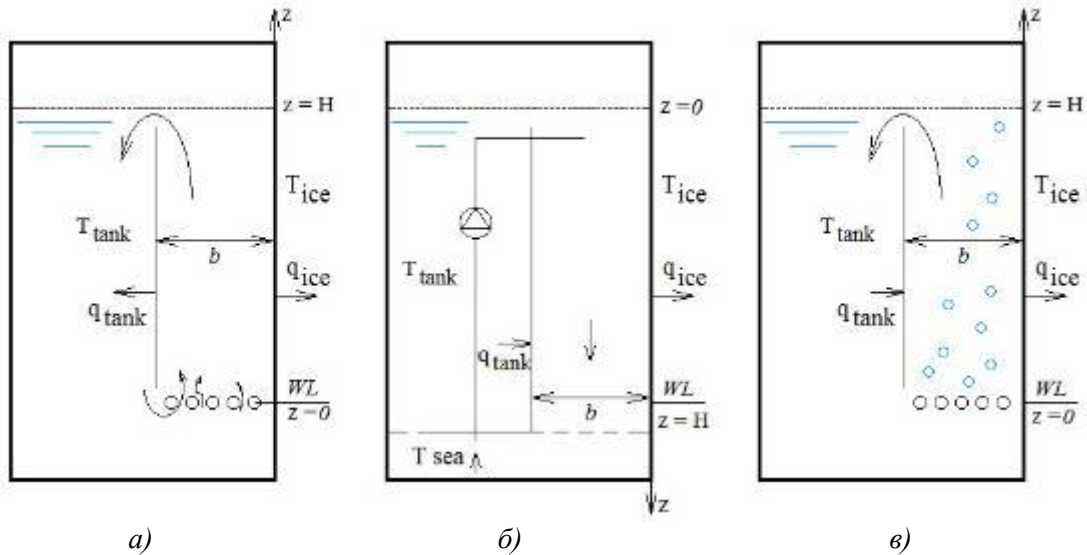


Рис. 3. Зависимость теплового потока на поверхности льда от температуры наружного воздуха

2. Методики расчета противообледенительных систем

Рассмотрены следующие системы защиты от замерзания балластных цистерн при эксплуатации при отрицательных температурах наружного воздуха: система подогрева, система циркуляции балластной воды, и система воздушного барботажа (см. рис. 4). Образование льда на охлаждаемых поверхностях, граничащих с наружной обшивкой судна, определяется процессами конвективной (Рис. 4а) и вынужденной конвекции (Рис. 4б, 4в).



а) б) в)
 Рис. 4. Расчетные модели для противообледенительных систем

(а - система подогрева, б - система циркуляции балластной воды, в - система барботирования воздуха)

Основными регулирующими параметрами, определяющими толщину льда, являются: мощность нагрева $N_{heating}$ в случае системы подогрева; расход циркуляционного насоса G_w для системы циркуляции балластных вод; расход воздуха G_{air} в случае барботажной системы.

Энергоэффективность систем защиты от замерзания определяется следующими характеристиками: $N_{heating}$ для системы подогрева; мощность, необходимая для циркуляции воды $N_{friction}$ для системы циркуляции балластной воды; вентилятор (компрессор) мощностью N_{comp} для системы барботирования.

Методики расчета противообледенительных систем основаны на следующих предположениях:

1. Используются одномерные модели, зависящие только от координаты вдоль поверхности балластной цистерны. Рассматривается установившееся течение.
2. Предполагается, что на всей внутренней поверхности балластной цистерны, граничащей с забортным воздухом есть лед.
3. Теплоотдача ниже ватерлинии незначительна.
4. В резервуаре установлена вертикальная стенка для организации направленного движения в зазоре. Термическое сопротивление перегородки не учитывается.

Расчеты выполнены для типовой балластной цистерны судна ледокольного типа со следующими размерениями: $b = 0.2$ м, $L = 7$ м, $H = 0.7$ м.

Толщина льда определяется из условия:

$$q_{ice} = q_{out}.$$

Тепловой поток от воды к поверхности льда равен

$$q_{ice} = \alpha(T - T_{ice}).$$

где α – коэффициент теплоотдачи, T – температура воды в зазоре. Тепловой поток от поверхности льда наружу составляет:

$$q_{out} = \frac{T_{ice} - T_{out}}{R},$$

где $R = \frac{1}{\alpha_{out}} + \frac{\delta_{ice}}{\lambda_{ice}} + \frac{\delta_{wall}}{\lambda_{steel}}$ – термическое сопротивление, δ_{ice} – толщина льда, δ_{wall} – толщина наружной обшивки корпуса, λ_{ice} – коэффициент теплопроводности морского льда, и λ_{steel} – коэффициент теплопроводности стали.

Тепловой баланс в зазоре, ограниченном перегородкой:

$$-G_w c_p [T(H) - T(0)] = Q_{tank} + Q_{ice},$$

где H – высота над КВЛ, G_w – массовый расход воды в контуре; c_p – теплоемкость воды в балластной цистерне; $T(0)$ – температура воды при $z=0$, $T(H)$ – температура воды в зазоре при $z=H$.

Количество тепла, отводимого за борт (в окружающую среду):

$$Q_{ice} = L \int_0^H \alpha (T(z) - T_{ice}) dz.$$

Количество тепла, отведенного в цистерну, составляет:

$$Q_{tank} = L \int_0^H K (T(z) - T_{tank}) dz,$$

где L – длина цистерны, δ_{part} – толщина разделяющей перегородки, T_{tank} – температура в цистерне, α_{tank} – коэффициент теплоотдачи к цистерне, $K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{tank}} + \frac{\delta_{part}}{\lambda_{steel}} + \frac{1}{\alpha}}$ – коэффициент теплопередачи.

Распределение температуры по высоте обогреваемой стенки:

$$T(z) = \frac{1}{A} ((AT(0) + B)e^{-Cz} - B),$$

$$A = \alpha + K;$$

$$B = -(\alpha T_{ice} + K T_{tank}), C = \frac{AL}{G_w c_p}.$$

2.1. Система подогрева

Распределение температуры по высоте, скорость теплопередачи, гидравлические потери и тепловая мощность определяются следующей системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} T(z) = \frac{1}{A} ((AT(0) + B)e^{-Cz} - B); \\ \alpha = \max(\alpha_{n_conv}, \alpha_{f_conv}); \\ (\rho_{tank} - \bar{\rho})gH = \lambda_{friction} \frac{H}{d_{eq}} \frac{G_w^2}{2\rho(bL)^2}; \\ G_w c_p [T(H) - T_{tank}] + Q_{tank} = 0; \\ N_{heating} = G_w c_p [T(0) - T_{tank}], \end{array} \right.$$

где ρ_{tank} – плотность морской воды при $T = T_{tank}$; $\bar{\rho} = \frac{1}{H} \int_0^H \rho_0 \beta T(z) dz$ – среднее значение плотности, ρ_0 – плотность при $T = 0^\circ\text{C}$; $\lambda_{friction}$ – коэффициент сопротивления; β – коэффициент объемного расширения (при условии $T_{tank} \geq 2^\circ\text{C}$); λ_w – коэффициент теплопроводности воды; $d_{eq} = \frac{2bL}{b+L}$ – эквивалентный диаметр, b – ширина цистерны, μ – коэффициент динамической вязкости,

$$Re = \frac{2G_w}{\mu(b+L)}, Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda_w}, Gr = \frac{g\beta H^3 \Delta T \rho^2}{\mu^2},$$

$$\alpha_{f_conv} = \frac{Nu_{f_conv} \lambda_w}{d_{eq}}; Nu_{f_conv} = \begin{cases} 0.037Re^{0.75}Pr^{0.4}, & \text{if } Re \leq 2000 \\ 0.021Re^{0.8}Pr^{0.43}, & \text{if } Re > 2000 \end{cases};$$

$$\alpha_{n_conv} = \frac{Nu_{n_conv} \lambda_w}{H}, Nu_{n_conv} = 0.63 (Gr \cdot Pr)^{0.25} [10].$$

Результаты расчета максимальной толщины льда (в верхней части резервуара) в зависимости от подводимой мощности представлены на рис. 5.

Обычно в случае установившегося теплового режима $Q_{tank} \ll Q_{ice}$, при $T_{tank} \cong \bar{T}$ ($\bar{T} = \frac{1}{H} \int_0^H T(z) dz$ – среднее значение температуры).

Из рис. 5 видно, что приемлемая толщина льда 0.1 м [7] обеспечивается тепловой мощностью $N_{heating} = 2 \dots 4$ кВт в зависимости от температуры наружного воздуха ($T_{air} = -10 \dots -30^\circ\text{C}$). Отсутствие льда в цистерне обеспечивается при мощности нагрева $N_{heating} > 7$ кВт ($T_{air} = -10^\circ\text{C}$) и $N_{heating} > 25$ кВт ($T_{air} = -30^\circ\text{C}$).

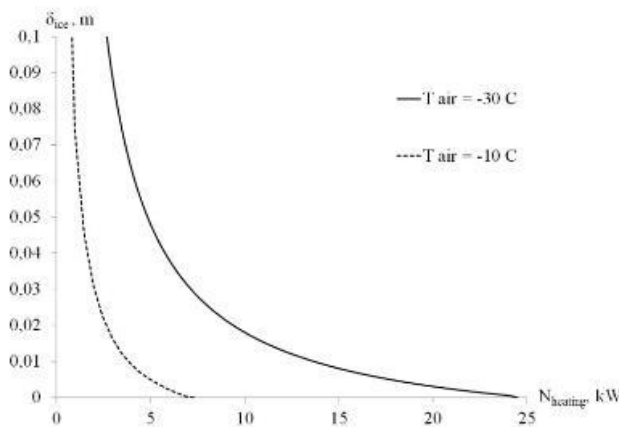


Рис. 5 – Зависимость толщины льда от мощности нагрева

2.2. Система циркуляции балластных вод

Тепловое состояние воды в зазоре, гидравлические потери на трение, мощность циркуляционного насоса ($N_{friction}$) определяются из уравнений:

$$T(z) = \frac{1}{A} ((AT_{sea} + B)e^{-Cz} - B);$$

$$\alpha = \frac{0.021Re^{0.8}Pr^{0.43} \lambda_w}{d_{eq}};$$

$$\Delta p_{gap} = \lambda_{friction} \frac{H}{d_{eq}} \frac{G_w^2}{2\rho(bL)^2};$$

$$N_{friction} = \frac{G_w}{\rho} \Delta p_{gap};$$

$$N_{pump} = \frac{G_w \Delta p_{pump}}{\eta_{pump}},$$

где $\lambda_{friction}$ – коэффициент трения, η_{pump} – КПД насоса.

Напор циркуляционного насоса (Δp_{pump}) и, следовательно, его мощность (N_{pump}) определяется конструкцией циркуляционной системы ($\Delta p_{pump} \gg \Delta p_{gap}$).

Результаты расчета максимальной толщины льда (в нижней части резервуара) в зависимости от расхода воды представлены на рис. 6.

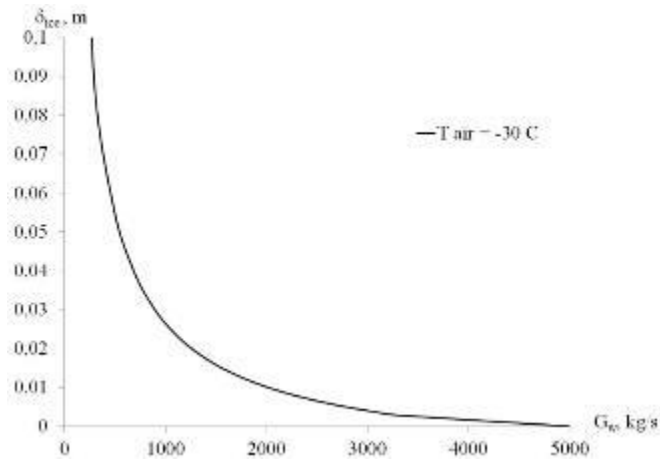


Рис. 6 – Зависимость толщины льда от расхода воды

Результаты расчетов показали, что допустимая толщина льда может быть достигнута при малых расходах воды даже при температуре наружного воздуха $T_{air} = -30^\circ\text{C}$. Отсутствие льда обеспечивается при $G_w = 5000 \text{ kg/s}$, в этом случае сила, необходимая для преодоления трения $N_{friction} \cong 150 \text{ W}$.

2.3. Система воздушного барботажа

Расчетные зависимости для системы барботажа воздуха представлены в [9].

Распределение температуры по высоте, расход воды и теплоотдача в зависимости от расхода воздуха определяются из уравнений:

$$T(z) = \frac{1}{A} ((AT(0) + B)e^{-Cz} - B);$$

$$\alpha_{bubbling} = \frac{Nu_{bubbling} \lambda_w}{l_{layer}};$$

$$\varphi = 0.26 \left(\frac{w_{air}^2}{g \sqrt{g(\rho_w - \rho_{air})}} \right)^{0.36} \left(\frac{\rho_w}{\rho_w - \rho_{air}} \right)^{0.12};$$

$$\varphi \rho_w g H = \lambda_{friction} \frac{H}{d_{eq}} \frac{\rho_w W_w^2}{2} \left[1 + x \left(\frac{\rho_w}{\rho_{air}} - 1 \right) \right],$$

где $Nu_{bubbling} = 0.146 K_\delta^{1/4} Pr^{1/3}$, $K_\delta = \frac{w_{air}}{(g v_w)^{1/3}}$, $w_{air} = \frac{Q_{air}}{bL}$, $l_{layer} = \left(\frac{v^2}{g} \right)^{1/3}$, $x = \frac{1}{1 + \frac{1-\varphi}{\varphi} \frac{\rho_w}{\rho_{air}}}$.

Мощность воздушного компрессора определяется:

$$N_{comp} = \frac{1}{\eta_{comp}} \frac{Q_{air}}{\rho_2} l'_{ad};$$

$$l'_{ad} = -\frac{k}{k-1} RT_0 \left[\left(\frac{p_2}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right];$$

$$p_2 = p_0 + (1-\varphi) \rho_w g H + \xi_{hole} \left(\frac{\rho_{air} W_{hole}^2}{2} \right);$$

$$W_{hole} = \frac{bL}{0.785 d_{hole}^2 n_{hole}} w_{air},$$

где η_{comp} – КПД воздушного компрессора, Q_{air} – объемный расход, $k = 1.4$; $R = 287 \left[\frac{\text{J}}{\text{kgK}} \right]$; T_0 – температура воздуха [K]; p_0 – атмосферное давление [Па], $\rho_2(p_2)$ – плотность воздуха внутри

барботажной трубы, ρ_w – плотность воды, ξ_{hole} – коэффициент потерь энергии потока ($\xi_{hole} \cong 1.5$ [9]), d_{hole} – диаметр отверстий барботажной трубы, n_{hole} – количество отверстий в барботажной трубе, φ – объемная доля воздуха, $w_{hole} \cong 10$ м/с – скорость воздуха в отверстиях барботажной трубы.

Результаты расчета максимальной толщины льда (в верхней части резервуара) в зависимости от расхода воздуха представлены на рис. 7.

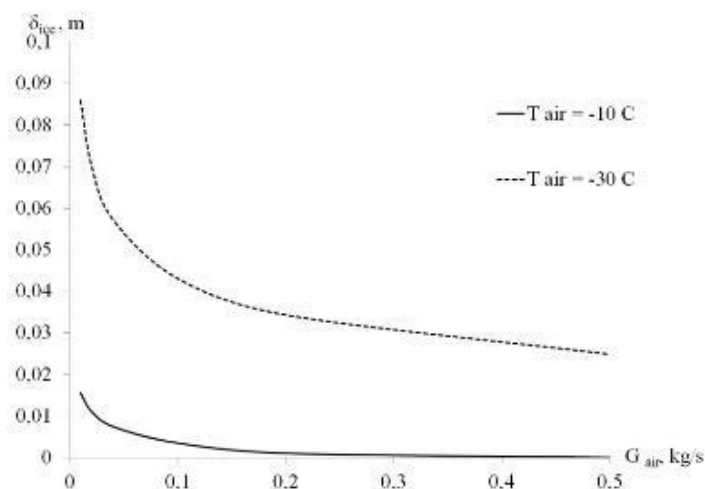


Рис. 7 – Зависимость толщины льда от расхода воздуха

Система воздушного барботажна способна ограничить обледенение на внутренней стенке балластной цистерне не более чем $\delta_{ice} = 0.02$ м и $\delta_{ice} = 0.09$ м при соответствующей температуре воздуха наружного воздуха $T_{air} = -10^\circ\text{C}$ и $T_{air} = -30^\circ\text{C}$. Отсутствие льда может быть обеспечено при температуре воздуха $T_{air} = -10^\circ\text{C}$ при расходе $G_{air} = 0.3$ кг/с, в этом случае мощность вентилятора $N_{comp} \cong 250$ кВт. При температуре наружного воздуха минус 30°C , в принципе, невозможно получить полное отсутствие обледенения внутренних поверхностей балластных цистерн.

Заключение

Результаты данного исследования показывают, что наиболее энергоэффективными системами защиты от замерзания являются система циркуляции балластной воды, и система барботирования воздуха, которые предотвращают обледенение, за счет подвода тепла от забортной морской воды ниже ватерлинии. Эффективность этих систем зависит от солености балластной воды. Внешние источники энергии необходимы только для обеспечения циркуляции воды в резервуаре. Недостатком системы циркуляции балластной воды является сложная конструкция контура с насосом большой производительности, которые необходимо устанавливать в балластные цистерны.

Система барботирования воздуха удобна в эксплуатации, но не универсальна и имеет ограничения при использовании при очень низких температурах наружного воздуха.

Система отопления не является энергоэффективной, однако она проста по конструктивному исполнению и предотвращает обледенение балластных цистерн при любых экстремально низких температурах забортного воздуха.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила классификации и постройки морских судов. Часть VIII. Системы и трубопроводы. НД № 2-020101-174, Российский морской регистр судоходства, 2024.
2. Руководство по правилам контроля и управления балластными водами. TP 13617, Канада, 2007.
3. Патент № KR20120023246 20120307. Ballasting apparatus with anti-freezing function using microbubble and ship including the same// Korea Institute of Ocean Science & Technology.

4. Myung-jun Koo¹, Jae-woong Choi, Keun-hae Koo, Mun-keun Ha, Jin-hwan Jeon, Jong-hyun Kim// Investigation of Anti-freezing Mechanisms of an Air Bubbling System for Ballast Tanks Using Variable Specific Heat Coefficient// Proceedings of the Sixteenth (2007) International Offshore and Polar Engineering Conference, Lisbon, Portugal, July 1-6, 2007.
5. Патент № KR20120125561 20121107. Ballast water winterization apparatus for vessel // DAEWOO SHIPBUILDING & MARINE ENGINEERING CO., LTD.
6. Guidelines for polar ship, China classification society, Beijing, 2016, p. 140.
7. Bagaev D V, Kudinovich I V, Syraleva M N 2019 Improving the energy efficiency of ship tank heating systems (All-Russian Scientific Conference with International Participation Thermophysics and Power Engineering in Academic Centers, TPEAC-2019, Saint-Petersburg, Russia), pp 44-45.
8. Kudinovich I V, Syraleva M N 2013 Study of icing-up in the fresh water tanks of the semi-submersible drilling rigs operated in northern seas (International Conference on Computer Applications in Shipbuildings, Bussan, Korea), Vol. III, pp 27-32.
9. Соков В.Н., Доманский И.В. Газожидкостные реакторы. Ленинград: Машиностроение, 1976, с. 214.
10. Михеев В.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи, 1973, с. 320.

METHODS OF DE-ICING BALLAST SHIP TANKS

¹Kudinovich Igor Vladislavovich, doctor of technical sciences, head of department

²Syraleva Maria Nicolaevna, leading engineer

^{1,2}Krylov State Research Centre, Saint-Petersburg, Russia,

e-mail: M_Syralyova@ksrc.ru

Choosing the best way to deal with the internal icing of ballast tanks is the important task of the designing Arctic vessels. To prevent excessive ice formation in the ballast tank, various methods are used, the main of which are: heating the water and increasing of the water circulation intensity inside the tank (air and steam bubbling, forced water circulation). The report presents qualitative assessment of the heating method and air bubbling system and investigation of energy efficiency of anti-freezing systems.

ГРАФО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ И МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ В ДИАГНОСТИРОВАНИИ ЦИЛИНДРОПОРШНЕВОЙ ГРУППЫ СУДОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

¹Мазур Екатерина Владимировна, ст. преподаватель

²Великанов Николай Леонидович, д-р техн. наук, профессор

^{1,2}ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,

Калининград, Россия,

e-mail: ¹ekaterina.mazur@gmail.com; ²NVelikanov@kantiana.ru

Безразборное диагностирование сложных систем становится все более актуальным в настоящее время. Помимо вибродиагностики, анализов проб отработанного моторного масла и тепловизионных обследований, в области безразборной диагностики судовых энергетических установок широкое применение нашел логико-ориентированный подход. Представлена методика обработки информации о состоянии элементов цилиндропоршневой группы с применением логико-ориентированного подхода, позволяющая получать информацию о возможности возникновения дефектов механизмов.

Введение

Техническое развитие, возросшая сложность, интегрирование и усовершенствование механизмов и машин повышают требования к обеспечению своевременного контроля и предотвращению внеплановых остановок оборудования. Аварии и выход из строя компонентов механизмов могут быть спрогнозированы при помощи в том числе безразборной диагностики [1]. Цилиндропоршневая группа (ЦПГ) является одной из самых уязвимых трибосистем судового двигателя это связано с тяжелыми условиями функционирования – работа при высоких термических и механических нагрузках. Таким образом, диагностирование ЦПГ без вывода системы из эксплуатации, в большей степени направлено на применение косвенных методов. Безразборно проконтролировать техническое состояние и провести предиктивный анализ системы возможно с применением:

- анализов лабораторных исследований отработанного моторного масла;
- проведения процедуры измерения и анализа вибрации;

термографии;

- процедуры по поиску взаимосвязи между процессами и состояниями механизмов при помощи математического аппарата.

Все перечисленные подходы безразборного контроля не всегда своевременно могут осуществляться в условиях плавания. Так, например, технические средства для проведения вибрационной и термической диагностики должны быть установлены в режиме остановки подконтрольного механизма. Анализ отработанного масла является обязательной процедурой, с регламентированными сроками отбора и проводится сторонней организацией «на берегу». Конечно, возможно исследование проб масла на судне при наличии переносной лаборатории, что не всегда удобно и осуществимо по причинам дополнительных материальных затрат и логистических трудностей в получении реагентов. Однако, развитие в области программного обеспечения и исследований в математическом сегменте, привело к созданию алгоритмов обработки данных, способных установить взаимосвязь между возникновением дефектов и сигналами, предшествующими их появлению [2,3].

Персонал судовой механической службы имеет возможность регулярно подвергать мониторингу состояние подконтрольных механизмов при помощи различных косвенных признаков, а именно: динамики изменений в показателях приборов контроля, появление нехарактерных звуков при работе оборудования, изменения цвета и запаха задействованных в эксплуатационном процессе рабочих сред. Такой мониторинг позволяет извлечь и проанализировать важные характеристики состояния ключевых компонентов. Объединив, при помощи математического аппарата, данные, со-

бренные специалистами машинного отделения и выстроив причинно-следственную связь с появлением отказа, можно получить предсказания в тенденции изменения будущего состояния цилиндропоршневой группы. В работе представлен пошаговый алгоритм получения и обработки информации о техническом состоянии элементов ЦПГ посредством логико-ориентированного подхода. Описана методика обработки данных сигналов и прогнозирования потенциально возможных поломок оборудования.

Формирование алгоритма оценки технического состояния ЦПГ посредством построение ориентированного графа

Чаще всего, аварийный выход из строя элементов ЦПГ, является результатом сочетания серии единичных повреждений во взаимосвязанных системах. Например, незначительное нарушение герметичности камеры сгорания покажет изменение давления в цилиндре. Но, в свою очередь, падение величины сжатия газа, может быть следствием поломки поршневых колец, клапанов, прокладки блока цилиндров, либо сочетания перечисленных дефектов. На возникновение деформационных изменений поршневых колец окажет негативное влияние наличие воды в топливе. И так далее. Важным и сложным этапом в диагностике технического объекта является исследование механизма возникновения неисправности и последующего определение весомости факторов, приведших к появлению дефекта. Следовательно, встает вопрос о процедуре определения веса, каждого из факторов влияния. Для этого следует рассмотреть такие инструменты как CREAM – метод анализа аварий, ЕТА – методология, предложенная для оценки риска и расследования аварий, FMEA – процедура последовательного поиска возможных отказов в процессе. Все представленные методологии в своей основе направлены на определение веса и значимости влияния факторов на событие. Для интегральной оценки риска возникновения повреждений (наступления события) воспользуемся определением величины предельного числа риска ПЧР, являющегося произведением веса влияющего на событие фактора, возможности определения дефекта и вероятности возникновения события (рис.1).

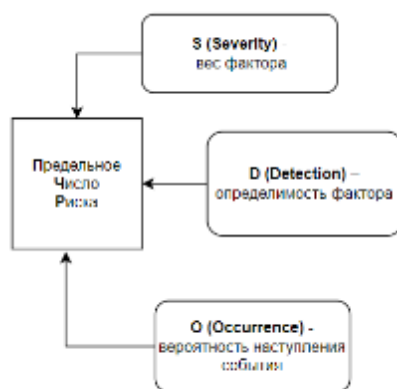


Рис. 1 Схема определения предельного числа риска согласно методологии (FMEA)

Обозначив критерии определения ПЧР согласно ГОСТ Р 58771-2019, строится граф связей причин и последствий износа элементов ЦПГ (рис. 2), основанием связей в котором служит собранная из научных источников информация о поломках в системе судовых дизельных двигателях [4,5].

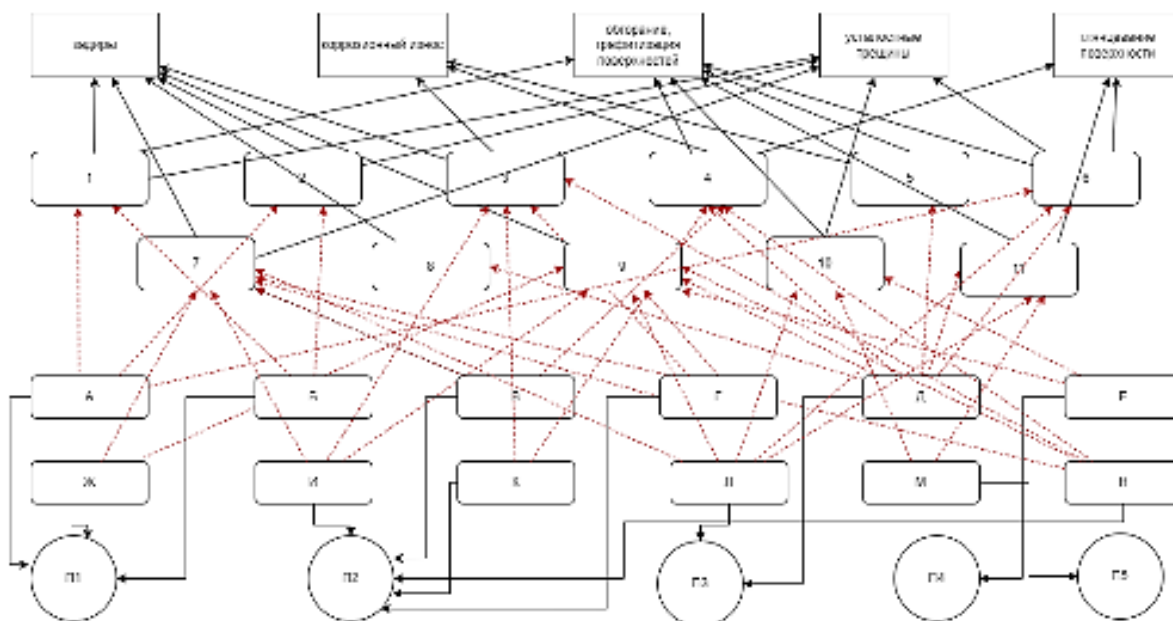


Рис. 2. Граф связей (1-11 причины: ошибка монтажного зазора; нарушение программы обкатки; неисправности в системе смазки; наличие воды и частиц загрязнений; отложение твердых частиц; колебания нагрузки; перегрев; нагрузка на холодный двигатель; нарушение теплового режима работы; перегрузка отдельного цилиндра или всего двигателя; смещение угла впрыска топлива), (А-Н факторы: некачественная сборка деталей; детали с браком; изменение давления масла; несоответствие сорта масла; применение несоответствующего нормам топлива; неполадки в системе охлаждения; нарушение тех.условий изготовления деталей; дефицит смазки в системе; низкое качество фильтрации масла; нарушение подачи топлива; нарушения качества фильтрации воздуха; износ смазки), (П1-П5: перечень нормативно-технических требования по оценке параметров и контролю условий эксплуатации: сборки и эксплуатации деталей; смазочного масла судового двигателя; судового топлива; системы охлаждения судового двигателя; системы воздухообеспечения)

Таким образом, после установления связей между процессами, происходящими в системе, факторами, влияющими на процессы и причинами сбоя в данных процессах, следует определить те первичные признаки, по которым служба механика узнает о неполадках (рис. 3). Изменения в показаниях датчиков и сигналы оповещения и будут для нас признаком сдвига в характеристике системы [6]. Линейным описанием нельзя квалифицировать происходящие в системе процессы и взаимодействия, но это не мешает построению ориентированного графа. Путь (количество ребер) от сигнала датчика к дефекту может проходить разными маршрутами, формируя по пути следования вес в развитии сценария отказа.

Для получения более полного расчета весов следует разбить узлы графа связей «причины» на более подробные графы, с вершинами, отображающими реакции системы сигнализации. На рисунке 4 приводится пример одного из таких малых графов. Обозначение вершины а.3 соответствует сигналу срабатывания сигнализации на «повышение температуры масла на входе в двигатель», а узлы п.1 (ошибка монтажного зазора), п.3 (неисправности в системе смазки), п.4 (отложение твердых частиц), п.7 (перегрев) и п.9 (нарушение теплового режима работы) - предполагают причины, на это повлиявшие. На изображении малого графа можно увидеть, что ребра имеют направление как от сигнала к причинам, так и в обратном направлении. В данном случае, это объясняется тем, что сигналы тревоги служат информацией необходимой для определения причин, а причины, в это же время, создают связь со срабатыванием сигнала. В частности, движение от вершины к вершине по ребрам, каждое из которых имеет оценку ПЧР, приводит к формированию оценки технического состояния цилиндропоршневой группы в виде весового коэффициента.

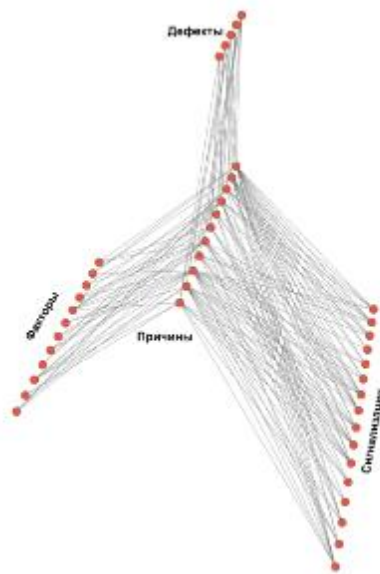


Рис. 3. Граф взаимосвязей причин, фактор влияющих на причины, дефектов, вызванных влиянием факторов и сигналов системы контроля

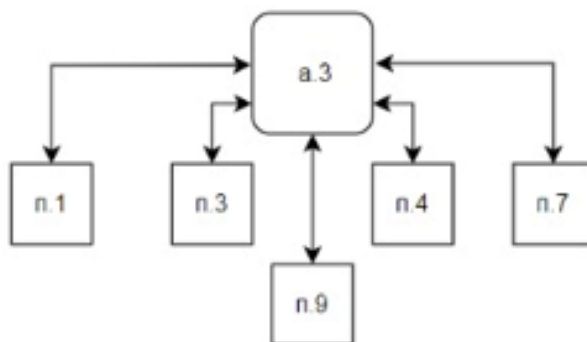


Рис. 4 Малый граф взаимосвязей сигналов тревоги и возможных причин

В результате, для проведения диагностирования с применением логико-ориентированного подхода должны быть соблюдены следующие условия:

- построен ориентированный граф;
- определена система оценки весовых коэффициентов ребер;
- создан базовый сценарий характеристик системы, при котором происходит нормальное ее функционирование;
- сформированы различные сценарии отказов (множества состояний), характерные для исследуемого механизма;
- создан опросник для формирования анализа процесса эксплуатации.

Формирование и анализ сценариев состояния элементов ЦПГ

Часто встречающиеся и классические сценарии поломок элементов цилиндропоршневой группы описаны в технической литературе, а также зафиксированы в «Правилах технической эксплуатации судовых технических средств и конструкций» (РД 31.21.30-97). Стоит отметить, что при формировании массива данных для последующей обработки, нужно помнить, что сценарии не являются универсальными и должны быть адаптированы под тип технические характеристики конкретного двигателя. Пример сценария и формирования для него веса ребер представлен на рисунке 5. Каждая из обработанных таким образом версий возможного состояния сравнивается с базовой.

							LOW RISK	0-3,0
							MEDIAL RISK	3,1-6,0
							HIGH RISK	6,1-9,0
							№г	
							С	О
							П	П
							ПЧР	5 — Severity/
							С	0 — Occurrence/
							П	0 — Detection/
Примеч:								
использованность форсунок, загрязненность иглы форсунок	задым - 1	8,4	7,4	7,2	447,552			
дефектная клапанная ПВД	задым - 2	2,5	3	2,5	18,75			
болтажные шкворни	задым - 3	3	1,2	1	3,6			
низкая цветность числа топлива	задым - 7	8,3	7	8,5	377,65			
	задым - 8	5,6	5,1	4,6	131,376			
	задым - 9	1,5	2,4	1	3,6			
	кор.мэл. - 3	3	3	3	27			
	кор.мэл. - 4	2,9	1,7	0,4	1,972			
	кнр.мэл. - 5	8,6	8,5	8,9	680,50	5	0-1,0	
	обгар. - 1	8	6,9	8,1	324,72			
	обгар. - 4	2,5	2,7	0,2	1,35			1,1-3,0
	обгар. - 5	8,1	7,2	6,8	396,576			
	обгар. - 6	3	2,8	0,4	3,36			3,1-3,0
	обгар. - 10	8,4	8,4	7,2	504,032			
	обгар. - 11	9	8,4	8	604,8			5,1-6,0
	уст.прещ. - 1	7,8	8,1	6,6	416,888			
	уст.прещ. - 2	0,6	1,5	2,7	2,43			6,1-7,0
	уст.прещ. - 6	0,5	1,7	1,2	1,02			
	уст.прещ. - 7	7,9	7,6	8,9	414,276			6,1-6,0
	уст.прещ. - 10	8,9	8	8,8	484,38			
	планд. - 4	3	2,5	0,7	5,25			
	планд. - 6	0,8	1,5	1,3	1,56			
	планд. - 11	8,3	7,8	7,8	504,972	0	0-1,0	
	А - п.1	8,1	7,8	7	442,26			
	А - п.2	1,8	1	1	1,6			1,1-1,0
	А - п.5	2,8	2,5	0,7	6,9			

Рис. 5 Формирование весовых коэффициентов на примере сценария возникновения неисправности «прогары и отложения на головке поршня»

Нужно отметить, что после заполнения формы опроса о состоянии системы, будет формироваться уникальная картина с распределением весов репрезентативно каждому случаю.

Сравнение сценария отказа с базовым сценарием имеет в своей основе математический анализ структуры графа с определением логических связей вершин и весов ребер.

Инструментом математического описания графа, во-первых, служит представление его через матрицу смежности, основанием которой является общий граф взаимосвязей (рис.3). Представленный граф имеет нулевые матрицы – это вершины одного типа («факторы», «причины», «дефекты», «сигнализация») и четыре доли (поскольку вершины одного типа не соединены ребрами).

После определения характеристик исследуемого графа воспользуемся следующими методами анализа: определим ранги вершин по их степеням, по присутствию в наибольшем количестве кратчайших путей, близости по всем вершинам, выделить вершины-хабы. При проведении структурного анализа графа можно обнаружить, противоречив ли граф или имеет четкие логические связи. Данная проверка дает возможность увидеть ошибки в построение связей.

Дальнейшее сравнение сценариев отказов с базовыми сценариями подразумевает применение подхода, при котором происходит создание метрического пространства, описать которое возможно функцией расстояния. Данное расстояние и используется как метрика при сравнении сценариев. Визуализация таких сравнений представлена на рисунке 6, где можно увидеть реализацию сценария «прогары и отложения на головке поршня», сходство с базовым сценарием определяется при помощи расчета расстояний [7,8]:

1. Хаусдорфа (сценарии рассматриваются с точки зрения геометрических объектов);
2. Махаланобиса (определяются расстояние между множествами с учетом корреляции между ними).

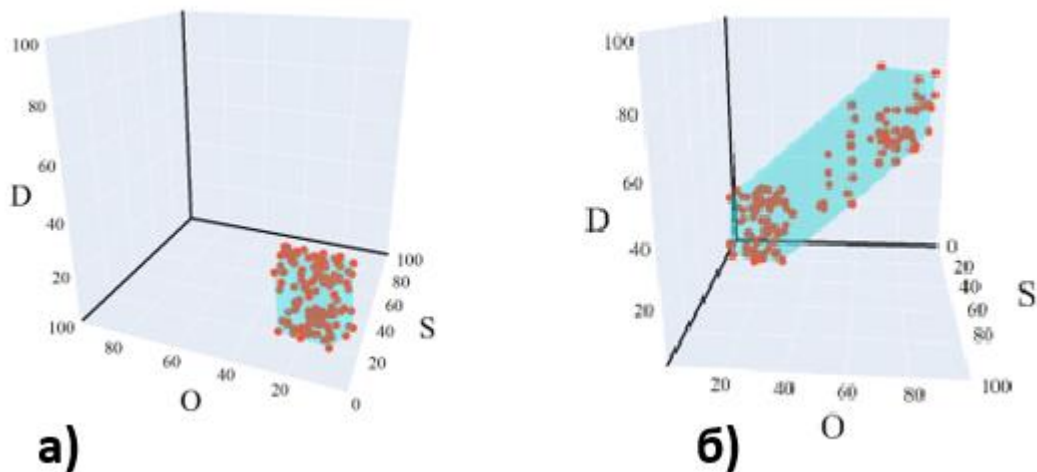


Рис. 6 Визуализация расположения множеств в метрическом пространстве состояний (S – значимость воздействия; O – вероятность возникновения; D – сложность обнаружения)
 а) базового сценария «двигатель после ходовых испытаний и приработки»;
 б) реализация сценария «прогары и отложения на головке поршня»

Для реализации на практике данного подхода безразборного диагностирования, то есть определение сходства базового сценария с фактическим состоянием цилиндропоршневой группы, инженеру службы старшего механика следует пройти процедуру опроса. Полученные ответы формируют множество точек состояния при помощи присвоения ребрам уникальных значений. Итоговым практическим заключением является ответ, к какому из существующих сценариев приближается фактическое состояние исследуемой системы в настоящий момент.

Заключение

Представленный в работе графо-аналитический и математический анализ в безконтактном диагностировании элементов судового двигателя позволяет:

- осуществлять оценку фактического состояния ЦПГ;
- определять причину отказов в работе ЦПГ;
- упрощать процесс предупредительного обслуживания в режиме эксплуатации.

Предложенный комплекс математической обработки предполагает создание программного обеспечения, что в значительной степени может упростить работу судовой механической службы во время плавания, а также даст службе технического обслуживания судоходных компаний возможность более точного прогнозирования сроков и объемов ремонтных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Техническое обеспечение измерительных экспертных систем машин и механизмов в АПК / В. В. Альт, И. П. Добролюбов, О. Ф. Савченко, С. Н. Ольшевский; под редакцией В.В. Альта. – Новосибирск: Государственное научное учреждение Сибирский физико-технический институт аграрных проблем Россельхозакадемии, 2013. – 523 с. – ISBN 978-5-906143-18-1. – EDN RTRDQH.
- Сизов, В. А. Разработка эволюционных моделей, методов и алгоритмов проектирования прикладного программного обеспечения для распределенных систем обработки данных / В. А. Сизов, Н. Б. Уральский // Ученые записки Российского государственного социального университета. – 2014. – Т. 2, № 4(127). – С. 300-313. – EDN UHXVTT.
- Современные алгоритмы обработки данных транскриптомов: обзор методов и результаты апробации / М. В. Спринджук, Л. П. Титов, А. П. Кончиц, Л. В. Можаровская // Системный анализ и прикладная информатика. – 2021. – № 2. – С. 54-62. – DOI 10.21122/2309-4923-2021-2-54-62. – EDN

Гомзяков М. В., Причины аварийных отказов судовых дизелей в ДВ регионе за 2016 год/ М.В. Гомзяков //Эксплуатация морского транспорта. – 2020. – №. 2. – С. 70-75.

5. Ceylan B. O., Akyuz E., Arslanoğlu Y. Modified quantitative systems theoretic accident model and processes (STAMP) analysis: A catastrophic ship engine failure case //Ocean Engineering. – 2022. – Т. 253. – С. 111187.

6. Chen J. et al. Factor diagnosis and governance strategies of ship oil spill accidents based on formal concept analysis //Marine Pollution Bulletin. – 2023. – Т. 196. – С. 115606.

7. Wu M. et al. A fault detection method of electric vehicle battery through Hausdorff distance and modified Z-score for real-world data //Journal of Energy Storage. – 2023. – Т. 60. – С. 106561.

8. Woodall W. H. et al. A review and analysis of the Mahalanobis–Taguchi system //Technometrics. – 2003. – Т. 45. – №. 1. – С. 1-15.

GRAPHIC-ANALYTICAL AND MATHEMATICAL ANALYSIS IN DIAGNOSING THE CYLINDER-PISTON GROUP OF A MARINE ENGINE

¹Mazur Ekaterina Vladimirovna, Senior Lecturer

²Velikanov Nikolay Leonidovich, Dr. of Technical Sciences, professor

^{1,2}Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,

e-mail: ¹ekaterina.mazur@gmail.com; ²NVelikanov@kantiana.ru

In-place diagnostics of complex systems is becoming increasingly relevant at present. In addition to vibration diagnostics, analysis of used motor oil samples and thermal imaging surveys, in the field of in-place diagnostics of ship conditions, a wide application has been established, a logic-oriented approach has been found. The work provides a method for processing information on the state of cylinder-piston group elements using a logic-oriented opportunity, allowing to obtain information on the possibility of defects.

ОЦЕНКА ВЕСА КОРПУСА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ МАЛЫХ И СРЕДНИХ РЫБОЛОВНЫХ СУДОВ

¹Терлыч Станислав Владимирович, канд. техн. наук, доцент

²Волков Евгений Леонидович, канд. техн. наук, доцент

^{1,2}ФГБОУ ВО «Херсонская государственная морская академия»,

Херсон, Россия, e-mail: ¹slavus_limanskii@mail.ru; ²yeevolkov@yandex.ru

Предложен способ уточнения масс, составляющих водоизмещение порожнем для малых и средних водоизмещающих рыбопромысловых судов с максимальным водоизмещением в полном грузу до 2000 тонн. Полученные характеристики распределения открывают возможность расчёта аналогичных показателей для величин, являющихся функциями массовой нагрузки: строительной стоимости, аппликаты центра тяжести, других параметров. Приведенные результаты, соответствующие математическому ожиданию значений масс, могут быть использованы не только в стохастических моделях, но и в детерминированных.

Постановка задачи и анализ литературы

Одно из центральных мест в логико-математических моделях (ЛММ), широко применяемых в исследовательском проектировании судов, занимает расчёт весового водоизмещения порожнем. Как правило, он выполняется по статистическим формулам. Применительно к малым и средним рыбодобывающим судам такие математические зависимости предложены в работах [1-4]. Особо следует отметить зависимости [1] и [3], которые дают возможность выполнить наиболее детальный и точный расчёт.

В то же время, в этих работах отсутствуют сведения о параметрах распределения погрешностей расчёта по отдельным статьям. Это резко ограничивает возможности применения указанных методик в вероятностных ЛММ, принадлежащие к наиболее перспективным [5]. Кроме того, зависимости [1, 2] разработаны достаточно давно, учитывая тот факт, что за последнее десятилетие архитектурно-конструктивный тип малых рыболовных судов подвергся ряду революционных изменений. Между тем, известно [3], [6] что измерители масс существенно зачисят от времени постройки судна. Отмеченные обстоятельства позволяют сделать вывод о целесообразности дополнительного исследования нагрузки порожнем современных малых и средних промысловых судов с целью получения параметров, описывающих как стохастические, так и вероятностные компоненты связи масс и технико-эксплуатационных характеристик судна.

Исходные данные

Ниже приведены результаты такого исследования. Были рассмотрены 17 отечественных проектов промысловых судов, преимущественно рыбодобывающих. Рассмотренные суда имеют:

- неограниченный или I ограниченный район плавания;
- ледовый класс Ice1...Ice3;
- автономность 5...25 суток;
- материал корпуса – углеродистая сталь; рубки из того-же материала или из лёгких сплавов;
- одну или две главные палубы;
- 4...7 непроницаемых поперечных переборок;
- руль или поворотную насадку;
- обычный, рефрижераторный или морозильный трюм или охлаждаемые танки;
- не более, чем две спасательные шлюпки вместимостью 20 человек;
- 2...4 грузовые стрелы;

- судовой двигатель внутреннего сгорания с номинальной частотой вращения вала 230...1500 мин⁻¹ в качестве главного двигателя;

- 2...4 дизель-генератора суммарной мощностью 94...500 кВт.

Прочие параметры конструктивных решений также менялись в довольно широких пределах, но не выходили за границы диапазона, характерного для рыбопромысловых судов с полным водоизмещением до 2000 тонн.

Изложение основного материала

В исследовании водоизмещение порожнем разбито на 35 составляющих так, что бы их массы были одного порядка, а аппликата центра тяжести – достаточно стабильна с тем, чтобы для этой величины впоследствии выполнить такой же анализ, как и для масс.

На первом этапе исследования для каждой укрупнённой статьи оценивалась сила статистической связи измерителя массы по определённому модулю – с одной стороны и этого модуля – с другой. При линейной зависимости для оценки использовался коэффициент корреляции, в других случаях – корреляционное отношение Пирсона [7]. Для проверки нулевой гипотезы об отсутствии связи измерителя и модуля применялся критерий на 10%-ном уровне значимости. В тех случаях, когда низкая значимость коэффициента корреляции не позволяла отвергнуть нулевую гипотезу, дополнительно рассчитывался коэффициент вариации.

Как правило, с первого раза не удавалось подобрать модуль, достаточно хорошо соответствующий закономерностям изменения масс. В связи с этим первоначальные модули корректировались путём введения коэффициентов, учитывающих особенности проектов, либо заменялись. При этом учитывались результаты выполненных ранее аналогичных исследований. В конечном итоге удалось выявить достаточно достоверные зависимости. Соответствующие модули представлены в таблице 1.

Второй этап работы заключался в определении коэффициентов регрессии измерителей по обратным модулям. Регрессия искалась в виде

$$q_i = A_{1i} + A_{2i} \cdot M_i.$$

Оценки коэффициентов A_{1i} и A_{2i} , полученные методом наименьших квадратов, приведены в таблице 1. Как известно [8]

Таблица 1

Модули и коэффициенты уравнений регрессии

№	Наименование	Модуль	A_{1i}	A_{2i}
1	Наружная обшивка	$\omega d^{1/3} D^{2/3}$	3,10	-1,03
2	Настил второго дна со скуловыми стрингерами	$l_{дд} B$	4,31	-16,0
3	Продольный и поперечный междудонный набор	$l_{дд} h_{дд} B$	7,05	-17,0
4	Продольный и поперечный набор днища и бортов	$B(LD - l_{дд} h_{дд})$	0,99	1,34
5	Верхняя палуба	LB	4,86	62,9
6	Палубы бака и юта, платформы, вторая палуба	$B(l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5)$	2,90	154,0
7	Непроницаемые поперечные переборки	$n_{пп} B D$	8,50	190,0
8	Штевни	$L B D$	0,283	-0,327
9	Корпусные конструкции, масса которых зависит от главных размерений	$L B D_{пр}$	0,615	0,609
10	Обшивка и набор бортов, палуб и переборок надстроек, рубок, фальшбортов и мостиков	$n_n^{1/3} L^{2/3} \omega_n^{2/3}$	3,71	5,47
11	Мачты с площадками	$L B D(L+120)/12D$	0,0864	0,0770
12	Корпусные конструкции, не вошедшие в пункты 1...10	$L B D$	0,0220	0,0360
13	Фундаменты под главные двигатели и все обслуживающие их механизмы и устройства	$N_{Гд}$	0,653	-1,48

№	Наименование	Модуль	A_{1i}	A_{2i}
14	Остальные фундаменты	$C_B LBD_{\text{ПР}}$	0,696	-0,658
15	Дельные вещи	$C_B (LBD_{\text{ПР}})^{2/3}$	6,62	96,0
16	Неметаллические части корпуса. Окраска. Протекторы	$C_B (LBD_{\text{ПР}})^{2/3}$	21,4	840,0
17	Изоляция помещений	$W_{\text{ТР}}^{2/3}$	39,0	1210
18	Твёрдый балласт	-	-	-
19	Оборудование жилых, служебных помещений	$N_{\text{ЭК}}$	13,3	72,0
20	Оборудование грузовых трюмов	-	-	-
21	Оборудование производственных и технологических цехов	-	-	-
22	Рулевая машина	-	-	-
23	Рулевой привод и руль в сборе	Ldv_S^2	0,0275	-0,004
24	Якорное устройство	$C_M B d$		
25	Промышленное устройство	-	-	-
26	Грузовое устройство	$W_{\text{ТР}}$	2,04	455
27	Швартовное, буксирное, шлюпочное, спасательное устройства, рангоут и такелаж	$(LBD_{\text{ПР}})^{2/3}$	1,70	27,2
28	Трюмные и пожарные системы	LB	1,12	12,8
29	Система промышленной рефрижерации с механизмами	-	-	-
30	Прочие системы, не вошедшие в пункты 28, 29	$C_B LBD$	1,09	1,40
31	Главная энергетическая установка	$k_{31} k_{31} k_{31} N_{\text{ГД}} n_{\text{ГД}}^{-1/3}$	1,00	0
32	Электрооборудование и внутрисудовая связь	$N_{\text{ЭЛ}}$		
33	Вооружение штурманское и рыбопоисковое	-	-	-
34	Постоянные жидкие грузы	LB	0,522	212
35	Снабжение и имущество	$(LBD_{\text{ПР}})^{2/3}$	2,65	35,4

В таблице 1 прочерком обозначены статьи, принимаемые по результатам предварительных конструкторских проработок, либо по близкому прототипу; B – ширина судна на миделе, м; D – высота борта, м; $C_B LBD$ – подпалубный объём, м³; $C_B LBD_{\text{ПР}}$ – полный объём, м³; $W_{\text{ТР}}$ – объём трюмов, м³; $l_{\text{ДД}}$ – длина двойного дна, м; $h_{\text{ДД}}$ – высота двойного дна, м; l_1, l_2, l_3 – соответственно длина бака, юта, второй палубы, м; l_4 – суммарная длина платформ, м; l_5 – суммарная длина продольных переборок, м; $n_{\text{ПП}}$ – количество поперечных переборок; ω – площадь поверхности корпуса по верхнюю палубу, м²; $N_{\text{ГД}}$ – мощность главного двигателя, кВт; $N_{\text{ЭК}}$ – суммарная мощность дизель-генераторов, кВт.

Как известно [8], такие оценки являются состоятельными и несмещёнными. Ниже будет показано, что распределение случайных отклонений от линии регрессии в некоторых случаях отличается от нормального. Однако это не препятствует применению метода наименьших квадратов, хотя и снижает его эффективность [8].

На третьем этапе был проведён поиск показателей распределения погрешностей расчёта. Для решения этой задачи в соответствии с рекомендациями [9] определялись центральные моменты кривой распределения до четвертого порядка включительно. В таблице 2 приведены их значения для масс, соответствующих разделам стандартной разбивки нагрузки. Там же представлены коэффициенты эксцесса γ_1 и асимметрии γ_2 .

Как видно, в отдельных случаях закон распределения погрешностей существенно отличается от нормального. В то же время для наиболее крупного раздела «Корпус» и водоизмещения порожнем в целом это отличие пренебрежимо мало, как это следовало ожидать, в соответствии с центральной предельной теоремой.

Оценки характеристик распределения относительных погрешностей

Характеристика	Статьи нагрузки						
	Водоизмещение порожнем	Корпус	Устройства	Системы	Главная энергетическая установка	Электрооборудование и штурманское вооружение	Снабжение
$m_2 \cdot 10^4$	8,5	43,0	66,5	263,1	31,4	302,7	126,9
$m_3 \cdot 10^6$	11,7	90,8	408,0	-2003,0	-185,0	-1365,0	-263,8
$m_4 \cdot 10^6$	2,0	59,9	155,6	1833,0	46,3	1443,0	373,7
$M_2 \cdot 10^4$	9,0	45,5	70,5	279,0	33,4	321,0	134,5
$M_3 \cdot 10^6$	13,9	108,1	487,0	-2380,0	-220,0	-1625,0	-314,1
$M_4 \cdot 10^6$	2,25	68,9	180,7	2057,0	55,3	1455,0	410,5
γ_1	0,518	0,535	0,826	-0,583	-1,150	-0,284	-0,203
γ_2	-0,222	0,328	0,636	-0,338	1,986	-1,588	-0,731

Здесь m_i и M_i – смещённая и несмещённая оценки центрального момента i -го порядка соответственно; γ_1 – коэффициент асимметрии; γ_2 – коэффициент эксцесса.

Резюме

Полученные характеристики распределения открывают возможность расчёта (по известным формулам [10]) аналогичных показателей для величин, являющихся функциями массовой нагрузки: строительной стоимости, аппликаты центра тяжести, других параметров. Следует отметить, что приведенные в таблице 1 результаты, соответствующие математическому ожиданию значений масс, могут быть использованы не только в стохастических моделях, но и в детерминированных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чулков, А. М. О критериях эффективности принимаемых решений при проектировании траулера, совмещающих добывающих добывающие и обрабатывающие функции / А. М. Чулков, А. А. Семёнов // Гражданское судостроение. – 2015. – № 5. – С. 27-31.
2. Гайкович, А. И. Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов : в 2-х т. / А.И. Гайкович. – Санкт-Петербург. : НИЦ МОРИНТЕХ, 2014.
3. Tracking the global footprint of fisheries / D. A. Kroodsma, J. Mayorga, T. Hochberg, N. A. Miller [at al.] // Science. – 2018. – №359. – P.904–908. DOI: 10.1126/science.aao5646.
4. The economics of fishing the high seas / E. Sala, J. Mayorga, C. Costello, D. Kroodsma, [at al.] // Sci. Adv. – 2018. – Vol. 4. – no 6. DOI: 10.1126/sciadv.aat2504.
5. Шагиданов В.И. Техничко-экономическое обоснование проектных характеристик судов для охраны экономических зон и для морских исследований: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2009. 219 с.: ил. РГБ ОД, 61 09-5/3478.
6. Часовников Н.Ю. Проектное обоснование технических и экономических характеристик рыболовных судов: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2013. 200 с.: ил. РГБ ОД, 61 14-5/1269.
7. Гржибовский А. М. Анализ порядковых данных / А. М. Гржибовский // Экология человека. – 2008. – № 8. – С. 56–62.
8. Дубров А.М., Мхитарян В.С., Трошин Л.П. Многомерные статистические методы. М.: Финансы и статистика, 2003. 352 с.
9. Китаев М.В., Тюфтяев Д.В., Тортыжева Д.А. Математическая модель проектирования грузового судна // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2022. № 4 (53). С. 42-58. DOI: <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-4/42-58>.

10. Ковтун Л. И. Мониторинг, упреждающее моделирование и ситуационный анализ аварийных процессов и мер противодействия для систем автоматизированного управления сложными комплексами машиностроения морской техники: программная разработка для ЭВМ / Л. И. Ковтун, Н. А. Шарков, Н. Л. Ковтун. – № 2010613335, от 20 мая 2010 г.

HULL WEIGHT ESTIMATION IN THE DESIGN OF SMALL AND MEDIUM-SIZED FISHING VESSELS

¹Terlych Stanislav Vladimirovich, candidate of technical sciences, assistant professor

²Volkov Evgeny Leonidovich, candidate of technical sciences, assistant professor

^{1,2}Kherson State Maritime Academy, Kherson, Russia,

e-mail: ¹slavus_limanskii@mail.ru; ²yeevolkov@yandex.ru

The article proposes a method for clarifying the masses of the empty displacement components for small and medium displacement fishing vessels with a maximum displacement of up to 2000 tons in full load. The obtained distribution characteristics open up the possibility of calculating similar indicators for quantities that are functions of the mass load: construction cost, applications of the center of gravity, and other parameters. The given results, corresponding to the mathematical expectation of the mass values, can be used not only in stochastic models, but also in deterministic ones.

ОБЗОР МЕТОДОВ ОЦЕНКИ БУКСИРОВОЧНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ РЫБОПРОМЫСЛОВЫХ СУДОВ НА ОСНОВЕ МОДЕЛЬНЫХ СЕРИЙНЫХ ИСПЫТАНИЙ НА РАННИХ ЭТАПАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

¹Чуреев Евгений Андреевич, канд. техн. наук, директор НИЦС

²Романюта Дмитрий Александрович, аспирант кафедры ССМТ ИМТЭС,
главный конструктор КБ НИЦС

³Белоусов Виктор Андреевич, аспирант кафедры ССМТ ИМТЭС,
инженер-конструктор КБ НИЦС

^{1,2,3}ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,
Калининград, Россия, e-mail: ¹e.chureev@klgtu.ru; ²dmitrij.romanyuta@klgtu.ru;
³viktor.belousov@klgtu.ru

Определение буксировочной мощности судна является важной задачей на начальных этапах проектирования судна. Имеется несколько подходов к решению этой задачи, но самым практичным и точным – методики оценки сопротивления на основании серий систематических модельных испытаний судов. Современные промысловые суда, особенно малые, имеют специфическую форму корпуса – относительно большую полноту. В данной работе представлены результаты поиска и анализа существующих серий модельных испытаний судов, подходящих для определения буксировочного сопротивления современных промысловых судов. Подтверждена актуальность разработки новой серии модельных испытаний малых промысловых судов с большой полнотой корпуса.

Введение

Согласно исследованиям [1], [2], современные промысловые суда, особенно малотоннажные, обладают обводами с большими значениями коэффициентов полноты. Безразмерные характеристики малых траулеров для работы в Балтийском море находятся в диапазонах, представленных в выражениях (1) – (5):

$$2,30 \leq L/B \leq 3,10; \quad (1)$$

$$2,40 \leq B/T \leq 3,00; \quad (2)$$

$$0,58 \leq \delta \leq 0,70; \quad (3)$$

$$0,72 \leq \varphi \leq 0,75; \quad (4)$$

$$0,80 \leq \beta \leq 0,93; \quad (5)$$

где L – длина судна по ГВл, B – ширина судна по ГВл, T – осадка судна по ГВл, δ – коэффициент общей полноты, φ – коэффициент продольной полноты, β – коэффициент полноты мидель шпангоута.

Типовая форма корпуса современных малых промысловых судов представлена на рисунке 1. Отдельно следует выделить режимы движения таких судов: числа Фруда при движении полным ходом достигают значений 0,40 – 0,45.

Одна из важнейших задач при проектировании подобных судов – определение буксировочных сопротивлений и мощности судна. Наиболее точным способом решения этой задачи является проведение испытаний модели судна в опытовом бассейне. Такие испытания помогают проектировщикам детально отработать и оптимизировать форму корпуса, а также получить значения буксировочного сопротивления с минимальной погрешностью. Однако, необходимо отметить, что модельные испытания нецелесообразно проводить на ранних этапах проектирования судна из-за их достаточно большой трудоемкости и стоимости.

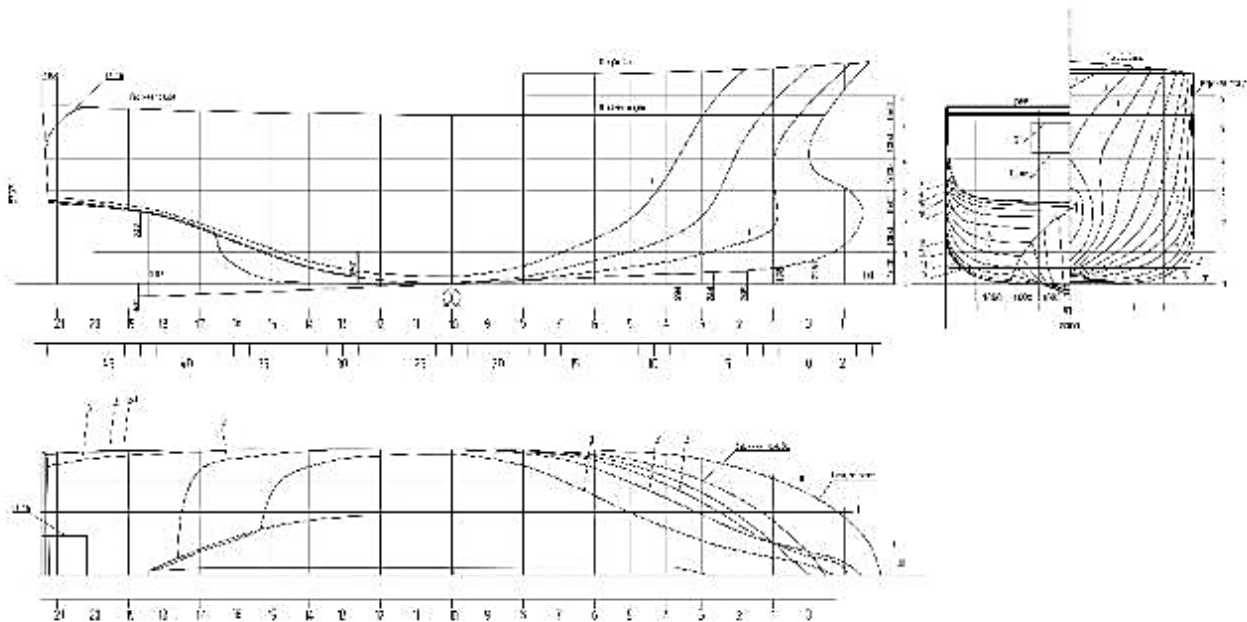


Рис. 1. Типовая форма корпуса современных малых промысловых судов

Помимо непосредственных испытаний модели судна, существуют другие методы, позволяющие определить буксировочное сопротивление и мощность судна [3-5] на ранних этапах проектирования:

1. пересчет буксировочного сопротивления с судна-прототипа. В случае, если обводы проектируемого судна близки к прототипу, то с помощью определенных зависимостей можно определить буксировочное сопротивление и, соответственно, буксировочную мощность;

2. определение буксировочной мощности с помощью «адмиралтейских» коэффициентов. Данный способ является самым простым, и в то же время с наибольшей ошибкой, поскольку подразумевает что все сопротивление судна следует гравитационному закону подобия. Таким образом, вносятся дополнительные ошибки, связанные с неточным определением сопротивления трения;

3. определение буксировочного сопротивления судна методами вычислительной гидродинамики (CFD). Данный метод реализован в таких программных коммерческих продуктах, как «FlowVision», «Femap Flow», «Ansys Fluent» и др. так и в открытых программных продуктах, например, «Open Foam». Использование данного метода требует наличия значительных вычислительных мощностей и высоких компетенций проектировщиков;

4. оценка буксировочного сопротивления на базе серийных испытаний моделей судов (серии 60, 63, 64, Тейлора, Ерошина, Штумпфа и т.д.). Этот метод относится к классу графо-аналитических, поскольку помимо выполнения непосредственных расчетов, часть значений необходимо снимать с графиков, полученных по результатам испытаний моделей судов. Использование данного метода ограничивается формой корпусов моделей и их основных геометрических параметров;

5. определение буксировочного сопротивления с помощью уравнений, полученных методом регрессионного анализа результатов модельных испытаний и статистических данных (метод Оортмерсена, Холтропа-Менона, Скотта и др.). В рамках данного метода эмпирические данные, полученные по результатам модельных испытаний или на базе статистики, представляются в виде уравнений, которые с достаточной точностью позволяют определить значение буксировочной мощности или сопротивления.

Среди вышечисленных методов, наиболее доступный – метод оценки буксировочного сопротивления судна по серийным испытаниям моделей судов, так как он сочетает в себе необходимую точность, скорость вычислений, не зависит от судов-прототипов и не требует существенных вычислительных ресурсов и умений работы в специализированном программном обеспечении.

Цель работы

Целью настоящей работы является проведение углубленного поиска, анализ и систематизацию доступной информации по серийным испытаниям моделей рыбопромысловых судов, с предоставлением исходных материалов, для оценки буксировочного сопротивления на ранних этапах проектирования, а также возможность использования этих серий к современным промысловым судам.

Общедоступные серии модельных испытаний судов и методы определения буксировочного сопротивления

Ранее, различными авторами уже предпринимались попытки по систематизации доступной информации по серийным испытаниям моделей рыбопромысловых судов. Войткунский Я.И. [3] обобщил информацию по модельным серийным испытаниям различных типов судов: рыболовных, транспортных, грузовых и быстроходных. Применительно к судам рыбопромыслового флота, Я.И. Войткунский приводит данные по серии Ерошина, для больших рыболовных траулеров, а также среднетоннажных и малых рыбопромысловых судов.

Злыгостевым Д.В, Чурековым Е.А., Николаевым И.И. и Батуевым А.Д. [2] была произведена попытка выполнить обзор различных методов определения буксировочного сопротивления на ранних этапах проектирования, включая модельные серийные испытания и регрессионные анализы. Из представленной авторами информации, применительно к судам рыбопромыслового флота, можно выделить серии Ерошина, а также метод Ван Ортмерссена [6], базирующийся на регрессионном анализе результатов серийных испытаний 93 моделей буксиров и траулеров, выполненных в опытовом бассейне Института Морских Исследований в Нидерландах.

Molland A.F., Turnock S.R., Hudson D.A [5] достаточно подробно описали все выше описанные методы расчета буксировочного сопротивления судов. Из модельных серийных испытаний представлен большой перечень более 30 различных серий, среди которых только две относятся к рыбопромысловым судам – серия BSRA и серия Ridgeley-Nevitt. Кроме того, представлена информация по регрессионным анализам различных серийных испытаний, включая метод Оортмерссена.

Saral D, E. Kose [7] представили ретроспективный обзор развития турецкого рыбопромыслового судостроения с информацией по модельным испытаниям типовых форм корпуса. Подробно описана серия ITU, в рамках которой выполнено исследование мореходных качеств рыболовных турецких судов.

Е.В. Маслюк [8] сделал выборку всех известных на тот момент способов расчета сопротивления и оценки мощности при проектировании судов. В статье автор рассмотрел серийные испытания моделей судов различного типа и назначения: транспортных, рыболовных, пассажирских, грузовых и скоростных судов, катамаранов, спасательных шлюпок и т.д. Кроме того в статье упоминаются методы оценки буксировочного сопротивления с помощью адмиралтейских коэффициентов и регрессионных анализов.

В данной работе выполнена попытка обобщить информацию по всем серийным испытаниям моделей именно рыбопромысловых судов, представленных в открытом доступе. По всем сериям указаны источники, в которых можно найти графический материал, необходимый для расчета буксировочного сопротивления. По некоторым сериям результаты испытаний представлены в открытом доступе по ссылке¹. Материалы и работы, касающиеся вопроса регрессионного анализа серийных испытаний, не рассматривались.

Перечень рассмотренных серийных испытаний моделей рыбопромысловых судов представлен в таблице 1. В таблице 2 представлено описание варьируемых характеристик.

¹<https://disk.yandex.ru/d/KB2puZ8b1fFsaQ>

Перечень серий испытаний моделей судов с варьируемыми характеристиками

№ п/п	Наименование серии	Варьируемые характеристики и пределы их изменения	Источник
1	Серия среднетоннажных промысловых судов Ерошина	$0,55 \leq \varphi \leq 0,70$ $3,50 \leq L_{pp}/B \leq 5,0$ $2,30 \leq B/T \leq 3,20$ $0,65 \leq \beta \leq 0,92$ $-0,03 \leq x_c/L_{pp} \leq 0,01$ $0,21 \leq Fr \leq 0,37$	[3], [9]
2	Серия малых промысловых судов Ерошина	$0,50 \leq \varphi \leq 0,72$ $2,50 \leq L_{pp}/B \leq 3,50$ $2,60 \leq B/T \leq 4,00$ $0,75 \leq \beta \leq 0,92$ $-0,05 \leq x_c/L_{pp} \leq -0,01$ $0,10 \leq Fr \leq 0,50$	[3], [10]
3	Серия больших рыболовных траулеров Ерошина	$0,60 \leq \varphi \leq 0,76$ $5,00 \leq L_{pp}/B \leq 7,00$ $2,30 \leq B/T \leq 3,20$ $0,833 \leq \beta \leq 0,980$ $-0,03 \leq x_c/L_{pp} \leq 0,02$	[3], [11]
4	Серия Ридглей-Невитта	$4,0 \leq L/B \leq 5,2$ $0,55 \leq \varphi \leq 0,70$ $0,70 \leq v/\sqrt{L}, [(м/с)/\sqrt{м}] \leq 1,50$ $200 \leq V/(0,01 * L)^3 \leq 500$	[12 - 15]
5	Серия Дауста	$4,40 \leq L/B \leq 5,80$ $2,00 \leq B/T \leq 2,60$ $0,81 \leq \beta \leq 0,91$ $0,60 \leq \varphi \leq 0,70$ $5^\circ \leq \frac{1}{2} \alpha_e \leq 30^\circ$	[16], [17]
6	Серия BSRA	$2,00 \leq B/T \leq 2,75$ $0,823 \leq \beta \leq 0,887$ $4,35 \leq L/\sqrt[3]{V} \leq 5,1$	[18-21]
7	Серия ИТУ	$3,23 \leq L/B \leq 5,05$ $2,00 \leq B/T \leq 3,33$ $0,342 \leq \delta \leq 0,581$ $0,527 \leq \varphi \leq 0,688$ $0,600 \leq \beta \leq 0,911$	[7], [22], [23]
8	Серия UBC	$2,6 \leq L/B \leq 3,98$ $2,0 \leq B/T \leq 4,23$ $0,45 \leq \varphi \leq 0,61$ $0,747 \leq \beta \leq 0,878$ $3,00 \leq L/\sqrt[3]{V} \leq 5,31$ $0,20 \leq Fr \leq 0,50$	[24-26]
9.1	Серия Сунда (1 группа; L=12м)	$2,9 \leq L/B \leq 3,1$ $B/T = 3,50$ $0,40 \leq \delta \leq 0,43$ $0,58 \leq \varphi \leq 0,63$ $0,67 \leq \beta \leq 0,74$ $30^\circ \leq \frac{1}{2} \alpha_e \leq 34^\circ$ $L/\sqrt[3]{V} = 3,68$	[27]
9.2	Серия Сунда (2 группа; L=20 м)	$2,17 \leq B/T \leq 2,59$ $2,54 \leq L/B \leq 3,58$ $0,40 \leq \delta \leq 0,476$ $0,54 \leq \varphi \leq 0,65$ $0,68 \leq \beta \leq 0,76$ $28^\circ \leq \frac{1}{2} \alpha_e \leq 36^\circ$ $L/\sqrt[3]{V} = 3,97$	[27]
9.3	Серия Сунда (3 группа; L=30м)	$4,17 \leq L/B \leq 4,55$ $2,1 \leq B/T \leq 2,5$	[27]

№ п/п	Наименование серии	Варьируемые характеристики и пределы их изменения	Источник
		$0,47 \leq \delta \leq 0,495$ $0,62 \leq \varphi \leq 0,655$ $0,75 \leq \beta \leq 0,762$ $25^\circ \leq \frac{1}{2} \alpha_e \leq 37^\circ$ $L/\sqrt[3]{V} = 4,48$	
9.4	Серия Сунда (4 группа; L=39м)	$4,5 \leq L/B \leq 5,34$ $2,01 \leq B/T \leq 2,47$ $0,43 \leq \delta \leq 0,51$ $0,593 \leq \varphi \leq 0,625$ $0,72 \leq \beta \leq 0,80$ $20^\circ \leq \frac{1}{2} \alpha_e \leq 27^\circ$ $L/\sqrt[3]{V} = 4,89$	[27]
10	Серия Акатсуки	$0,57 \leq \varphi \leq 0,66$ $0,68 \leq \beta \leq 0,73$ V $4,6 \leq \frac{V}{(0,1L)^3} \leq 5,8$ $3,6 \leq B/T \leq 4,2$ $0,14 \leq Fr \leq 0,48$	[28]
11	Серия Ганоса	$0,615 \leq \varphi \leq 0,611$ $2,67 \leq L/B \leq 3,61$ $3,54 \leq B/T \leq 4,58$ $0,722 \leq \beta \leq 0,743$ $-0,0212 \leq x_c/L_{pp} \leq 0,0162$ $4,19 \leq L/\sqrt[3]{V} \leq 4,66$ $0,15 \leq Fr \leq 0,30$	[29]
12	Серия Во Ван Чака	$0,16 \leq Fr \leq 0,38$ $3,0 \leq L/B \leq 4,5$ $2,50 \leq B/T \leq 4,0$ $0,468 \leq \delta \leq 0,591$ $0,56 \leq \varphi \leq 0,68$ $\beta = 0,87$	[30]
13	Серия Маслока	$0,24 \leq Fr \leq 0,50$ $3,4 \leq L/B \leq 4,16$ $2,4 \leq B/T \leq 3,60$ $0,56 \leq \varphi \leq 0,65$ $0,476 \leq \delta \leq 0,553$ $\beta = 0,851$	[31]

Таблица 2

Описание варьируемых характеристик

Обозначение характеристики	Название характеристики
φ	Коэффициент продольной полноты
L_{pp}	Длина судна между перпендикулярами
B	Ширина судна
T	Осадка судна
β	Коэффициент полноты мидель-шпангоута
x_c	Абсцисса центра величины
Fr	Число Фруда
L	Длина судна
α_e	Угол заострения конструктивной ватерлинии в носу
V	Объемное водоизмещение
v	Скорость

Серия среднетоннажных промысловых судов Ерошина. Серия состоит из пяти связанных между собой групп моделей, базирующихся на форме корпуса, представленной на рисунке 1. Систематическая серия моделей разработана на основе статистических данных среднетоннажных рыболовных судов в 1964-1969 гг. Методика экспериментальных исследований предполагала получение зависимости коэффициента остаточного сопротивления от относительной скорости, а также исследование влияния геометрических характеристик формы корпуса на коэффициент остаточного сопротивления.

Серия малых промысловых судов Ерошина. Серия разработана для определения зависимостей между геометрическими параметрами корпусов малых промысловых судов и их гидродинамическими характеристиками. В рамках серии модели испытывались с учетом движительно-рулевого комплекса, состоящего из гребного винта, направляющей насадки и стабилизатора. Таким образом, в процессе испытаний дополнительно проводилось исследование коэффициентов взаимодействия между движителем и корпусом судна. Типовая форма корпуса модели представлена на рисунке 2.

Серия больших рыболовных траулеров Ерошина. Серия состоит из пяти связанных между собой групп моделей, базирующихся на форме корпуса, представленной на рисунке 3. Модели испытывались с учетом двух вариантов движительно-рулевого комплекса: гребной винт - руль и гребной винт - направляющая насадка - руль. Исследования проводились для установления зависимостей коэффициентов остаточного сопротивления, попутного потока, засасывания и влияния корпуса от его относительных геометрических параметров.

Серия Риджли-Невитта (Уэбб) (Ridgeley-Nevitt (WEBB)). Данные исследования были выполнены в институте Уэбба (Webb Institute), расположенного в Нью-Йорке, США. В некоторых источниках наименование серии имеет имя организации, в которой она появилась, т.е. серия Уэбба. Изначально данная работа позиционировалась, как исследование судов с коэффициентом продольной полноты $\varphi = 0,65$ и отношением $V/(0,01 * L)^3 = 300$, а также отношением $B/T = 2,29$. Позже границы исследований данной серии были расширены и приведены в таблице 1. Типовая форма моделей серии показана на рисунке 4.

Серия Дауста (Doust, NPL). Данные исследования были выполнены в Национальной физической лаборатории (National Physical Laboratory) на 130 моделях судов с типовой формой корпуса, представленной на рисунке 5.

Серия BSRA (British Ship Research Association - Британская Ассоциация Судовых Исследований). Серия траулеров BSRA была опубликована в наборе из трех статей в 1960-х и 1970-х годах на основе экспериментов по испытаниям моделей, проведенных в опытовом бассейне для Британской Исследовательской Ассоциации Судостроения для определения влияния на сопротивление воды движению судна, изменения соотношения ширины к осадке и других коэффициентов (полноты мидель-шпангоута и относительного удлинения). Типовая форма корпуса моделей серии представлена на рисунке 6.

Серия ITU. Серия модельных испытаний турецких промысловых судов, выполненная в опытовом бассейне Стамбульского Технического Университета (Istanbul Technical University). В 1970-1980-х гг. профессор Кемали из Стамбульского Технического Университета обосновал необходимость доработки традиционных турецких рыбопромысловых судов. В рамках проекта «Разработка форм рыболовных судов, подходящих для турецких вод», профессором была разработана новая форма корпуса (см. рисунок 7) и проведены систематические серийные испытания.

Серия UBC. Данная серия основана на результатах испытаний 13 моделей судов с относительно малыми значениями L/B и $L/\sqrt[3]{V}$ в опытовом бассейне университета Британской Колумбии (UBC). В качестве базовых судов были выбраны сейнеры и траулеры, характерных для Западного побережья США. Типовая форма корпуса судов показана на рисунке 8.

Серия Сунда (Sund). Серия промысловых судов, проведенная в опытовом бассейне г. Тронхейм (Норвегия). Данная серия основана на испытании 4-х групп судов: 40 футов (12 метров); 65 футов (19,7 м); 100 футов (30 м) и 130 футов (39,12 м). В процессе испытаний выполнялись исследования влияния величины угла между КВЛ и ДП, отношения длины к ширине судна, отношения ширины к осадке судна на сопротивление при практически неизменном относительном удлинении. Типовая форма корпуса испытываемых моделей серии показана на рисунке 9.

Серия Акатсуки. Акатсуки – модификация традиционного японского рыболовного судна Ямато, разработанная в лаборатории рыболовных судов Японского агентства по рыболовству. Испытания проводились на серии из 4 судов с типовой формой корпуса, представленной на рисунке 10.

Серия Ганоса. Серия Джорджа Ганоса (George C. Ganos) была представлена в рамках докторской диссертации в Афинском политехническом университете в 1988 г. В рамках диссертации проведены серийные испытания моделей традиционных греческих рыболовных судов типа «Трехантери» («Trehantiri»), с формой корпуса, показанной на рисунке 11. В рамках серии испытаны 3 модели с варьируемыми характеристиками формы корпуса. Также проведено исследование по взаимодействию корпуса судна и движительно-рулевого комплекса.

Серия Во Ван Чака. В статье рассматривается серия испытаний вьетнамских рыболовных парусно-моторных судов с формой корпуса, представленной на рисунке 12. Испытания проводились на 32 моделях судов. Результаты испытаний представлены в виде графиков удельного остаточного сопротивления в зависимости от числа Фруда и геометрических характеристик формы корпуса.

Серия Маслюка Е.В. В 1975-1977 гг. в отраслевой лаборатории гидромеханики промысловых судов КТИРПиХ были проведены испытания систематической серии моделей малотоннажных промысловых судов с упрощенными обводами. Типовая форма корпуса представлена на рисунке 12.

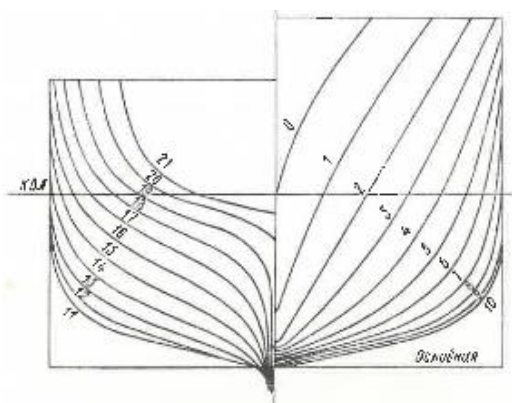


Рис. 1. Типовая форма корпуса моделей среднетоннажных судов Ерошина

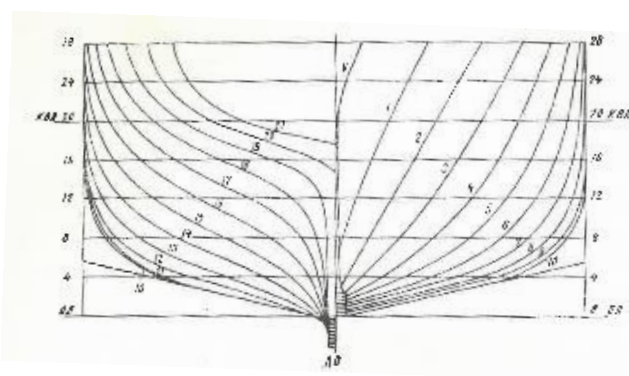


Рис. 2. Типовая форма корпуса моделей малых промысловых судов Ерошина

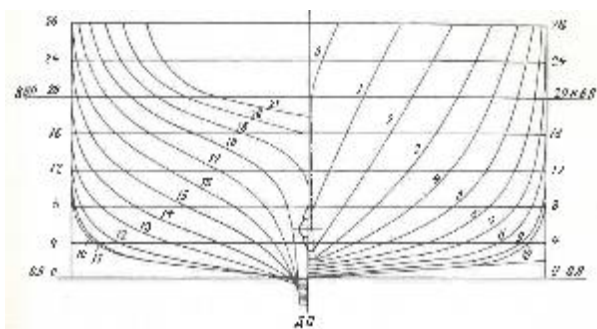


Рис. 3. Типовая форма корпуса моделей больших траулеров Ерошина

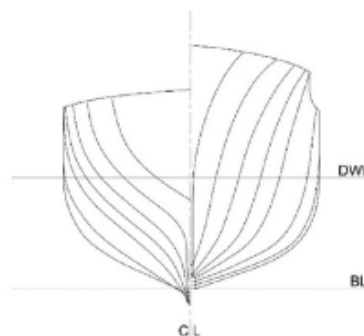
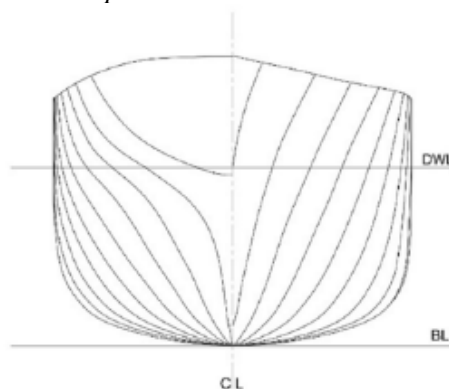
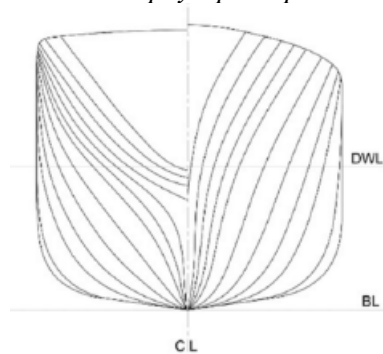


Рис. 2. Типовая форма корпуса моделей серии Риджли-Невитта



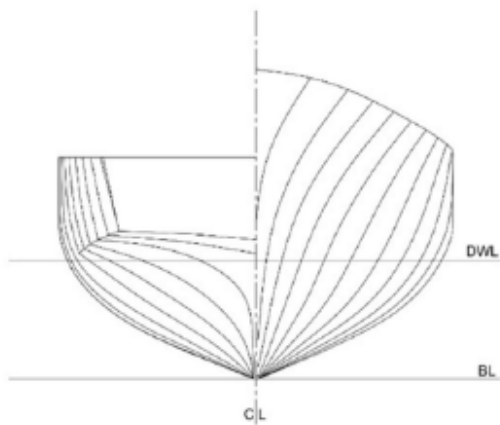


Рис. 7. Типовая форма корпуса моделей серии ИТУ

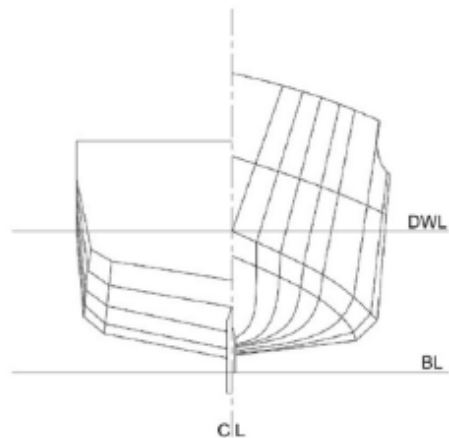


Рис. 8. Типовая форма корпуса моделей серии UBC

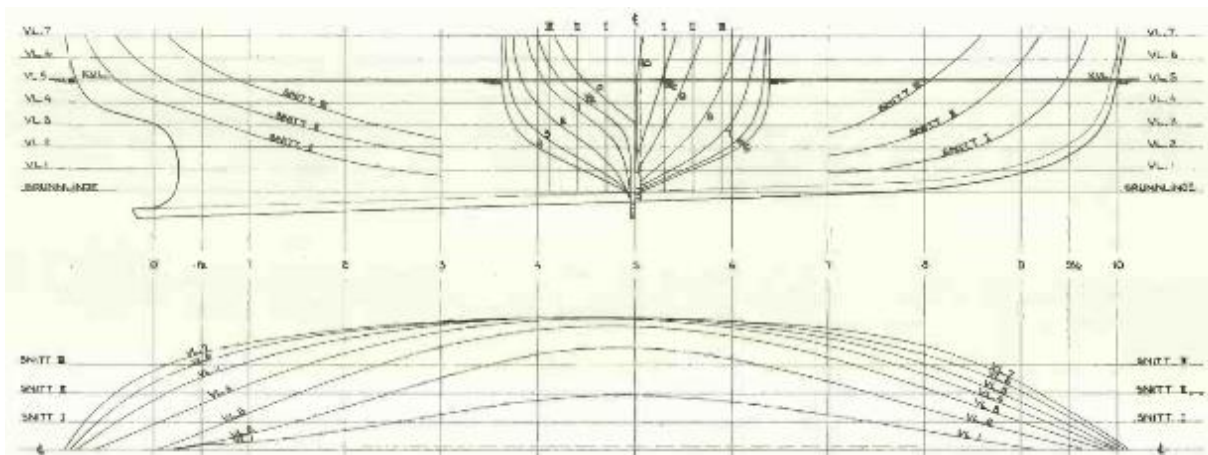


Рис. 9. Типовая форма корпуса моделей серии Сунда

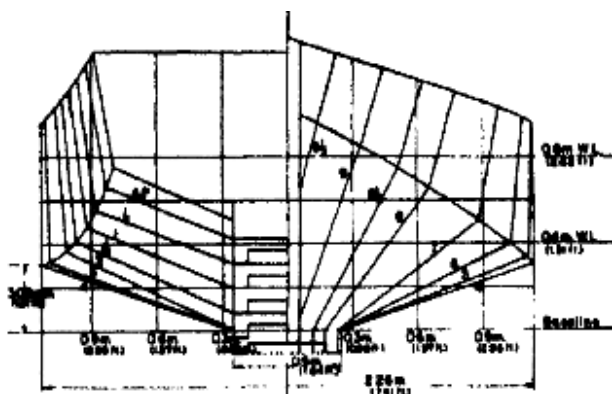


Рис. 10. Типовая форма корпуса моделей серии Акатсуки

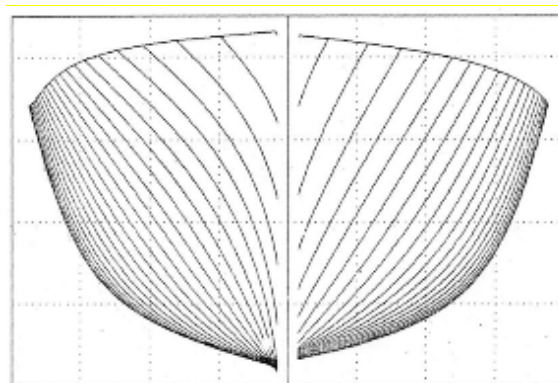


Рис. 11. Типовая форма корпуса моделей серии Ганоса

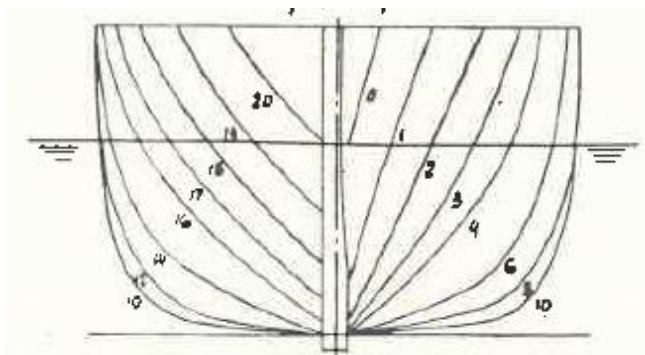


Рис. 12. Типовая форма корпуса моделей серии Во Ван Чака

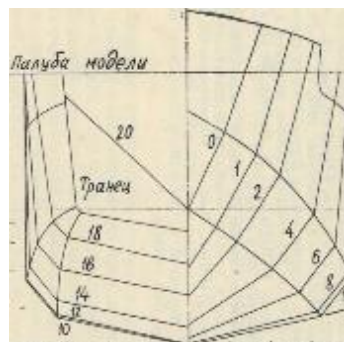


Рис. 13. Типовая форма корпуса моделей серии Е.В. Маслюка

Возможность применения вышеуказанных методик к современным промысловым судам

С целью оценки возможности применения вышеуказанных методов (серий) для определения буксировочного сопротивления современных малых промысловых судов, был выполнен анализ соответствия диапазонов серий по основным характеристикам: отношению длины к ширине судна (L/B); отношению ширины к осадке судна (B/T); коэффициенту полноты мидель-шпангоута (β) и коэффициенту продольной полноты (ϕ). Для наглядности, результаты анализа представлены в таблице 3.

Таблица 3

Соответствие характеристик современных малых промысловых судов рассматриваемым методам (сериям)

№ п/п	Наименование серии				L/B	B/T	β	ϕ
1	Серия среднетоннажных промысловых судов Ерошина				-	+	+	-
2	Серия малых промысловых судов Ерошина				+/-	+/-	+	-
3	Серия больших рыболовных траулеров Ерошина				-	+	+/-	+
4	Серия Ридглей-Невитта				-	?	?	-
5	Серия Дауста				-	+	+/-	-
6	Серия BSRA				?	+/-	+/-	?
7	Серия ITU				-	+	+	-
8	Серия UBC				+/-	+	+/-	-
9.1	Серия Сунда (1 группа; L=12м)				+/-	-	-	-
9.2	Серия Сунда (2 группа; L=20 м)				+/-	+/-	-	-
9.3	Серия Сунда (3 группа; L=30м)				-	+/-	-	-
9.4	Серия Сунда (4 группа; L=39м)				-	+/-	-	-
10	Серия Акатуки				?	-	-	-
11	Серия Ганоса				+/-	-	-	-
12	Серия Во Ван Чака				-	+/-	+/-	-
13	Серия Маслока				-	+	+/-	-
+	Входит в диапазон	+/-	Частично входит в диапазон	-	Не входит в диапазон	?	Невозможно определить	

В результате анализа возможности применимости уже созданных и опубликованных методов (серий) оценки буксировочного сопротивления и буксировочной мощности при разработке современных промысловых судов на ранних этапах проектирования, можно сделать отрицательное заключение. Причиной является несоответствие либо диапазона применимости методов, либо явное отличие формы корпуса от серийно испытанных моделей судов. В частности, форма корпуса моделей испытанных судов, в рамках вышеуказанных серий, характеризуются отсутствием носового бульба, что является практически обязательным атрибутом у современных промысловых судов [1]. Также обращает внимание несоответствие диапазонов изменений коэффициентов продольной полноты у абсолютного большинства серий.

Как следствие, вопрос разработки новой серии малых промысловых судов с большой полнотой корпуса, по-прежнему является актуальным [2].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чуреев Е.А. Разработка концепции и технико-экономическое обоснование характеристик универсального рыболовного траулера для прибрежного рыболовства в Балтийском море: автореф. дис. канд. тех. наук. – Калининград., 2023. – 24 с.

2. Обоснование необходимости создания методики определения буксировочного сопротивления малых промысловых судов / Д.В. Злыгостев, Е.А. Чуреев, И.И. Николаев, А.Д. Батуев // Балтийский морской форум: материалы VII Международного Балтийского морского форума: в 6 т., Калининград, 07–12 октября 2019 года. Том 2. – Калининград: Калининградский государственный технический университет, 2019. – С. 84-93.

3. 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.
4. Molland F.A. The Maritime Engineering Reference Book: A Guide to Ship Design, Construction and Operation: 1st Edition. – Elsevier Ltd, 2008 – 902 p.
5. Molland F.A., Turnock S.R., Hudson D.A. Ship Resistance and Propulsion. Practical Estimation of Propulsive Power: 2nd edition. - Cambridge University Press, 2011 – 595 p.
6. Van Oortmerssen, G. A Power Prediction Method and Its Application to Small Ships. International Shipbuilding Progress, November 1971, p. 397-415.
7. Saral, D, Kose E. Academic Studies on Fishing Vessels in Turkey // Ocean Engineering. – 2024. - №308. – 1-17 pp.
8. Приближенные способы расчета сопротивления и оценки мощности при проектировании судов / Е.В. Маслюк // Труды «Мореходные качества промысловых судов», выпуск № 61. – Калининград, 1977 – С. 77-78
9. Влияние относительных параметров формы корпуса на сопротивление среднетоннажных промысловых судов / В.А. Ерошин // Научно-технический сборник «Вопросы судостроения». Проектирование судов, серия №1, часть №1. – Санкт-Петербург, 1972 – С. 5-12.
10. Исследование характеристик ходкости малых промысловых судов / В.А. Ерошин // Научно-технический сборник «Вопросы судостроения». Серия «Проектирование судов», выпуск №8. – Санкт-Петербург, 1975 – С. 29-37.
11. Гидродинамические характеристики больших рыболовных траулеров / В.А. Ерошин // Научно-технический сборник «Вопросы судостроения». Серия «Проектирование судов», выпуск №8. – Санкт-Петербург, 1975 – С. 16-28.
12. Ridgely-Nevitt, C. The Resistance of Trawler Hull Forms of 0.65 Prismatic Coefficient. Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, Vol. 64, 1956, pp. 443–468.
13. Ridgely-Nevitt, C. The Development of Parent Hulls for a High Displacement Length Series of Trawler Forms. Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, Vol. 71, 1963, pp. 5–30.
14. Ridgely-Nevitt, C. The Resistance of a High Displacement-Length Ratio Trawler Series. Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, Vol. 75, 1967, pp. 51–78.
15. R. A. Claytor, L. Eareckson, J.R. Wilkins. The Resistance of Trawler Hull Forms of Various Displacement-Length Ratios at 0.65 Prismatic Coefficient. – Webb Institute of Naval Architecture, New York, 1956. 47 p.
16. Doust D.J., O'Brien T.P. Resistance and Propulsion of Trawlers. - North East Coast Institution of Engineers and Shipbuilders, 1959. – 436 p.
17. Zborowski, A. Opor Opretu. Przyblzone Metody Obliczania Oporu. Czesc 2. - Gdansk, 1973, 128 p.
18. Pattullo, R.N.M. and Thomson, G.R. The BSRA Trawler Series (Part I). Beam-Draught and Length-Displacement Ratio Series, Resistance and Propulsion Tests. Transactions of the Royal Institution of Naval Architects, Vol. 107, 1965, pp. 215–241.
19. Pattullo, R.N.M. The BSRA Trawler Series (Part II). Block Coefficient and Longitudinal Centre of Buoyancy Variation Series, Resistance and Propulsion Tests. Transactions of the Royal Institution of Naval Architects, Vol. 110, 1968, pp. 151–183.
20. Thomson, G.R. and Pattullo, R.N.M. The BSRA Trawler Series (Part III). Block Coefficient and Longitudinal Centre of Buoyancy Variation Series, Tests with Bow and Stern Variations. Transactions of the Royal Institution of Naval Architects, Vol. 111, 1969, pp. 317–342.
21. Pattullo, R.N.M. The Resistance and Propulsion Qualities of a Series of Stern Trawlers. Variation of Longitudinal Position of Centre of Buoyancy, Beam, Draught and Block Coefficient. Transactions of the Royal Institution of Naval Architects, Vol. 116, 1974, pp. 347–372.
22. Kafalı, K., Saylan, O., Salcı, A., 1979. Developing of Hull Forms of Fishing Boats Suitable For Turkish Waters. The Scientific & Technological Research Council of Turkey, Istanbul, Turkey. Project No. G-416.
23. Kafalı, K. 1980. Study of Hull Forms of Fishing Boats (in Turkish), Ship Institute of ITU, Number 25, Istanbul, Turkey.

24. Aydın, M., Salcı, A., 2008b. Resistance Characteristics of Fishing Boats Series of ITU. Mar. Technol. 45 (4), 194–210.
25. Çalısıl M.S., McGreer D., 1993. A Resistance Study on a Systematic Series of Low L/B Vessels. Mar. Technol. 30 (4), 286–296.
26. Calısal M. S., Mikkelsen, J., D. McGreer. "Resistance Tests with UBC Series Fishing Vessels." Paper presented at the SNAME 23rd American Towing Tank Conference, New Orleans, Louisiana, USA, June 1992
27. Sund.A. Modellforsok med fiskefartoyer. Del. IV. – Skipsmodelltankens Meddelelse Nr.38. - 1954, 167 p.
28. Otsu Y., Yokoyama N., Kobayashi T. Model Tests of Small Simplified Boats // Fishing Boats of the World. – 1960. – Vol. 2. – 348-352 pp.
29. Ganos G.C. Methodical Series of Traditional Greek Fishing Boats: diss...doctor of engineering. – Athens, 1988 – 259 p.
30. Во Ван Чак. Серийные испытания 32 моделей вьетнамских рыболовных парусно-моторных судов и приближенный способ расчета их буксировочного сопротивления. Тр. КТИРПиХ, вып. 37. Калининград, 1972. – С.33-62
31. Маслюк Е.В. Расчет сопротивления малотоннажных промысловых судов с упрощенными обводами // Тр. КТИРПиХ «Мореходность судов», вып. 93. Калининград, 1981. – С.81-126

REVIEW OF METHODS FOR PREDICTING THE TOWING RESISTANCE OF FISHING VESSELS BASED ON MODEL SERIES TESTS AT THE EARLY STAGES OF DESIGN

¹Chureev Evgeniy Andreevich, PhD in Technical Sciences,
Director of Shipbuilding Research Center

²Romanyuta Dmitriy Alexandrovich, Postgraduate student, Chief designer,
Design Bureau of Shipbuilding Research Center

³Belousov Viktor Andreevich, Postgraduate student, design engineer,
Design Bureau of Shipbuilding Research Center

^{1,2,3}Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,
e-mail: ¹e.chureev@klgtu.ru; ²dmitrij.romanyuta@klgtu.ru; ³viktor.belousov@klgtu.ru

Determining the towing capacity of a ship is an important task in the initial stages of ship design. There are several approaches to solving this problem, but the most practical and accurate is the methods of resistance estimation based on a series of systematic modelling tests of vessels. Modern fishing vessels, especially small ones, have a specific hull shape - relatively large fullness. This paper presents the results of search and analysis of existing series of ship model tests suitable for determination of towing resistance of modern fishing vessels. The relevance of developing a new series of model tests for small fishing vessels with large hull fullness is confirmed.

ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ТИПОВОМУ УЧАСТКУ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЛОСКИХ СЕКЦИЙ КОРПУСОВ СУДОВ С УЧЕТОМ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ УСЛОВИЙ ТРУДА

Шевердяев Александр Сергеевич, доцент кафедры судостроения, судоремонта и морской техники

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,
Калининград, Россия, e-mail: sheverd49@gmail.com

Приведены результаты работы по обоснованию требований к типовому участку изготовления плоских секций корпусов судов с учетом производственных элементов условий труда на базе анализов технологии сборки плоских секций по показателям продолжительности выполнения элементов технологических операций, а также энергозатрат исполнителей, посредством введения соответствующих коэффициентов тяжести труда по тому или иному элементу технологических операций сборки плоских секций. Приведенная схема анализа вариантов сборочного процесса с учетом производственных условий труда на основе введения соответствующих коэффициентов тяжести труда по продолжительности и энергозатратам исполнителей позволит более точно обосновать требования к типовому участку изготовления плоских секций корпусов судов с учетом производственных элементов условий труда.

Выявление резервов технологии при разработке требований по сокращению организационно-технологических затрат времени с учетом производственных условий труда при изготовлении секций судовых корпусных конструкций (СКК) является одним из наиболее эффективных путей повышения производительности труда на производственном участке.

В работе нашли отражение результаты анализов продолжительности выполнения элементов сборки и влияния наиболее чувствительных показателей производственных условий труда на продолжительность выполнения технологических комплексов приемов при сборке судовых корпусных конструкций, начатых ранее и нашедших отражение в источниках [4,5].

Изучение структурных составляющих по продолжительности и энергозатратам технологических процессов сборки плоскостных корпусных конструкций-секций корпуса проводилось на базе построения развернутых математических моделях: пример одной из них приведен в источнике [5].

В составе технологического процесса сборки плоских секции на производственном участке анализировались технологические комплексы приемов типовых и сборочных операций: сборка базового полотнища, установка деталей и узлов набора, частично нашедших отражение в источнике [5].

За рассматриваемый период исследований анализировалось влияния на продолжительность технологических приемов (комплексов приемов) первых трех психофизиологических производственных элементов, выделенных выше [4], включая условия труда.

Для оценки продолжительности элементов операций при сборке и сварке плоских секций были выделены основные технологические комплексы приемов – ТКП 1, ТКП 2, ТКП 4, ТКП 5, ТКП 6, включающие оперативное (основное и вспомогательное) время обслуживания рабочего места.

Оценка психофизиологических производственных элементов труда проводилась в баллах в соответствии с [1].

Для технологических комплексов приемов сборочных работ на основе рассмотрения физических динамических нагрузок использовались ранее с определёнными максимальными значениями тяжести труда K_T : для III категории тяжести – 1,03; для IV категории тяжести – 0,111; для V категории тяжести – 0,122; для VI категории тяжести – 0,125.

Увеличенные продолжительности выполнения элемента технологических операций, с учётом тяжести их выполнения, как и ранее [5] для сравнительной оценки принимались в виде коэффициентов тяжести труда, влияющих на продолжительность, $K_{ТП}$ с максимальными значениями: для I и II не устанавливаются; для III категории $K_{ТП3} = 1,08$; для IV категории $K_{ТП4} = 1,16$; для V категории $K_{ТП5} = 1,20$; для VI категории $K_{ТП6} = 1,24$.

Оценка продолжительности элементов операций показали следующее:

ТКП 1 – подача сборочных единиц, оборудования, инструмента и оснастки к месту сборки составляет около 12% от времени сборки полотнища; ТКП 2 – основная ориентация листов и оборудования с их фиксацией около 5% от времени сборки полотнища; ТКП 4 – зачистка под сварку участков кромок составляет соответственно 4%; ТКП 5 – стягивание сопрягаемых кромок листов составляет примерно 30% времени; ТКП 6 – соединение закрепляемых элементов составляет до 20% времени сборки. Остальное время по сборке полотнища, примерно 28%, приходится на подготовительно-заключительное время в начале смены (6%) и потери времени не зависящие от рабочего (18%) и зависящие от рабочего (около 5%).

Распределение времени при сварке полотнища имело следующие средние показатели по технологическим комплексам приемов: ТКП 1 – подача оборудования, материалов и инструмента к месту сварки – примерно 13% времени; ТКП 2 – ориентация сварочного оборудования относительно сопряжения – около 3% времени; ТПЗ 3 – непосредственная сварка соединений листов – 45%; ТКП 4 – очистка сварочных швов и выборочный контроль качества швов – 10% времени. Оставшееся время, примерно 25% приходится на потери времени не зависящие от рабочего 20%, зависящие от рабочего – около 5% и др. затраты времени.

В наблюдениях при сборке набора были те же типовые технологические элементы, что и при сборке полотнища. Наблюдения при сборке (установке) набора показали следующие средние относительные затраты времени по элементам сборочной операции: ТКП 1 – около 10% времени сборки набора; ТКП 2 – около 3%; ТКП 3 – разметка и пригонка сопряжений – 12% времени сборки; ТКП 4 – около 6% времени; ТКП 5 – 25% от сборки; ТКП 6 – 15% времени; ТКП 7 – проверка качества сборки и исправление брака – 5% от времени сборки.

Дополнительно проводились наблюдения процесса сварки набора между собой и приварки к полотнищу относительные затраты времени по соответствующим элементам операции следующие: ТКП 1 – примерно 14% времени; ТКП 2 – около 5% времени; ТКП 3 – 43% времени сварки; ТКП 4 – примерно 8%. Остальное время в процессе сварки набора (30%) приходится на потери времени не зависящие от рабочего (22%), зависящие от рабочего (~5%) и подготовительно-заключительное время в начале смены – около 3% времени сварки.

Проведенный анализ затрат рабочего времени по элементам технологических операций сборки и сварки плоских секций подтвердил в целом результаты ранее проведенных обследований в этом направлении и показал, что организационно-технологические факторы играют существенную роль в продолжительности выполнения сборочно-сварочных работ. Полученные результаты оценки организационно-технологических затрат времени показали необходимость проработки конструктивно-технологических решений и организационных мероприятий, чувствительно влияющих на продолжительность изготовления плоских секций для обоснования требований к производственному участку их сборки и сварки:

1) Оснащение грузоподъемных средств быстрозахватными приспособлениями для подъема деталей, включая крупногабаритные листы;

2) Расположения комплектовочных площадок для деталей и узлов непосредственно с участком сборки секций;

3) Сокращение времени поиска маркировки деталей на местах предварительного складирования;

4) Предусмотрение установки подвижных упоров под наружной обшивкой в местах ее стыковки и в местах закрепления набора;

5) подача набора главного направления в составе 2-3 раскрепленных связей – укрупненных узлов набора;

- 6) Обеспечение приварки одновременно 2-3 связей набора одного направления;
- 7) Обеспечение одновременной сварки набора между собой в месте пересечения;
- 8) Установка над участком сборки секций универсальных транспортно-грузоподъемных устройств для обеспечения подачи сборочного и сварочного оборудования и деталей в рабочую зону с целью исключения ручного труда рабочих;
- 9) Оснащение сварочных автоматов (полуавтоматов) следящими устройствами для обеспечения равномерного зазора в месте сварки;
- 10) Обеспечение процесса сварки газоплавительным устройством;
- 11) Обеспечение рабочего участка формирования секций пылеуловительным устройством;
- 12) Локальное обеспечение места проведения работ нормативной освещенностью;
- 13) Использование погрузочно-транспортных механизмов, включая производственные манипуляторы.

Проработки выделенных организационно-технологических мероприятий позволят сократить производственные и непроизводственные затраты времени до 20% и повысить производительность труда на участках сборки и сварки секций корпусов судов.

Кроме повышения производительности труда при применении вышеперечисленных мероприятий улучшатся условия труда и повысится его привлекательность.

Проведенные анализы компоновок и оснащения участков изготовления СКК на отечественных предприятиях показали:

- компоновка и оснащение этих участков не отвечает требованиям оптимальной планировки, сокращающей необходимые переходы рабочих и перемещения оборудования;
- сборочное оборудование участков имеет малую универсальность, что снижает его эффективность;
- отсутствует оборудование и средства механизации для выполнения ряда основных и вспомогательных работ;
- недостаточное использование универсальных подъемно-транспортных средств и отсутствие использования производственных манипуляторов.

В ходе проведенных проработок по продолжительности технологических операций и их элементов при сборке и сварке СКК, а также энергозатрат рабочих были определены основные организационно-технологические мероприятия повышения эффективности процессов сборки и сварки на производственных участках изготовления плоских секций.

Для разработки рекомендаций по оснащению типового участка по изготовлению плоских секций корпусов судов в первую очередь следует рассматривать следующие организационно-технические мероприятия, обеспечивающие повышение производительности труда на участке изготовления СКК:

- принципиальная схема компоновки участка изготовления плоских секций с оптимальным расположением расходных площадок;
- оснащение участков подвижными кранами, кран-балками и производственными манипуляторами для подачи в рабочую зону деталей узлов и средств технического оснащения (СТО);
- оснащение участка изготовления секций подъемными площадками для контейнеров и поддонов;
- оборудование подъемно-транспортного средства двумя сменными модулями со сборочным и сварочным оборудованием;
- применение универсальных механизированных захватов для листов и профильного набора;
- оснащение участка специальными контейнерами для деталей и узлов секций, а также средства технологического оснащения;
- разработка универсальных устройств для обжатия и закрепления листов к оснастке, обжатие и закрепление набора к полотнищу;
- оснащение сварочного автомата датчиком расстояния устойчивого горения дуги;
- оснащение сварочного автомата датчиком слежения за центральной линией сварного шва;

- разработка устройства для дробления и удаления шлака;
- оснащение сварочного автомата всасывающей системой для нерасплавленного флюса и сопутствующих газов.

Обоснование требований по компоновке и оснащению универсального участка изготовления плоских секций позволят оптимизировать планировку участка, его оснащение современными средствами технологического обеспечения и снизить затраты тяжёлого физического труда.

В основу планировки участка должны быть положены следующие основные требования по организации труда:

1. Исключение лишних переходов исполнителей работ.
2. Сокращение до минимума необходимых при работе переходов, включая спуски и подъемы рабочих по трапам.
3. Исключение разворотов сборочных единиц при их подаче к месту установки.
4. Сокращение до минимума перемещений подъемно-транспортного оборудования.

Выводы

1. Выделенные организационно-технические мероприятия по организации и оснащению типового участка изготовления плоских секций корпусов судов позволят обосновать требования по оснащению и организации труда на участке.

2. Использование результатов моделирования технологических процессов изготовления плоских секций с учетом производственных элементов условий труда [5] позволит оптимизировать состав и последовательность выполнения технологических комплексов приемов сборки и сварки плоских секций на производственном участке.

3. На основании требований по оснащению и организации труда на участке сборки секций с учетом производственных условий труда будут разработаны Рекомендации на проектировании производственного участка сборки и сварки плоских секций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Количественная оценка тяжести труда (Межотраслевые методические рекомендации и труда) -: Экономика, 1988, с.120.

2. Иванов А.П., Кожевников В.А., Шевердяев А.С. Результаты исследований технологических операций формирования корпусов судов// Известие КГТУ, №37 Калининград ФГБОУ ВО «КГТУ», 2015, с.211-220.

3. Иванов А.П., Жаровин Д.А., Шевердяев А.С. Разработка технических предложений по повышению производительности труда при изготовлении секций корпусов судов. Отчет о НИР ФГБОУ ВПО «КГТУ» шифр 41.01.1 рег№01201172256 (ФГНУ ЦИТиС) Калининград, 2011, с.81

4. Шевердяев А. С. Оценка влияния производственных элементов условий труда на выбор технологии изготовления секций корпусов судов. Сборник IX Международной научной конференций «Морская техника и технология. Безопасность морской индустрии» г. Калининград. Издательство БГАРФ, 2021, с. 136-142.

5. Шевердяев А. С. Моделирование вариантов изготовления плоских секций корпуса судна с учетом влияния производственных элементов условий труда, Сборник XI Балтийского форума, т.2 XI Национальной конференции с международным участием «Морская техника и технология. Безопасность морской индустрии», Калининград, 2023, с 80-87

SUBSTANTIATION OF REQUIREMENTS FOR A TYPICAL SITE FOR THE MANUFACTURE OF FLAT SECTIONS OF SHIP HULLS, TAKING INTO ACCOUNT THE PRODUCTION ELEMENTS OF WORKING CONDITIONS

Sheverdyayev Alexander Sergeevich, Associate Professor of the Department of Shipbuilding,
Ship Repair and Marine Engineering

Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,
e-mail: sheverd49@gmail.com

The article presents the results of work to substantiate the requirements for a typical site for the manufacture of flat sections of ship hulls, taking into account the production elements of working conditions when analyzing the technology of assembling flat sections in terms of the duration of the elements of technological operations, as well as the energy consumption of performers, produced by introducing appropriate labor severity coefficients for a particular element of the technological operation of assembling a flat section. The given scheme of the analysis of the assembly process options, taking into account the working conditions, based on the introduction of appropriate labor severity coefficients for the duration and energy consumption of performers, will make it possible to more accurately substantiate the requirements for a typical site for the manufacture of flat sections of ship hulls, taking into account the production elements of working conditions.

СЕКЦИЯ «ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ОБЪЕКТОВ МОРСКОЙ ИНДУСТРИИ»

SECTION "ELECTRICAL SYSTEMS OF MARINE INDUSTRY FACILITIES"

УДК 621.313.333

ИЗМЕРЕНИЕ СКОЛЬЖЕНИЯ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

¹Аксенов Анатолий Клавдиевич, инженер кафедры энергетики

²Бочарова Наталья Владимировна, канд. техн. наук, доцент,
доцент кафедры энергетики

^{1,2}ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,
Калининград, Россия, e-mail: ²natalya.bocharova@klgtu.ru

Рассмотрены методы измерения одного из важных эксплуатационных параметров асинхронного электродвигателя – скольжения. Наиболее часто применяемый косвенный метод измерения скольжения имеет ряд недостатков, поэтому предложено устройство для бесконтактного метода определения скольжения, использующее стробоскопический эффект. Данное устройство позволяет определять величину скольжения как при холостом ходе, так и более точно при нагрузке электродвигателя.

Существует большое число различных характеристик электрических машин, которые определяют их эксплуатационные свойства. Некоторые из эксплуатационных характеристик могут быть определены непосредственно из опыта. К таким характеристикам относится величина скольжения асинхронного двигателя, которая является его механической характеристикой. В практике испытания асинхронных двигателей широкое распространение получил контактный метод измерения скольжения. Согласно этому методу вблизи торца вала устанавливается электромагнитный датчик, имеющий обмотку с большим числом витков. Концы обмотки подключаются к гальванометру с двухсторонней шкалой. Существующая небольшая асимметрия воздушного зазора или короткозамкнутой клетки ротора вызывает магнитный поток, проходящий по валу ротора. Этот магнитный поток изменяется с частотой скольжения, при этом в обмотке электромагнитного датчика индуцируется эдс той же частоты. Соответствующее число колебаний совершает стрелка гальванометра. Для определения частоты скольжения необходимо подсчитать число односторонних отклонений стрелки гальванометра за определенный промежуток времени. Время отсчитывается по секундомеру. Тогда частота скольжения асинхронного двигателя :

$$f_s = \frac{m}{t}, \quad (1)$$

где m – число односторонних отклонений стрелки гальванометра;

t – время, в течение которого отклонения стрелки имели место.

При таком методе удается отсчитать частоту скольжения до значений 2 – 2.5 Гц, что соответствует скольжению 5%.

Целесообразно применять стальной или ферритовый сердечник, помещенный внутри обмотки электромагнитного датчика, конец которого приближается к торцу вала.

Если напряжение измерительной обмотки подвести к электронному частотомеру, то можно измерять скольжение, которое необходимо в частности в установках автоматического испытания асинхронных машин.

Косвенный метод определения скольжения асинхронного электродвигателя имеет ряд недостатков:

- инерционность стрелки гальванометра;
- ограничение фиксирующих свойств оператора;
- катушка индуктивности ЭД не реагирует на низкие частоты $f_s < 0.5\text{Гц}$, тем самым не позволяет производить вычисления в режиме холостого хода асинхронного двигателя.

Из числа бесконтактных методов определения скольжения асинхронного двигателя широкое применение получил стробоскопический метод, в котором частота вспышек специальной лампы может регулироваться с точностью $\pm 0.5\%$ (при частотах 2 – 250, 500 Гц.). В стробоскопах имеется система синхронизации вспышек с частотой внешнего напряжения (например, сети питания, генератора с высокостабильной частотой и т.п.), что и позволяет измерить скольжение.

В данной работе предложен стробоскопический измеритель временных интервалов для измерения величины скольжения асинхронных двигателей с синхронными частотами вращения электромагнитного поля 3000, 1500 и 1000 об/мин (рис. 1).

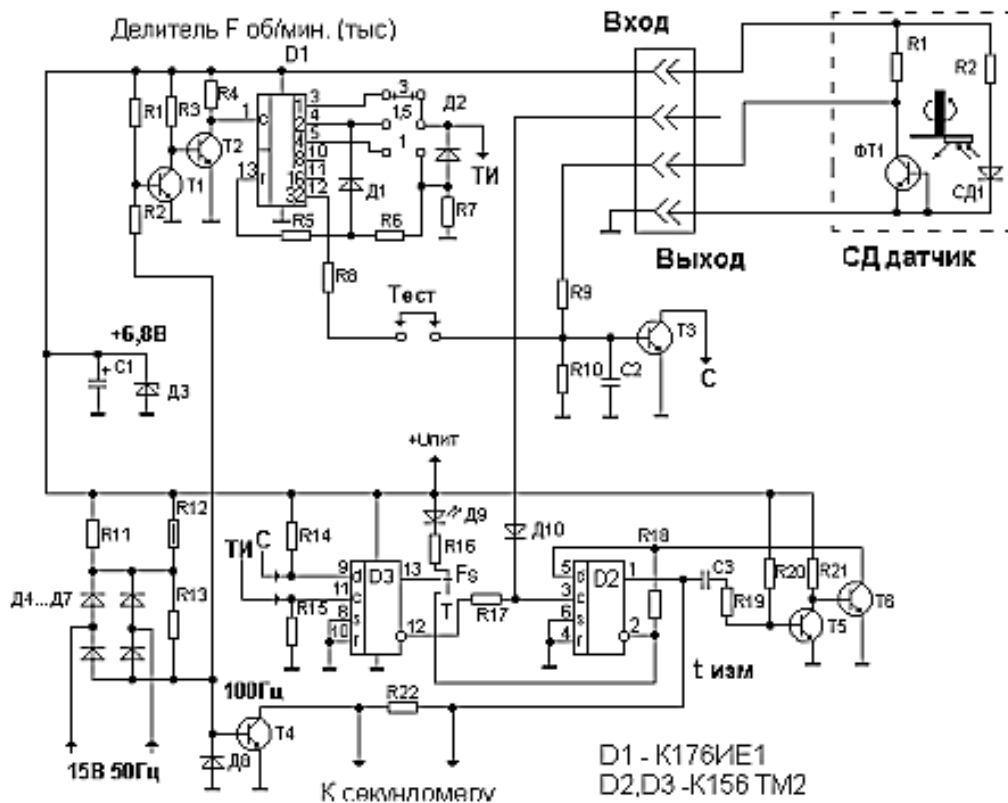


Рис 1. Стробоскопический измеритель временных интервалов

Устройство получает питание от сети 15В, 50Гц., максимальный потребляемый ток 20 мА.

Стробоскопический измеритель состоит из двух частей – светодиодного датчика и электронного стробоскопа.

На валу двигателя размещен диск, на который нанесена светоотражающая полоска. Светодиод, питаемый постоянным током, является источником инфрокрасных импульсов. При вращении диска вместе с валом двигателя импульсы света, отраженные от светоотражающей полоски, попадают на фототранзистор, который и создает импульсы напряжения. Выходной сигнал светодиодного датчика через усилитель-формирователь (R9, C2, T3) передается на вход «d» D-триггера D3, входящего в состав электронного стробоскопа.

Электронный стробоскоп состоит из:

- блока питания (D4 –D7, R11, R12, C1);
- формирователя импульсов с частотой $f = 100\text{Гц}$ (D8, R13) за счет пульсаций тока питания;
- делителя частоты (D1, T1, T2, D1, D2, R1-R7) 3000, 1500, 1000 об/мин;

- непосредственно стробоскопа, состоящего из D-триггера (D3, R14, R15) и счетного D-триггера (D2, R17, R18), выполняющего функцию формирователя интервала времени $t_{изм.}$, равного периоду, подаваемого сигнала на вход «с» D2 и формирователя паузы измерений $t_{п} > 1,5сек$ (T5, T6, R19-R21, C3) для удобства отсчета показаний секундомера.

На вход «с» D-триггера D3 с выхода делителя частоты подаются тактовые импульсы синхронной частоты (частота вращения поля статора). На рис. 2 приведены временные диаграммы работы D-триггера D3: $T1 = 1/f1$; $T2 = 1/f2$; $f2 = f1(1 - S)$; $f_s = f1 - f2$.

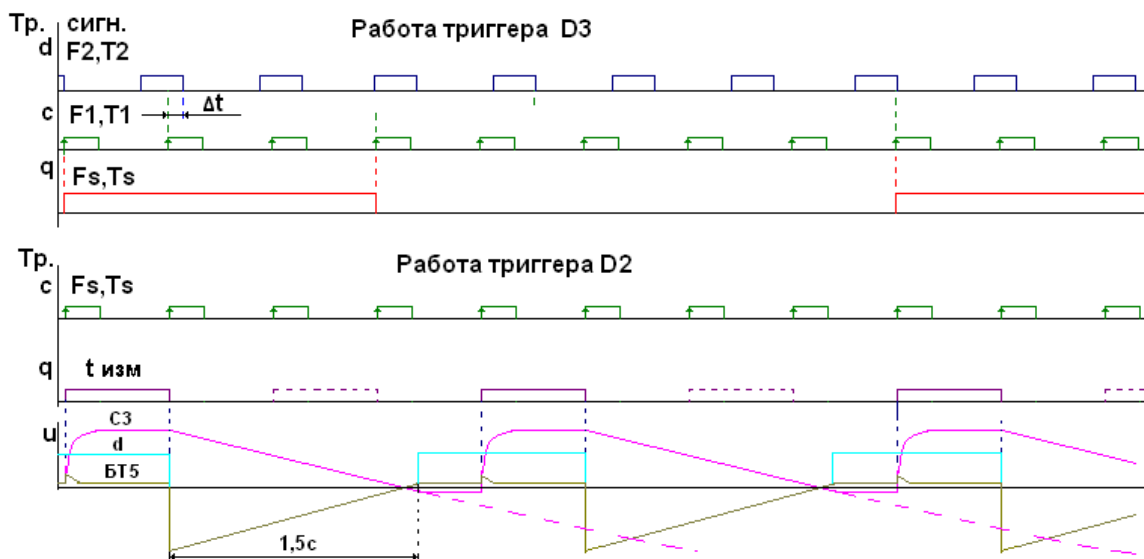


Рис. 2. Временные диаграммы

Работа D-триггера D3 характеризуется тем, что в момент действия тактового импульса осуществляется фиксация (стробирование) логического уровня «1,0» на входе «d» D-триггера D3 и передаче его состояния на его выход q, состояние которого запоминается до прихода следующего тактового импульса. При $T2 > T1$ тактовый импульс с шагом $\Delta t = (T1 - T2)$ как бы «скользит» по всему временному интервалу сигнала $T2$, т.е. время фиксации (стробирования) смещается на величину Δt . Весь период сигнала $T2$ будет отсканирован за время $M = T2 / \Delta t$ шагов, где M – это коэффициент, равный целому числу с точностью ± 1 . Суммарное время фиксации всего периода $T2$:

$$T_s = (M \pm 1) T1 \quad (2)$$

Перейдя к частотам, имеем:

$$f_s = f1 - f2 = \frac{T2 - T1}{T2 T1} \quad (3)$$

Пусть $S_0 = \frac{f_s}{f1} = \frac{T1}{T_s}$, тогда с учетом формулы (2):

$$S = \frac{S_0}{S_0 \pm 1} \quad (4)$$

При $S > S_0$ и $\Delta S = S - S_0$ получим:

$$S = \frac{\Delta S}{S_0} \quad (5)$$

Стробоскопический способ измерения скольжения целесообразен при малых S_0 , поэтому точность измерения $\frac{\Delta S}{S_0} < 10\%$ достижима при $S < 10\%$.

Данный принцип скольжения импульса стробирования применяется в стробоскопических осциллографах при исследовании наносекундных сигналов. При этом ВЧ сигнал как бы растягивается во времени в M раз, что позволяет перейти в низкочастотную область исследований.

Для численного отсчета времени измерения $t_{изм}$ может быть использован 3-х разрядный электронный секундомер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коварский Е.М. Янко Ю.М. Испытание электрических машин. М.: Энергоатомиздат, 2005. 330 с.
2. Алейников, В. В. Измерение величины мгновенного скольжения трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором электропривода буровых установок по параметрам потребляемого им тока (амплитуда и фаза), как основа энергосберегающих режимов его работы» / В. В. Алейников, М. И. Григорьев // Молодые - Научкам о Земле : Тезисы докладов X Международной научной конференции молодых ученых. В 7-ми томах, Москва, 31 марта – 01 2022 года / Редколлегия: Ю.П. Панов, Р.Н. Мустаев. Том 4. – Москва: Российский государственный геологоразведочный университет им. С. Орджоникидзе, 2022. – С. 168-171.
3. Плотников, С. М. Определение критического скольжения асинхронного двигателя / С. М. Плотников, С. П. Плотникова, О. В. Колмаков // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2017. – Т. 60, № 3. – С. 40-44. – DOI 10.17213/0136-3360-2017-3-40-44.
4. Мальгин, Г. В. Испытания электрических машин / Г. В. Мальгин, О. С. Щукин. – Нижневартовск : Нижневартовский государственный университет, 2013. – 132 с.

SLIP MEASUREMENT WHEN STUDYING AN ASYNCHRONOUS MOTOR

¹Aksenov Anatoly Klavdievich, engineer of the Department of Energy

²Bocharova Natalya Vladimirovna, Ph.D., Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Energy

^{1,2}Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,
e-mail: ²natalya.bocharova@klgtu.ru

The article discusses methods for measuring one of the important operational parameters of an asynchronous electric motor - slip. The most commonly used indirect method of measuring slip has a number of disadvantages, so a device for a non-contact method of determining slip using the stroboscopic effect has been proposed. This device allows you to determine the amount of slip both at idle and more accurately when the electric motor is loaded.

СНИЖЕНИЕ УРОВНЯ ПОТЕРЬ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ЗАВОДА «ЯНТАРЬ» С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

¹Белей Валерий Феодосиевич, д-р техн. наук, профессор,
заведующий кафедрой энергетики

²Лысенко Марк Анатольевич, аспирант кафедры энергетики

³Коротких Кирилл Викторович, аспирант кафедры энергетики

^{1,2,3}ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,
Калининград, Россия, e-mail: ¹vbeley@klgtu.ru; ²markklg@mail.ru; ³kirill.korotkikh@klgtu.ru

Приведены некоторые результаты исследований на исходной математической модели потерь активной мощности и возможности компенсации реактивной мощности в системе электроснабжения завода «Янтарь», что может иметь практическую значимость при дальнейшей реструктуризации электротехнического комплекса предприятия. Построение математической модели велось на основе анализа структуры системы электроснабжения предприятия, нагрузкам цеховых подстанций за зимний максимум, годового, недельного и суточного графиков нагрузки на наиболее нагруженной секции системы электроснабжения и подключения в узлах сети источников реактивной мощности. Приведены выражения для нахождения потерь активной мощности и параметров схем замещения кабельных линий и силовых трансформаторов. Предложено целесообразное решение по установке компенсирующего устройства реактивной мощности типа АУКРМ мощностью 225 кВар на нижней стороне 0,4 кВ цеховой подстанции № 3 для компенсации реактивной мощности и снижения потерь активной мощности.

Система электроснабжения завода (Рисунок 1) включает четыре головные секции напряжением 6 кВ, питающие распределительные подстанции, базирующиеся на территории предприятия.

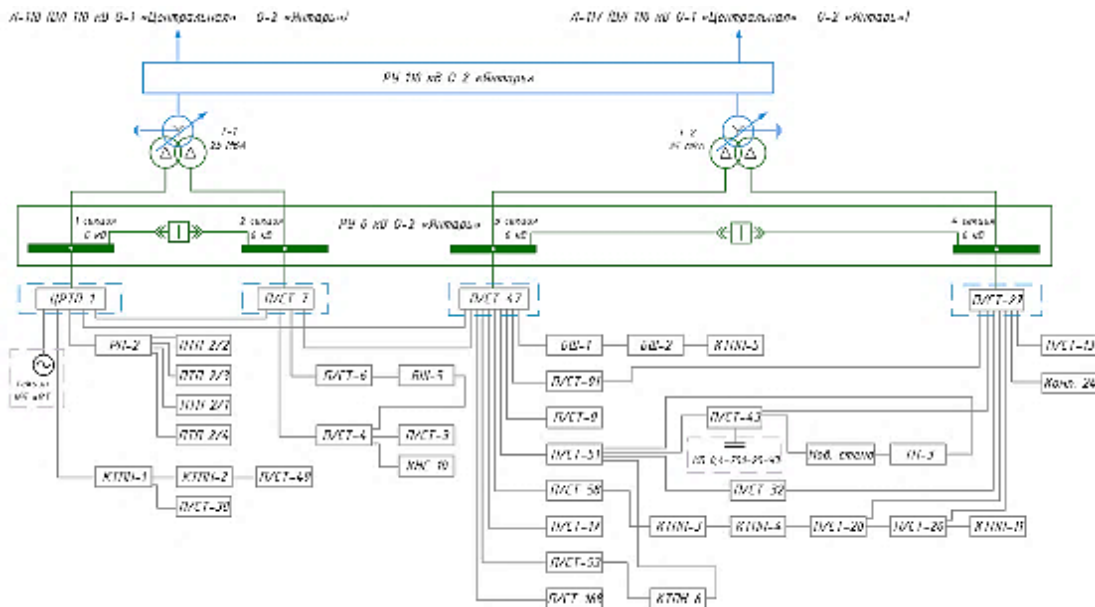


Рис. 1. Структурная схема системы электроснабжения предприятия

Снятие данных по нагрузкам цеховых подстанций за зимний и летний максимум посредством счетчиков электрической энергии СЭТ-4ТМ.03М и их анализ показали, что участок секции 2 напряжением 6 кВ системы электроснабжения объекта морской индустрии является наиболее нагруженным, что видно из таблицы 1.

Снятые данные по нагрузкам подстанций и выбранный для исследования участок

Объект	Нагрузка за зимний период			Рассматриваемый участок системы электроснабжения
	S, кВА	P, кВт	Q, кВАр	
КНС-10	100,68	95,39	32,18	
Подстанция №7	959,95	911,71	300,49	
Подстанция №6	746,22	709,87	230,07	
Подстанция №4	628,48	596,99	196,45	
Подстанция №3	862,02	818,59	270,17	
Подстанция №168	1043,53	995,39	313,30	
Подстанция №53	1445,19	1373,81	448,56	
Подстанция №51	264,06	249,92	85,26	
Подстанция №49	193,56	182,85	63,49	
Подстанция №47	166,49	157,33	54,47	
Подстанция №43	169,55	160,56	54,47	
Подстанция №38	143,75	136,49	45,10	
Подстанция №32	736,68	700,25	228,79	
Подстанция №28	384,70	365,31	120,60	
Подстанция №27	1394,20	1324,59	435,02	
Подстанция №26	921,89	876,16	286,75	
Подстанция №17	191,14	182,13	57,99	
Подстанция №13	278,05	263,90	87,56	
Подстанция №9	12,30	11,66	3,91	
Подстанция новый стенд	1254,85	1154,25	1097,05	
КТПН-11	33,54	30,81	29,09	
КТПН-7	256,19	228,15	216,055	
КТПН-6	219	196	187,32	
КТПН-5	17	12	11,4	
КТПН-4	296,425	282,42	268,56	
КТПН-3	499,825	479,82	450,37	
КТПН-2	13,87	11,88	11,28	
КТПН-1	13,94	11,88	11,28	
ПТП 2/4	27,34	24,84	23,59	
ПТП 2/3	25,65	22,72	20,65	
ПТП 2/2	41,53	37,62	35,910	
ПТП 2/1	64,34	59,85	56,43	

В рамках исследования использовались каталожные данные (Таблица 2) кабельной продукции и трансформаторного оборудования, используемого на рассматриваемом участке системы электроснабжения предприятия.

Таблица 2

Технические данные используемых трансформаторов и кабелей на участке сети

Марка кабеля	г, Ом/км	х, Ом/км	Процентное содержание кабелей на участке		Кол-во кабелей на участке, шт						
ААБ-3х240-6 кВ	0,13	0,075	9,1 %		2						
АСБ-3х95-6 кВ	0,33	0,083	13,64 %		3						
АПВ-3х70-6 кВ	0,33	0,082	63,64 %		14						
ААБ-3х50-6 кВ	0,62	0,063	9,1 %		2						
XNAKS- 3(120х240/50)-6 кВ	0,125	0,087	4,55 %		1						
Технические данные трансформаторов											
Под- станция завода	Марка сило- вого транс- форматора	S _н , МВА	Кол- во	Схема со- единения обмоток	U _{н.ВН} , В	P ₀ , кВт	U _{н.НН} , В	P _{кз} , кВт	u _{кз.ВН} , %	I ₀ , %	
КНС-10	ТМ-400/6	400	2	Y/Y ₀	6000	0,96	400	5,6	4,5	2,2	
ПС-7	ТМ-630/6	630	4	Y/Y ₀	6000	1,32	400	7,7	5,5	2,1	
ПС-6	ТМ-630/6	630	4	Y/Y ₀	6000	1,32	400	7,7	5,5	2,1	
ПС-4	ТМ-630/6	630	4	Y/Y ₀	6000	1,32	400	7,7	5,5	2,1	
ПС-3	ТМ-630/6	630	4	Y/Y ₀	6000	1,32	400	7,7	5,5	2,1	

В качестве платформы для построения математической модели выбран программный комплекс RastrWin3, позволяющий производить расчёт установившегося режима и вычислять необходимые электрические параметры: токи, напряжения, потоки активной и реактивной мощностей, потери активной мощности и потребляемую реактивную мощность во всех узлах и ветвях сети [1].

Математическая модель разработана на основе данных по активным и реактивным сопротивлениям линий и трансформаторов, мощностей нагрузок цеховых подстанций, номинальным напряжениям в узлах системы электроснабжения завода. На модели рассчитаны перетоки активной и реактивной мощностей, потери электроэнергии для участка, получающего питание от шин секции №2 с учетом графиков нагрузок (Рисунок 2) и нагрузок на рассматриваемых цеховых подстанциях (№ 7, № 6, № 4, № 3 и КНС-10) (Таблица 1).

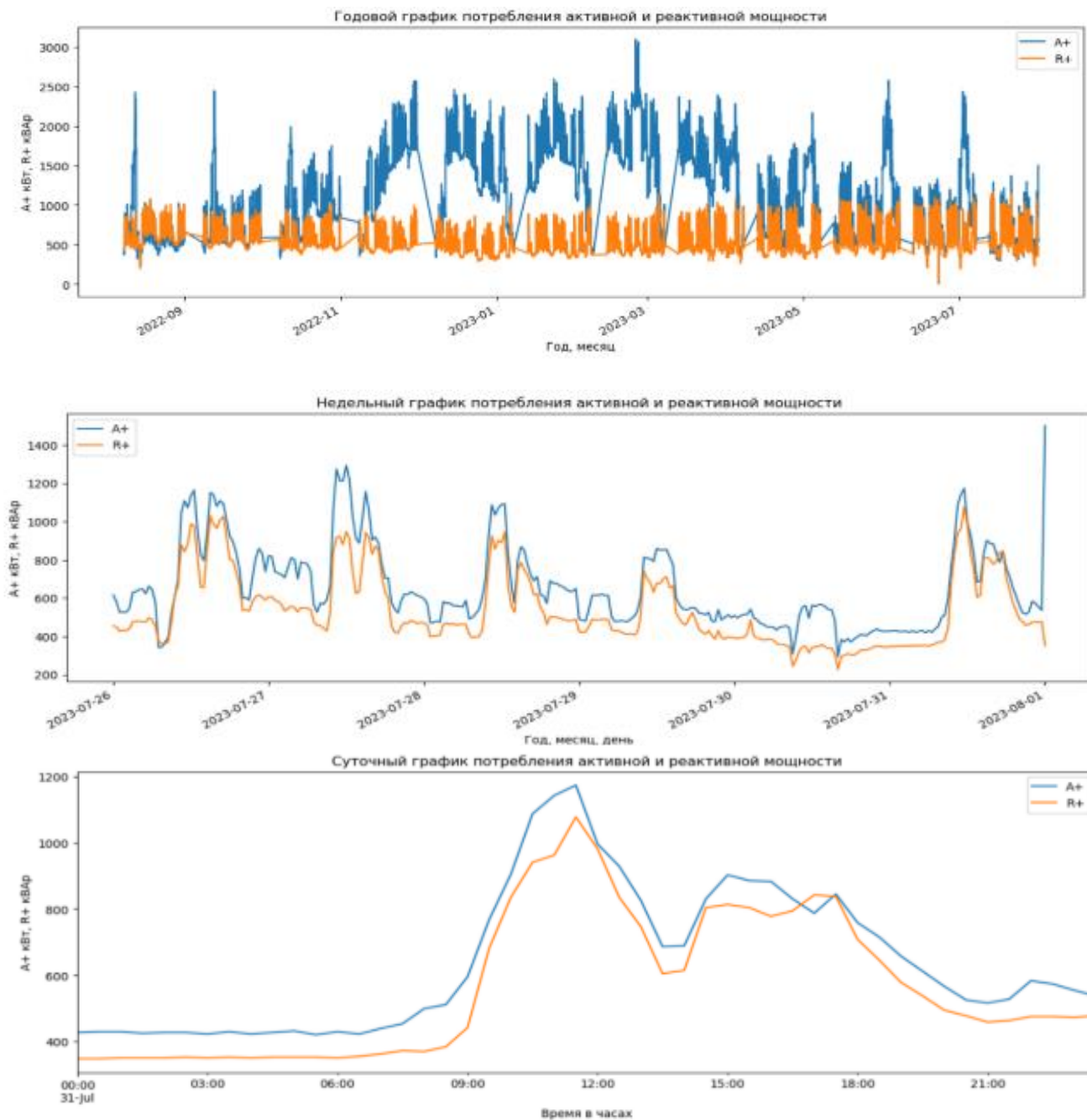


Рис. 2. Годовой, недельный, суточный графики нагрузки для секции №2 системы электроснабжения завода

Анализ графиков (Рисунок 2) показал значительную неравномерность нагрузок. $P_{\text{пиковая}} = 3,05 \text{ МВт}$, $Q_{\text{пиковая}} = 1 \text{ Мвар}$. В основном, уровень активной и реактивной мощности соизмерим.

Для моделирования линий электропередачи в ПК RastrWin3 используется П-образная схема замещения (Рисунок 3а) [1]. Для моделирования силовых трансформаторов в ПК RastrWin3 используется Г-образная схема замещения (Рисунок 3б) [1].

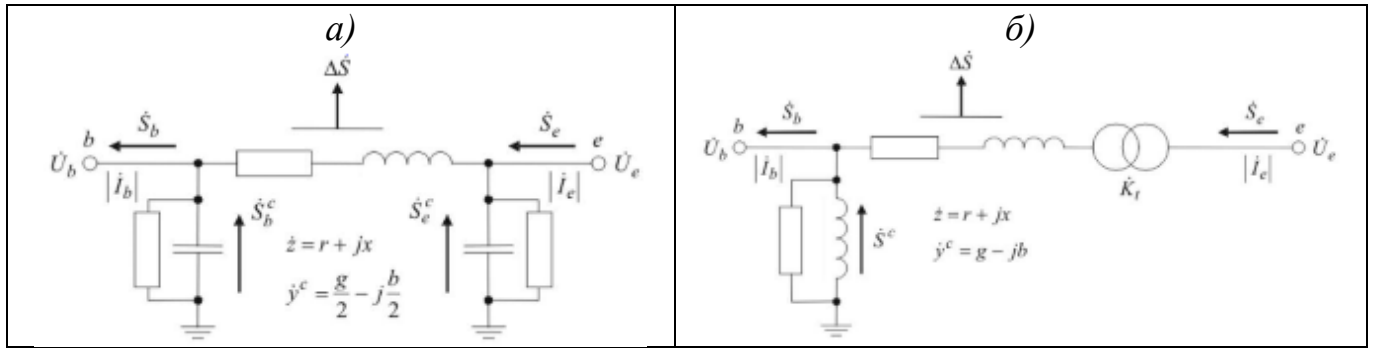


Рис. 3. Схемы замещения:
 а) П-образная для моделирования линии электропередачи;
 б) Г-образная для моделирования силовых трансформаторов

Для схем замещения линии электропередачи определяются [1]:

$$\begin{aligned}
 \Delta \dot{U} &= \dot{U}_e - \dot{U}_b, & i &= \frac{\Delta \dot{U}}{z}, \\
 i_b^c &= \dot{U}_b \cdot y^c, & i_e^c &= \dot{U}_b \cdot y^c, \\
 i_b &= i - i_b^c, & i_e &= i + i_e^c, \\
 \dot{S}_b &= \dot{U}_b \cdot i_b, & \dot{S}_e &= \dot{U}_e \cdot i_e, \\
 \dot{S}_b^c &= \dot{U}_b \cdot i_b^c, & \dot{S}_e^c &= \dot{U}_e \cdot i_e^c,
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\dot{S}^c = \dot{S}_b^c + \dot{S}_e^c, \quad \Delta \dot{S} = |I|^2 \cdot z = (\sqrt{r^2 + x^2}) \cdot z$$

Для схемы замещения силовых трансформаторов определяются [1]:

$$\begin{aligned}
 \Delta \dot{U} &= \frac{\dot{U}_e}{K_t} - \dot{U}_b, & i &= \frac{\Delta \dot{U}}{z}, \\
 i_b^c &= \dot{U}_b \cdot y^c, \\
 i_b &= i - i_b^c, & i_e &= \frac{i}{K_t}, \\
 \dot{S}_b &= \dot{U}_b \cdot i_b, & \dot{S}_e &= \dot{U}_e \cdot i_e, \\
 \dot{S}_b^c &= \dot{U}_b \cdot i_b^c,
 \end{aligned} \tag{2}$$

$$\Delta \dot{S} = |I|^2 \cdot z = (\sqrt{r^2 + x^2}) \cdot z$$

Расчёт потерь в кабельных линиях произведен по формуле [2]:

$$\Delta P = m \cdot I_k^2 \cdot (r_k + 0,1 \cdot n) \tag{3}$$

Расчёт потерь в силовых трансформаторах произведен по формуле [2]:

$$\Delta P = P_x + \beta^2 \cdot P_k = P_x + \left(\frac{I_{нг}}{I_{ном.тр-ра}} \right)^2 \cdot P_k \tag{4}$$

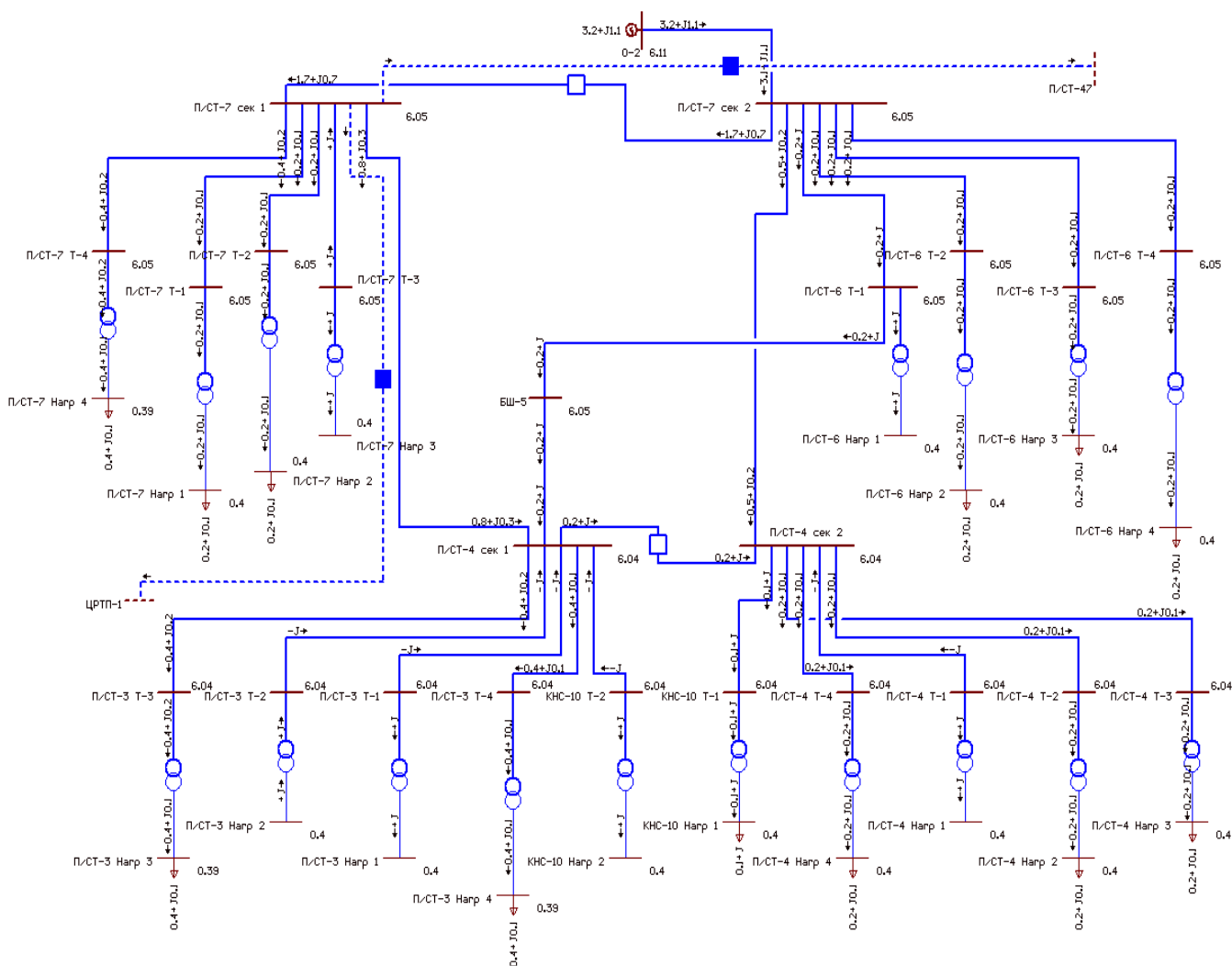


Рис. 4. Исходная математическая модель участка системы электроснабжения ПСЗ «Янтарь» для оценки уровня потерь и компенсации реактивной мощности, разработанная в программном комплексе RastrWin3

Результаты, полученные в ходе математического моделирования в программном комплексе RastrWin3 позволили определить уровень потерь активной мощности для каждого элемента рассматриваемого участка сети. Потери мощности в кабельных линиях составили **35,33 кВт**. Потери мощности в трансформаторах составила **36,17 кВт**. По расчётам на математической модели суммарные потери на участке составили **70,5 кВт**.

По формуле (3) произведён расчёт потерь для каждой кабельной линии в выбранной зоне. Самые большие потери приходятся на кабельные линии соединяющие П/СТ-7 и П/СТ-4, что составляет **30,3%** от всех потерь в кабельных линиях участка. Суммарные потери от кабельных линий составили **36,97 кВт**.

По формуле (4) рассчитаны потери для трансформаторов цеховых подстанций. Наибольшие потери в цеховых трансформаторах выявлены на подстанции П/СТ-7 и соответствуют **26,9%** от всех потерь в трансформаторах выбранного участка. Суммарные потери в трансформаторах составили **37,79 кВт**.

Суммарные потери мощности на участке сети при максимальной нагрузке составили **74,77 кВт**.

Результаты математического моделирования подтверждаются результатами расчетов (Таблица 3). Максимальная погрешность составляет 4,44 % (Таблица 3), что является удовлетворительной согласно [3].

Расчет потерь активной мощности по системе электроснабжения объекта исследования

Элемент системы	Потери мощности на модели, кВт	Потери мощности по известным выражениям, кВт	Погрешность, %
Кабельные линии	35,33	36,97	4,44
Трансформаторы	36,17	37,79	4,29
Суммарные потери:	71,5	74,77	4,37

На исходной математической модели (Рисунок 4) были применены источники реактивной мощности, позволяющие поддерживать уровень напряжения в узлах сети в требуемых пределах [1]:

$$U_i^{\text{минимальное}} \leq U_i^{\text{фактическое}} \leq U_i^{\text{максимальное}}, \quad (5)$$

и уменьшения потерь активной мощности. Решение этой задачи сводится к минимизации целевой функции [1]:

$$\min F = \sum_{i-j}^{Nu} \Delta P_{i-j} + K_{ш} \cdot \sum_i^N \delta U_i^2, \quad (6)$$

где ΔP_{i-j} – потери в ветви между i -м и j -м узлами, которые могут быть определены через модули и углы напряжений по концам ветви [1]:

$$\Delta P_{i-j} = g_{i-j} \cdot [U_i^2 + U_j^2 - 2 \cdot U_i \cdot U_j \cdot \cos(\delta_i - \delta_j)], \quad (7)$$

Получившиеся результаты сведены в таблицу 4.

Таблица 4

Изменение параметров в узлах при применения компенсирующих устройств на низкой стороне цеховых подстанций завода

Узлы в системе электроснабжения завода, снабжённые источниками реактивной мощности	Q , кВАр	U , кВ	Уменьшение потерь активной мощности, %	Величина потерь активной мощности при использовании источников реактивной мощности, кВт
КНС-10	99,13	6,05	0,47	49,47
ПС №3	860,50	6,04	5,30	47,07
ПС №4	626,95	6,05	2,89	48,27
ПС №6	744,69	6,05	3,25	48,10
ПС №7	958,51	6,05	4,32	47,56

Произведенный анализ (Таблица 3) показал, что при подключении компенсирующего устройства на низкой стороне подстанции ПС №3 потери в системе электроснабжения исследуемого судостроительного завода снизятся до наименьшего значения.

По результатам исследования и теоретического анализа ряда работ [4, 5] принято решение целесообразной установки компенсирующего устройства АУКРМ, мощностью 225 кВАр, номинальным напряжением 400 В, частотой 50 Гц на низшей стороне цеховой подстанции №3 для компенсации реактивной мощности и снижения потерь мощности в системе электроснабжения завода «Янтарь».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана исходная математическая модель системы электроснабжения на примере ПСЗ Янтарь для оценки потерь активной мощности и эффективности применения систем компенсации реактивной мощности. Построение математической модели велось на основе анализа структуры системы электроснабжения предприятия, нагрузкам цеховых подстанций за зимний максимум, годового, недельного и суточного графиков нагрузки на наиболее нагруженной секции системы электроснабжения и подключения в узлах сети источников реактивной мощности. Применение автоматических конденсаторных установок на стороне 0,4 кВ цеховых подстанций уменьшит потери электроэнергии на не менее 6% от потерь в кабельных линиях и трансформаторах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Документация к программе RastrWin (электронный ресурс), 2010. – Режим доступа: <http://www.rastrwin.ru/rastr/>.
2. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения предприятий / И. В. Жежеленко – Москва: Издательство «Энергоатомиздат», 1984. – 160 с.
3. Локтионов В.И. Анализ уровня допустимой погрешности исходных данных в процессе управления энергетическими системами / В.И. Локтионов // Экономический анализ: теория и практика. – 2016. – № 8. – С. 43-54.
4. Шульга, К. С. Сравнение основных типов компенсирующих устройств / К. С. Шульга, Ю. О. Астапова, А. Е. Астапов. – Текст: непосредственный // Молодой ученый. – 2016. – № 12 (116). – С. 449-453. – URL: <https://moluch.ru/archive/116/31791/> (дата обращения: 15.03.2024).
5. Дрей, Н.М. Компенсация реактивной мощности в системах электроснабжения с малой установленной мощностью: дис. канд. тех. наук: 05.09.03 / Дрей Надежда Михайловна; науч. рук. Г.М. Михеев; ЧГУ имени И.Н. Ульянова. – Чебоксары, 2021. – 133 с.

REDUCING THE LEVEL OF LOSSES IN THE POWER SUPPLY SYSTEM OF THE "YANTAR" SHIPYARD USING REACTIVE POWER COMPENSATION

¹Beley Valery Feodosievich, Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of the Department of Power Engineering

²Lysenko Mark Anatolyevich, PhD student of the Department of Power Engineering

³Korotkikh Kirill Viktorovich, PhD student of the Department of Power Engineering

^{1,2,3}Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,
e-mail: ¹vbeley@klgtu.ru; ²markklg@mail.ru; ³kirill.korotkikh@klgtu.ru

The paper presents some results of studies on the initial mathematical model of active power losses and the possibility of reactive power compensation in the power supply system of the Yantar plant, which may be of practical importance in further restructuring of the electrical engineering complex of the enterprise. The mathematical model was constructed based on the analysis of the structure of the enterprise's power supply system, loads of shop substations for the winter maximum, annual, weekly and daily load schedules on the most loaded section of the power supply system and connection of reactive power sources in the network nodes. Expressions are given for finding active power losses and parameters of equivalent circuits for cable lines and power transformers. An appropriate solution is proposed for installing a reactive power compensating device of the AUKRM type with a capacity of 225 kvar on the low side of 0.4 kV of shop substation No. 3 to compensate for reactive power and reduce active power losses.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАРЯДНО-РАЗРЯДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УГЛЕРОДНОГО АККУМУЛЯТОРА

¹Зубавичюс Роман Виргиневич, аспирант кафедры энергетики

²Харитонов Максим Сергеевич, канд. техн. наук, доцент кафедры энергетики

^{1,2}ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,
Калининград, Россия, e-mail: ¹roman.zubavichyus@klgtu.ru

Проведено экспериментальное исследование зарядно-разрядных характеристик и характеристики саморазряда аккумулятора с анодом в виде активированного углеродного материала. Предложены области применения углеродных аккумуляторов в системах накопления электрической энергии при электроснабжении морской портовой инфраструктуры.

Морская индустрия - от международных перевозок до местных пассажирских перевозок - в значительной степени зависит от использования ископаемого топлива для питания судов. С целью снижения нагрузки на окружающую среду, разрабатываются и вводятся в эксплуатацию электрические и гибридные суда [1]. При этом, процесс электрификации затрагивает не только морские транспортные средства, но и основные объекты морской индустрии – морские порты.

Снижению воздействия морских портов на экологическую обстановку в районах их расположения посвящено множество научных публикаций, преимущественно, зарубежных. В основном, работы направлены на повышение энергетической эффективности объектов портовой инфраструктуры – грузового транспорта, рефрижераторов, кранов, систем берегового питания, за счет энергетического менеджмента [2]. Повышение энергоэффективности порта может быть обеспечено, например, внедрением «умных сетей» электроснабжения [3]. Основным элементом таких сетей является автономная генерация, использующая возобновляемые источники энергии (ВИЭ). Внедрение ВИЭ в систему электроснабжения предполагает оснащение порта системами накопления электрической энергии (СНЭЭ), обеспечивающие эффективность электроснабжения [4]. Кроме этого, накопители энергии могут быть применены для решения отдельных задач в такой системе – от повышения качества электроэнергии до регулирования графиков электрических нагрузок [5].

Несмотря на то, что в большей части реализуемых индивидуальных и коммерческих проектов СНЭЭ (за исключением гидроаккумулирующих электростанций) применяются, в основном литий-ионные аккумуляторы [6], существуют значительные проблемы при реализации подобных проектов в России. Основная проблема, согласно [7], заключается в слабом развитии производства литиевых аккумуляторов на фоне отсутствия спроса со стороны конечных потребителей и импорта сырья из-за рубежа.

С учетом вышесказанного, актуальной является задача исследования новых технологий накопления электрической энергии, представляющих альтернативу литиевым технологиям, в частности, изучение характеристик новых видов аккумуляторов с позиции применения в составе систем электроснабжения объектов морской индустрии.

По предложению ООО «Нанокислотные материалы», которое в течение тринадцати лет разрабатывает и производит активированные углеродные материалы, в том числе, для применения в системах накопления электрической энергии, для исследования был выбран модуль «СНЭ 24 В», находящийся в стадии опытно-конструкторской работы.

Описание исследуемого аккумулятора

Модуль «СНЭ 24 В» – это электрохимический накопитель электрической энергии, аккумуляторная батарея, собранная путем послойной укладки листовых заготовок, представляющих собой единичные элементы, запрессованные в едином корпусе. В качестве анода аккумулятора выступает активиро-

ванный углеродный материал, катод выполнен из цинка. Сепаратор выполнен из абсорбирующего стекловолокна и пропитывается, как и анод, электролитом – водносолевым гелем. Электротехнические и массогабаритные характеристики модуля приведены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры модуля «СНЭ 24 В»

Параметр	Значение
Пиковое напряжение заряда, В	29,0
Напряжение заряда номинальным током, В	
– максимальное	24,48
– минимальное	18,0
Ток заряда/разряда, А	
– номинальный	2,5
– максимальный (не более 30 мин)	5,0
Номинальная емкость заряда, Ач	12,5
Номинальная энергия заряда, Втч	320
Рабочий диапазон температур, С°	-20...+40
Размеры (Д x Ш x В), мм	365 x 166 x 175
Масса, кг	11,5

По заявлению производителя [8], в отличие от свинцовых и литиевых аккумуляторов, углеродный модуль способен эффективно заряжаться в широком интервале зарядных токов от 0,01С до 0,5С и выдерживать рывки тока на заряде и на разряде до 5С без снижения работоспособности. Вдобавок, аккумулятор не подвержен «эффекту памяти», что является распространенным недостатком многих видов аккумуляторов. Это обеспечивает нормативный срок эксплуатации даже при циклическом полном или частичном разряде.

Также, значимое достоинство аккумулятора, с точки зрения экологии, – это безопасные для окружающей среды конструктивные элементы, которые, в частности электролит, подлежат вторичному использованию.

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка, предназначенная для исследования характеристик аккумулятора, приведена в виде блок-схемы на рис. 2. Установка состоит из аккумуляторной батареи (модуля 24 В), регулируемого источника питания с преобразователями, тестера аккумулятора и персонального компьютера, присоединенного к тестеру через интерфейс USB-TTL.

Перечень примененного оборудования приведен в таблице 2. Сохранение и форматирование зарегистрированных измерений производилось с использованием программы «ЕВ Tester Software». Внешний вид экспериментальной установки показан на рис. 3.

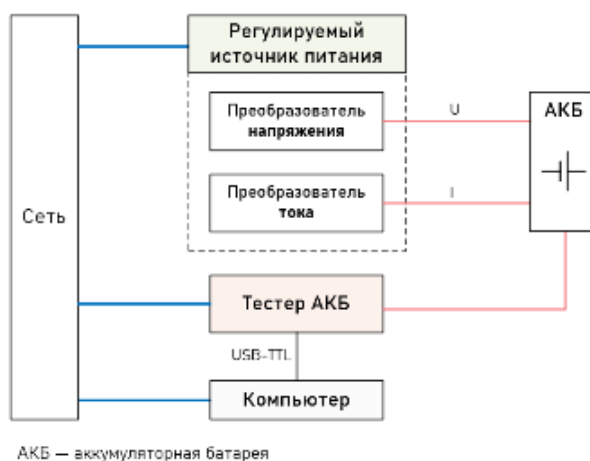


Рис. 2. Блок-схема установки для исследования характеристик аккумулятора

Перечень устройств в составе экспериментальной установки

Устройство	Наименование	Назначение
Аккумулятор	Модуль СНЭ 24 В	Объект исследования
Источник питания	QJ6030S 0-60V-30A	Питание аккумулятора
Тестер емкости и разряда АКБ	ZKETECH EBD-A20H	Регистрация измерений
Персональный компьютер	Dell	Сохранение измерений

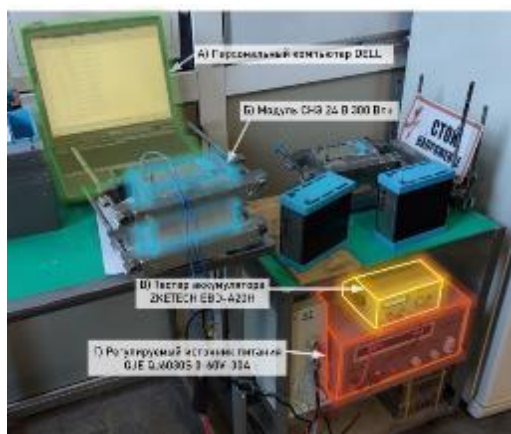


Рис. 3. Экспериментальная установка для исследования характеристик аккумулятора

Последовательность экспериментального исследования

Выполнение экспериментального исследования направлено на измерение характеристик аккумулятора (зависимости напряжения от времени) в трёх процессах (группах опытов):

1. заряд при постоянном токе от 2 до 3 А с шагом 0,25 А;
2. разряд при постоянном токе от 1,5 до 3,5 А с шагом 0,5 А;
3. хранение энергии в течение времени от 30 с до 8 ч с переменным шагом;

Каждый из процессов разбит на три этапа – заряд, хранение и разряд. Для первых двух процессов время хранения энергии (пауза) не превышает 30 с. В опытах, где ток не задан, разряд и заряд производятся постоянным током номинальной величины, равной 2,5 А. Разряд в любом из опытов производится до величины напряжения на аккумуляторе, равной 1 В.

Емкости аккумулятора в процессах заряда и разряда $C_{\text{разр}}$ и $C_{\text{зар}}$, Ас, и значение внутреннего сопротивления, $R_{\text{вн}}$, Ом, определяются тестером автоматически. Значение КПД по емкости η_c , %, вычислено по выражению:

$$\eta_c = 100 - \frac{C_{\text{зар}} - C_{\text{разр}}}{C_{\text{зар}}} \cdot 100\% \quad (1)$$

Результаты экспериментального исследования характеристик аккумулятора

В ходе серии опытов были получены зависимости напряжения на аккумуляторе от времени (вольт-секундные характеристики), графически представленные на рис. 4.

По графику напряжения при заряде постоянным током различной величины (рис. 4 а), можно судить о нелинейности времени заряда аккумулятора от значения зарядного тока, и, очевидно, что чем больше ток, тем быстрее происходит заряд до полной емкости. При этом, в таблице 3 показано, что КПД по емкости при токе заряда 0,24С (3 А) незначительно снижается относительно величины номинального тока. Длительность разряда также нелинейно зависит от величины тока (рис. 4 б), а максимальный КПД по емкости (таблица 4) соответствует номинальному значению разрядного тока 0,2С (2,5 А).

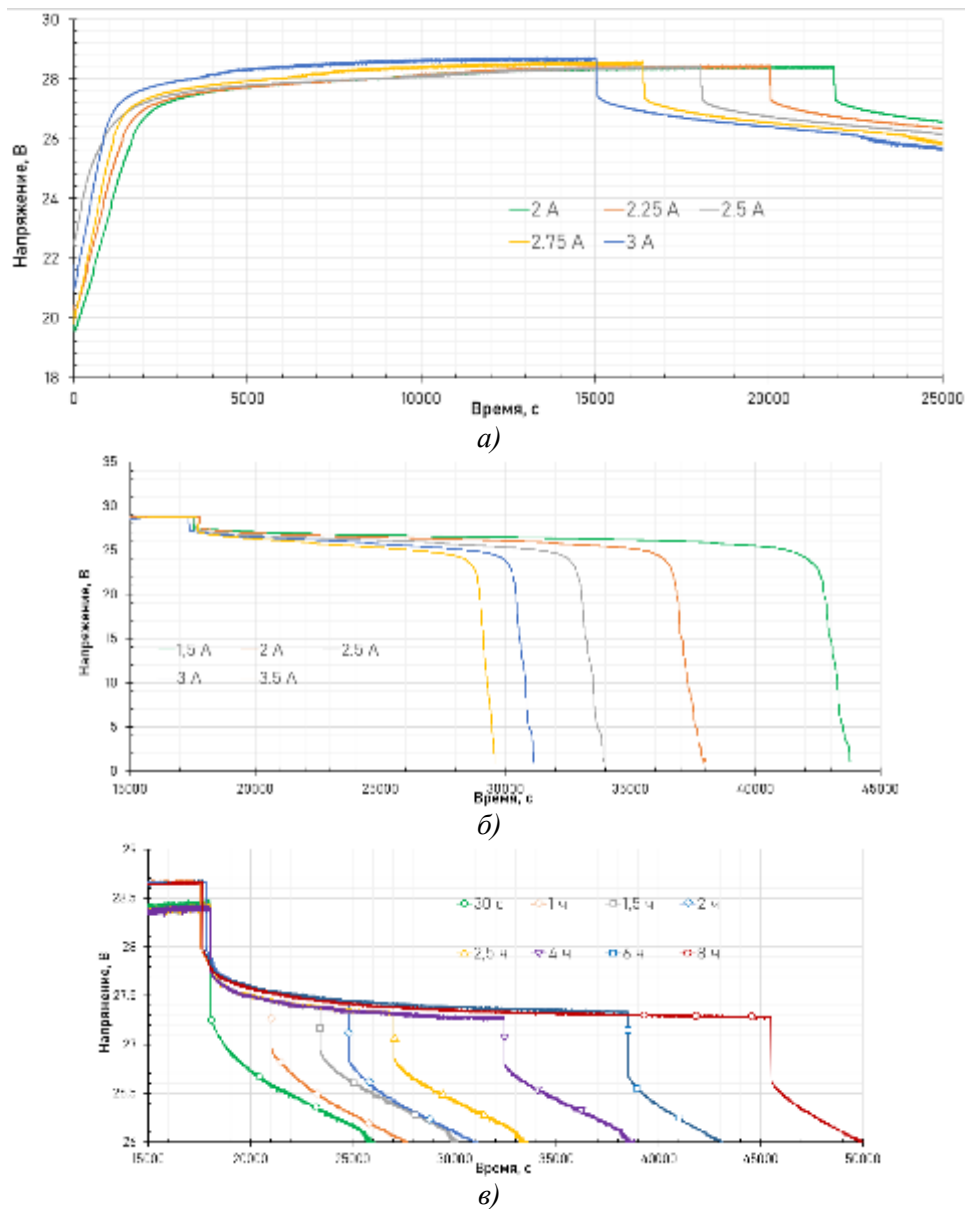


Рис. 4. Вольт-секундные характеристики аккумулятора при заряде постоянным током (а), разряде постоянным током (б), при хранении энергии (в)

Полученные в ходе эксперимента зависимости напряжения от времени при саморазряде аккумулятора (рис. 4 в), позволяют сделать вывод, что напряжение при хранении энергии значительно снижается. А средний ток саморазряда составляет 0,05 А (0,004С). При восьмичасовом хранении снижение напряжения достигает 1,3 В. Также, при хранении энергии теряется часть емкости – до 16% за восемь часов (таблица 5).

Таблица 3

Результаты опытов в процесс заряда аккумулятора

№	I _{зар} , А	I _{сп} , А	C _{зар} , Ас	C _{разр} , Ас	η _С , %	R _{вн} , Ом	t _{зар}	
							с	ч
1	2,00	2,06	45013	43241	96,06	0,2133	21866	6,07
2	2,25	2,25	45004	43094	95,76	0,1724	20030	5,62
3	2,50	2,55	45005	42867	95,25	0,1666	18030	5,01
4	2,75	2,76	45003	42934	95,40	0,1544	16384	4,55
5	3,00	3,01	45015	42414	94,22	0,2237	15031	4,18

Результаты опытов в процессе разряда аккумулятора

№	I _{разр} , А	I _{ср} , А	С _{зар} , Ас	С _{разр} , Ас	η _с , %	R _{вн} , Ом	t _{разр}	
							с	ч
1	1,5	1,55	45007	41766	92,8	0,27388535	27040	7,51
2	2,0	2,05	45014	42507	94,43	0,253606	20745	5,76
3	2,5	2,54	45004	42905	95,34	0,241555	16865	4,68
4	3,0	3,04	45007	42897	95,31	0,227407	14101	3,92
5	3,5	3,54	45006	42898	95,32	0,244384	12103	3,36

Результаты опытов в процессе саморазряда аккумулятора при хранении энергии

№	Время хранения, ч	С _{зар} , Ас	С _{разр} , Ас	η _с , %	t _{зар} , с	t _{разр} , с
0	0,008	45021	42870	95,22	17957	19267
1	1	45012	41848	95,15	17837	18331
2	1,5	44999	42534	94,52	18025	17979
3	2	45003	42325	94,05	17748	18276
4	2,5	45004	42073	93,49	18029	18195
5	4	45006	40654	90,33	17996	16419
6	6	45011	39409	87,55	17968	16338
7	8	45013	38168	84,79	17923	16009

Полученные в ходе экспериментального исследования характеристик аккумулятора «СНЭ 24 В» результаты, позволяют сделать вывод о целесообразности применения аккумуляторов такого типа в режимах работы быстрой выдачей мощности, так как при разряде емкость теряется незначительно. Например, для быстрого регулирования напряжения в нагрузочных узлах или срезания пиков нагрузки при резко неравномерном электропотреблении. При этом, длительное хранение энергии даже в пределах суток приводит к высокому уровню потери емкости, а вопрос их применения для повышения эффективности функционирования портовых ВИЭ требует отдельной проработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Huang M. et al. Renewable energy storage and sustainable design of hybrid energy powered ships: A case study //Journal of Energy Storage. – 2021. – Т. 43. – С. 103266.
2. Clemente D. et al. Blue seaports: The smart, sustainable and electrified ports of the future //Smart Cities. – 2023. – Т. 6. – №. 3. – С. 1560-1588.
3. Iris Ç., Lam J. S. L. A review of energy efficiency in ports: Operational strategies, technologies and energy management systems //Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2019. – Т. 112. – С. 170-182.
4. Харитонов М. С., Никишин А. Ю., Кажекин И. Е. Проблемы интеграции возобновляемых источников энергии в системы электроснабжения морских устьевых портов //Морские интеллектуальные технологии. – 2020. – №. 4-2. – С. 32-38.
5. Никишин, А. Ю. Накопитель электроэнергии как средство регулирования электропотребления морского порта / А. Ю. Никишин, М. С. Харитонов, Р. В. Зубавичюс // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – № 4-4(54). – С. 87-93. – DOI 10.37220/MIT.2021.54.4.012.
6. Yu Q. et al. Challenges and outlook for lithium-ion battery fault diagnosis methods from the laboratory to real world applications //ETransportation. – 2023. – Т. 17. – С. 100254.
7. Кулова Т. Л., Скундин А. М. Проблемы развития литий-ионных аккумуляторов в мире и России //Электрохимическая энергетика. – 2023. – Т. 23. – №. 3. – С. 111-120.
8. Наноуглеродные материалы, ООО [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.num39.ru/> (дата обращения: 24.05.2024).

RESULTS OF RESEARCH OF CHARGE-DISCHARGE CHARACTERISTICS OF THE CARBON BATTERY

¹Zubavichius Roman, PhD student of the Power Engineering Department

²Kharitonov Maxim, Dr.-Ing., Associate Professor of Power Engineering Department

^{1,2}Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,
e-mail: roman.zubavichyus@klgtu.ru

In the article the experimental study of charge-discharge characteristics and self-discharge characteristics of the accumulator with an anode in the form of activated carbon material is performed. The applications of carbon accumulators in the energy storage systems for power supply of seaport infrastructure are proposed.

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА НЕЙТРАЛИ НА ПОКАЗАТЕЛИ БЕЗОПАСНОСТИ СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОСЕТЕЙ В УСЛОВИЯХ НЕСИММЕТРИИ

Кажекин Илья Евгеньевич, канд. техн. наук, доцент кафедры энергетики

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

Представлены результаты исследований по оценке влияния на безопасность перевода низковольтных судовых электросетей из режима изолированной нейтрали в режим ее заземления через высокоомный резистор при несимметрии фазных емкостей. Проведен комплекс исследований, направленный на оценку показателей безопасности как при глухом замыкании фазы на корпус, так и при замыкании через переходное сопротивление. Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального агентства по рыболовству (контракт № 122030900054-0).

Несмотря на то, что в судовых электросетях используется в большинстве случаев низкое напряжение, возникающие в них перенапряжения могут привести к пробоем ослабленных участков изоляции. Согласно данным, полученным для различных видов электрооборудования, основным видом его повреждений является пробой изоляции. Как правило, снижение перенапряжений основывается на выборе режима нейтрали [1]. В частности, в электросетях средних классов напряжения в качестве альтернативы изолированной нейтрали при малых токах в месте однофазного замыкания предлагается заземление нейтрали через резистор [2]. Это позволяет значительно снизить перенапряжения, уменьшив тем самым вероятность развития однофазного замыкания в более опасные виды повреждения электрооборудования. Более того, в [5-6] показано, что формирование свободных составляющих тока замыкания определяется во многом напряжением смещения нейтрали перед замыканием. Наибольшее значение этой величины зависит от режима нейтрали. Поэтому при переходе к режиму резистивного заземления нейтрали, следует учитывать, что будет происходить лишь увеличение установившихся токов замыкания.

Подобное техническое решение допускается в низковольтных судовых электросистемах [5]. В [6] показано, что подобный переход позволяет снизить перенапряжения более чем в 1.5 раза. Большинство объектов водного транспорта эксплуатируется с бортовыми электросетями в режиме изолированной нейтрали. Это позволяет обеспечить относительно низкие токи в месте однофазного повреждения изоляции. Их величина может достигать нескольких ампер [7-8]. Целью работы является исследование изменения тока однофазного замыкания в электросетях с несимметричными фазными емкостями при их переводе из режима изолированной нейтрали к ее заземлению через высокоомный резистор.

Влияние несимметрии фазных емкостей на ток глухого однофазного замыкания

При несимметрии фазных проводимостей изоляции электросети формируется напряжением смещения нейтрали. Его величина оценивается следующим образом.

$$U_0 = \frac{E_A Y_A + a^2 E_B Y_B + a E_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C} \quad (1)$$

где E_A, E_B, E_C – фазные ЭДС электросети; Y_A, Y_B, Y_C – проводимость между фазами и корпусом судна.

Учитывая, что обычно у диэлектрических технических конструкций емкостная проводимость превосходит активную проводимость, а судовые источники электроэнергии, как правило, симметричны, выражение (1) может быть представлено следующим образом.

$$U_0 = \frac{C_A + a^2 C_B + a C_C}{C_A + C_B + C_C} E_\phi = \underline{n}_{\text{НС}} E_\phi \quad (2)$$

где C_A, C_B, C_C – фазные емкости электросети; E_ϕ – действующее значение фазной ЭДС; $\underline{n}_{\text{НС}}$ – комплексное значение степени несимметрии.

На основе схем, представленных на рис. 1 получены выражения для токов, протекающих в месте повреждения.

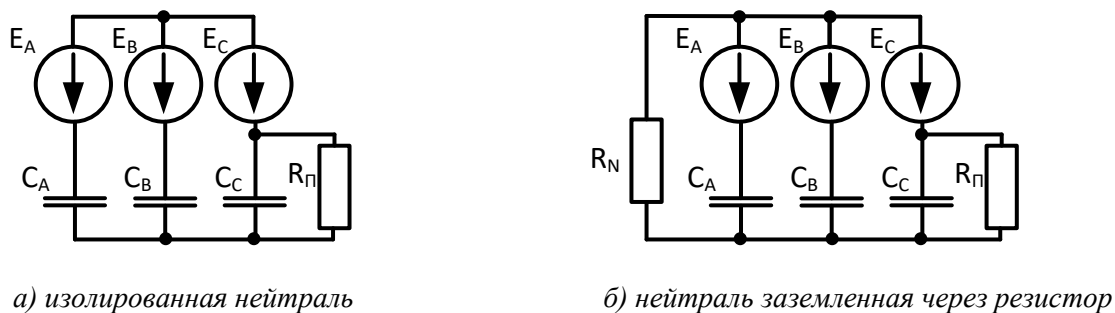


Рис. 1. Схемы однофазного замыкания в электросети

Исходя из схемы, изображенной на рис. 1а, установившийся ток металлического однофазного замыкания может быть представлен в виде:

$$I_{O3} = [a^2 C_B + a C_C - (C_B + C_C)] \omega E_\phi \quad (3)$$

где ω – угловая частота сети.

Из выражений (2) и (3) следует взаимосвязь тока замыкания с напряжением нулевой последовательности вида:

$$\underline{I}_{O3} = [n_{НС} - 1] \omega C_\Sigma E_\phi. \quad (4)$$

Сопоставление осуществлялось с результатами имитационного моделирования, реализованного в программной среде SimInTech (рис. 2а).

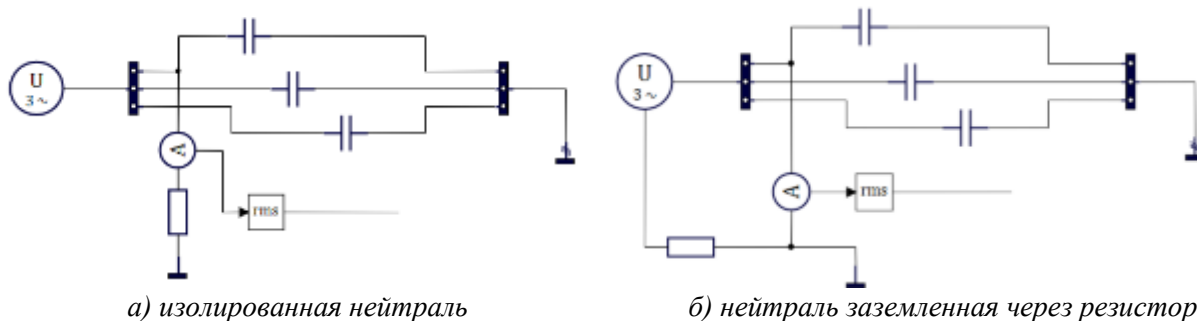


Рис. 2. Имитационная модель однофазного замыкания в электросети

Результаты расчётов тока однофазного замыкания в электросети с изолированной нейтралью представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты расчета тока однофазного замыкания в электросети с изолированной нейтралью

№ п/п	Фазная емкость электросети			Степень несимметрии $n_{НС}$	Ток однофазного замыкания, А	
	C_A , мкФ	C_B , мкФ	C_C , мкФ		Результат расчета по выражению (4)	Результат моделирования
1	3	3	3	0	0.36	0.36
2	1	3	5	0.385	0.484	0.484
3	3	5	1	0.385	0.385	0.385
4	5	3	1	0.385	0.249	0.249
5	1	5	3	0.385	0.484	0.484
6	3	1	5	0.385	0.385	0.385
7	5	1	3	0.385	0.249	0.249

Как видно из таблицы 1 результаты расчетов двумя методами полностью совпадают.

Ток глухого однофазного замыкания в электросети с резистивной нейтралью можно оценить по следующему выражению

$$I_{03} = (Y_N - j [n_{nc} - 1] \omega C_\Sigma) E_\phi. \quad (5)$$

Модель однофазного замыкания в электросети с нейтралью, замкнутой через резистор, представлена на рис. 2б. Результаты расчетов по выражения (5), а также имитационного моделирования приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты расчета тока однофазного замыкания в электросети с резистивной нейтралью

№ п/п	Фазная емкость электросети			Степень несимметрии n_{nc}	Ток однофазного замыкания, А	
	C_A , мкФ	C_B , мкФ	C_C , мкФ		Результат расчета по выражению (5)	Результат моделирования
1	3	3	3	0	0.44	0.44
2	1	3	5	0.385	0.577	0.578
3	3	5	1	0.385	0.377	0.377
4	5	3	1	0.385	0.302	0.303
5	1	5	3	0.385	0.513	0.513
6	3	1	5	0.385	0.532	0.532
7	5	1	3	0.385	0.402	0.402

Расхождения между полученными результатами не превышают 0.33%.

Как видно из сопоставления данных, приведенных в таблицах 1 и 2, ток однофазного замыкания при большинстве вариантах несимметрии увеличился.

Влияние несимметрии фазных емкостей на ток неполного однофазного замыкания

Ток неполного однофазного замыкания при несимметрии фазных емкостей в электросети с изолированной нейтралью может быть оценен при помощи следующего выражения.

$$I_{03} = \frac{[n_{nc} - 1] \omega C_\Sigma E_\phi}{\sqrt{(R_n \omega C_\Sigma)^2 + 1}}. \quad (6)$$

где R_n – сопротивление в месте повреждения изоляции.

Результаты расчетов по выражению (6) и моделирования представлены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты расчета тока неполного однофазного замыкания в электросети с изолированной нейтралью

№ п/п	Фазная емкость электросети			Степень несимметрии n_{nc}	Ток однофазного замыкания, А	
	C_A , мкФ	C_B , мкФ	C_C , мкФ		Результат расчета по выражению (6)	Результат моделирования
1	3	3	3	0	0.12	0.12
2	1	3	5	0.385	0.161	0.161
3	3	5	1	0.385	0.128	0.128
4	5	3	1	0.385	0.083	0.083
5	1	5	3	0.385	0.161	0.161
6	3	1	5	0.385	0.128	0.128
7	5	1	3	0.385	0.083	0.083

Результаты, представленные в таблице 3, подтверждают достоверность выражения (6). На его основе построены зависимости тока замыкания от величины сопротивления в месте повреждения изоляции, представленные на рис. 3.

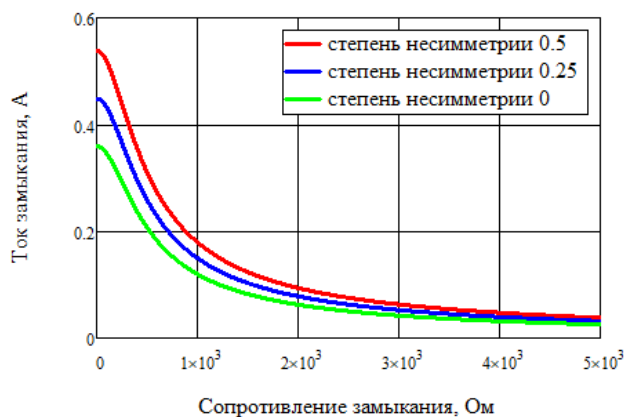


Рис. 3. Зависимости тока замыкания от сопротивления изоляции поврежденной фазы

Как видно из рис. 3, несимметрия фазных емкостей проявляется лишь при малых значениях переходного сопротивления в месте замыкания.

Ток неполного однофазного замыкания в электросети с изолированной нейтралью может быть определен по приведенному ниже выражению

$$\underline{I_{03}} = \left| \frac{[n_{нс}-1](1+j\omega C_{\Sigma}R_N)E_{\phi}}{R_N+R_{\Pi}+j\omega C_{\Sigma}R_N R_{\Pi}} \right|. \quad (7)$$

где R_N – сопротивление резистора, включенного в нейтраль.

Расчеты, проведенные по выражениям (6) и (7) для различных вариантов сочетания фазных емкостей, соответствующих номерам в таблице 3, позволили сопоставить на рис. 4 зависимости значений тока замыкания от величины сопротивления в месте повреждения изоляции.

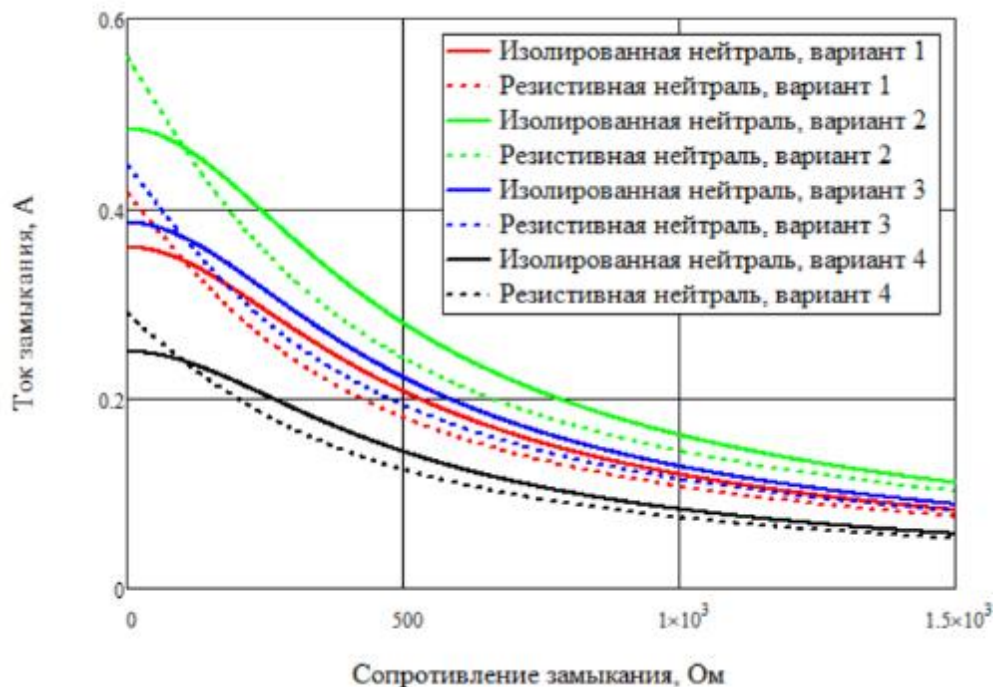


Рис. 4. Зависимости тока замыкания от сопротивления изоляции поврежденной фазы

Как видно из зависимостей, представленных на рис. 4, при сопротивлениях поврежденной изоляции более 200 Ом ток замыкания в сети с резистивной нейтралью оказывается меньше, чем в сети с изолированной нейтралью. Подобные закономерности получены и для величины мощности тепловыделений в месте замыкания (рис.5).

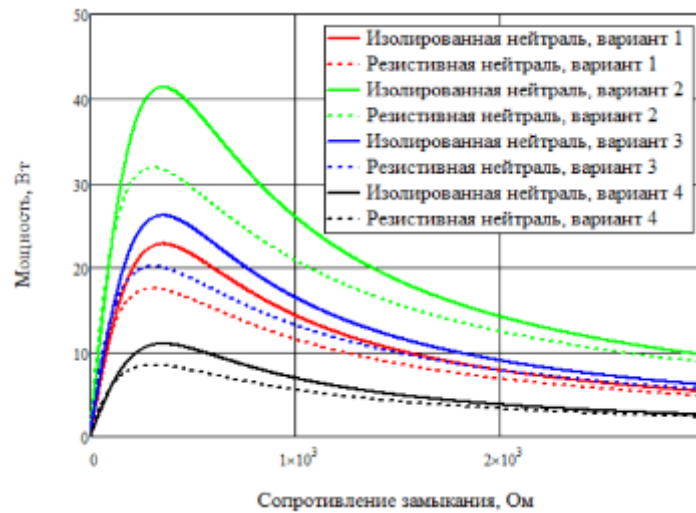


Рис. 5. Зависимости мощности тепловыделений в месте замыкания от сопротивления изоляции поврежденной фазы

Согласно зависимостям, приведенным на рис. 5, при переводе электросети из режима изолированной нейтрали в режим ее заземления через резистор максимум мощности тепловыделений в месте замыкания снижается более чем на 30%.

Выводы

Проведенные исследования показали, что перевод судовых электросетей в режим резистивной нейтрали позволяет повысить их безопасность в режиме неполного однофазного замыкания за счет снижения величин токов и мощности тепловыделений в месте повреждения изоляции. Проведенные ранее исследования по оценке показателей безопасности в условиях дуговых однофазных замыканий, также приводят к выводу о предпочтительности режима резистивного заземления нейтрали. Единственный вид повреждения, при котором изолированная нейтраль обеспечивает меньшие значения тока замыкания это глухое однофазное замыкание.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Благинин, В. А. Профилактика аварийности отечественного рыбопромыслового флота / В. А. Благинин, И. Е. Кажекин // Безопасность жизнедеятельности. – 2010. – № 3(111). – С. 40-47.
2. Правила устройства электроустановок : по состоянию на 1 мая 2005 г. / утв. М-вом энергетики Рос. Федерации от 8 июля 2002 г. № 204, введ. в действие с 1 янв. 2003 г.. – 7-е изд., изм. и доп.. – Новосибирск : Сиб. университет. изд-во, 2005. – ISBN 5-94087-378-2. – EDN QMIUPN.
3. Hazard Assessment of Low-voltage Insulated Neutral Networks with Unstable Single-phase Fault / I. Kazhekin, M. Kharitonov, E. Filipov, D. Kugucheva // Proceedings of the 2021 Ural-Siberian Smart Energy Conference, USSEC 2021, Novosibirsk, 13–15 ноября 2021 года. – Novosibirsk, 2021. – P. 67-71. – DOI 10.1109/USSEC53120.2021.9655730.
4. Кажекин, И. Е. Исследование переходных процессов при однофазных повреждениях изоляции в низковольтных судовых электросетях с учетом сопротивления в месте замыкания / И. Е. Кажекин // Морские интеллектуальные технологии. – 2020. – № 4-2(50). – С. 49-54. – DOI 10.37220/MIT.2020.50.4.072.
5. НД 2-020101-138 Правила классификации и постройки морских судов. Часть XI. Электрическое оборудование (Издание 2021 года)
6. Благинин, В. А. Резистивное заземление нейтралей в судовых электроэнергетических системах / В. А. Благинин, И. Е. Кажекин // Известия КГТУ. – 2010. – № 17. – С. 138-140.
7. Kazhekin, I. Prevention of Ferroresonant Processes in Microgrid Operating in Island Mode / I. Kazhekin, M. Kharitonov // Energy Ecosystems: Prospects and Challenges : Conference Proceedings, Калининград, 29–30 сентября 2022 года. Vol. Volume 626. – Швейцария: Springer, 2023. – P. 86-94

8. Кажекин, И. Е. Формирование максимальных перенапряжений при возникновении ферро-резонансных процессов во время дуговых однофазных замыканий в низковольтных судовых электросистемах / И. Е. Кажекин // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2020. – № 1. – С. 115-124. – DOI 10.24143/2073-1574-2020-1-115-124

INFLUENCE OF NEUTRAL MODE ON THE SAFETY INDICATORS OF SHIP ELECTRICAL NETWORKS IN CONDITIONS OF ASYMMETRY

Kazhekin Ilya Evgenievich, cand. tech. sci., associate professor of the department of power engineering

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

The paper presents the results of studies on the assessment of the impact on safety of switching low-voltage ship electrical networks from the isolated neutral mode to the mode of its grounding through a high-resistance resistor with asymmetry of phase capacities. A set of studies was conducted aimed at assessing safety indicators both for a dead phase short circuit to the housing and for a short circuit through transition resistance. The work was carried out with the financial support of the Federal Agency for Fisheries (contract No. 122030900054-0).

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПОМОЩИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ОБСЛУЖИВАНИИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

¹Ляшенко Андрей Павлович, магистр кафедры энергетики

²Кажекин Илья Евгеньевич, канд. техн. наук, доцент

^{1,2}ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,

Калининград, Россия, e-mail: ¹goron8671@gmail.com; ²kazhekin@mail.ru

Современные методы диагностики электрооборудования подвержены влиянию человеческого фактора, что может приводить к ошибкам. Технологии Индустрии 4.0, такие как искусственный интеллект и системы поддержки принятия решений, могут минимизировать это влияние и автоматизировать процесс диагностики. Разработана и протестирована система диагностики, способная распознавать объекты электросетевого хозяйства и фиксировать электрические разряды. Результаты испытаний подтвердили её способность выявлять разряды в различных условиях. Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального агентства по рыболовству (контракт № 122030900054-0).

Введение

Своевременная оценка технического состояния электрооборудования является ключевым элементом обеспечения надежной эксплуатации электростанций и подстанций. Для предотвращения дефектов или их выявления на ранних стадиях, а также для поддержания эксплуатационной надежности, необходимо использовать методы диагностики, которые можно разделить на две основные группы: методы неразрушающего контроля (МНК) и разрушающего контроля. Методы МНК позволяют контролировать состояние материалов без их разрушения, в то время как разрушающие методы предполагают разрушение образцов для анализа их состояния.

Однако при выявлении дефектов и принятии решений по дальнейшей эксплуатации оборудования важно учитывать достоверность и точность получаемой информации, так как методы неразрушающего контроля (НК) могут содержать ошибки. Факторы, влияющие на результаты диагностики, можно условно разделить на три группы: окружающая среда, человеческий фактор и технический аспект. Метеорологические условия и время суток могут значительно повлиять на точность измерений. Человеческий фактор включает в себя квалификацию и опыт персонала, проводящего диагностику, что также вносит значительную неопределенность. Технический аспект касается характеристик оборудования, таких как материал, состояние поверхности и другие параметры, влияющие на результат контроля [1].

Автоматизация процессов и внедрение технологий Индустрии 4.0 позволит обеспечить постоянный контроль за состоянием оборудования без привлечения человеческого ресурса. Это не только решит проблему нехватки квалифицированного персонала, но и обеспечивает стабильность диагностики, минимизируя влияние человеческого фактора и улучшая оперативность принятия решений. Таким образом, внедрение интеллектуальных систем диагностики является перспективным направлением, способным повысить надежность эксплуатации электрооборудования и снизить риск аварийных ситуаций.

Разработка системы

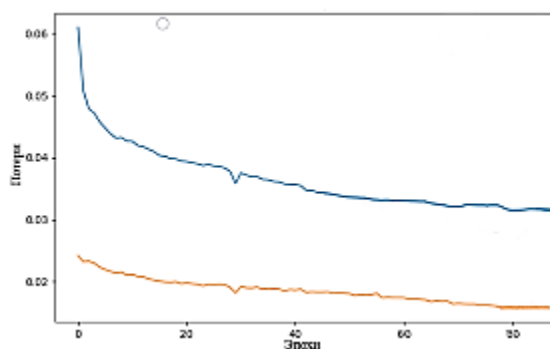
1.1. Нейронная сеть

Среди множества алгоритмов для работы с визуальными объектами был выбран YOLO (You Only Look Once), позволяющий выполнять детекцию объектов в реальном времени, обеспечивая баланс между точностью и скоростью обнаружения на видеопотоке. Решение задачи осуществлялось при помощи модели YOLOv7-tiny, которая является самой компактной в семействе YOLO. Использование уменьшенных моделей позволяет обучать их на более компактных наборах данных, а также использовать на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами [2].

Для обучения модели был собран и подготовлен набор данных, включающий 20 тысяч фотографий с размеченными объектами. Количество классов объектов составило 14, которые условно были разделены на три группы:

1. Средства индивидуальной защиты (СИЗ): каска, перчатки, диэлектрическая штанга.
2. Объекты на подстанции: силовой трансформатор, выключатели, разъединители (замкнутое и разомкнутое положение классифицируются как два разных класса), изоляторы, ячейки комплектного распределительного устройства (КРУ).
3. Явления или дефекты: искра, дуга. Использование шаблона

В процессе обучения нейронной сети улучшаются параметры, на основе которых можно судить об успешности обучения. Например, график «Loss over Epoch» (потери на каждой эпохе) отображает значение функции потерь модели на протяжении всех эпох обучения. Потеря (loss) показывает, насколько предсказания модели отклоняются от реальных значений. Этот график важен для оценки процесса обучения модели и понимания, как хорошо модель обучается на тренировочных данных. Чаще всего отображаются два графика: один демонстрирует потери на тренировочном наборе данных, а другой – на валидационном (применяется для проверки и оценки производительности модели) наборе данных рис.1 [3].



*Синий график – потери на тренировочном наборе данных
Оранжевый график -потери на проверочном наборе данных
Рис.1. График потерь на каждой эпохе*

На первой эпохе обучения модель демонстрирует высокие потери, поскольку её параметры ещё не оптимизированы. В процессе обучения потери уменьшаются по мере улучшения способности модели делать предсказания. Со временем снижение потерь может замедлиться и стабилизироваться, что указывает на достижение моделью определённого уровня производительности. Если потери на тренировочных данных продолжают уменьшаться, а на проверочных начинают расти, это свидетельствует о перенастройке модели, то есть о её чрезмерной подстройке под тренировочные данные с утратой способности обобщать новые данные. В ходе обучения стабилизация графика потерь указывает на достижение моделью оптимального уровня производительности на данном наборе данных. График "Precision over Epochs" отображает изменения точности классификации модели на данных обучения и валидации в течение каждой эпохи, позволяя отслеживать динамику точности в процессе обучения рис.2.

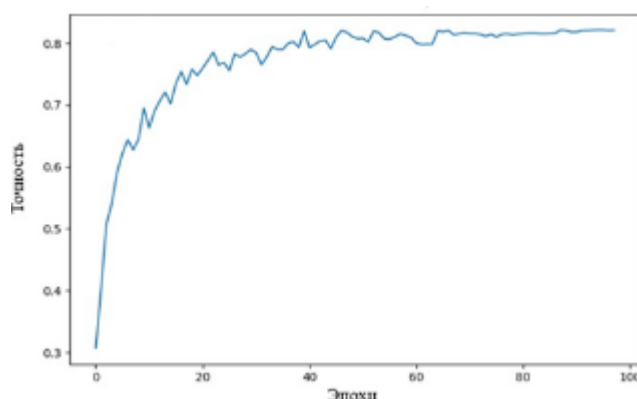


Рис. 2. Результаты обучения YOLOv7-tiny

Важно отметить, что высокая точность на графике не гарантирует абсолютную правильность модели при работе с реальными данными. Он лишь показывает, что модель демонстрирует высокую точность на используемом наборе данных обучения и валидации.

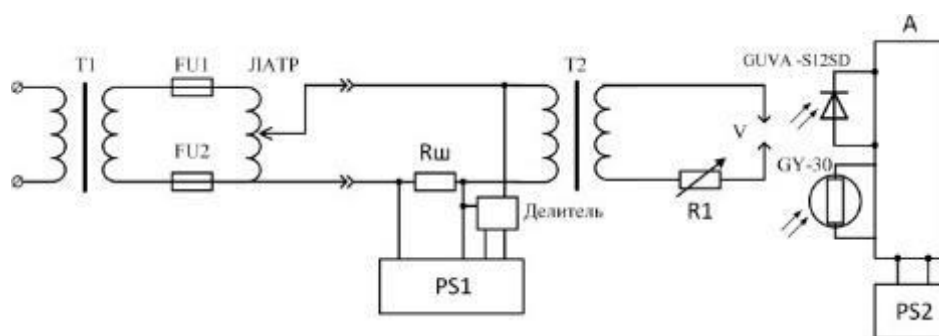
1.2. Применение датчиков излучения

Для разработки алгоритма, направленного на контроль и визуальную диагностику состояния оборудования, а также для обеспечения принятия решений при выполнении операций на подстанции, необходимо использовать как нейронную сеть, так и специализированное оборудование для автоматизированной диагностики. Учитывая, что модель обучена распознавать разрядные процессы, было принято решение дополнительно задействовать датчик ультрафиолетового излучения (GUVA-S12SD) и датчик освещенности (GY-30) для проведения измерений в реальном времени и своевременного реагирования на возникновение разрядных процессов, которые не могли быть обнаружены моделью YOLOv7-tiny.

Способность датчиков реагировать на оптическое излучение разрядов (ОИР) была проверена экспериментально. Оптическое излучение разрядов в атмосферном воздухе можно разделить на три группы, соответствующие различным формам и стадиям разрядов: лавинно-стримерную, лидерную и дуговую. Первые две группы характерны для короны и разрядов по поверхности сухой изоляции, в то время как к дуговой группе относятся разряды по загрязненной и увлажненной изоляции [4].

В рамках экспериментов были проведены два вида испытаний. В первом случае два электрода были подключены к увлажненной изоляции, во втором – два электрода находились в воздухе с небольшим воздушным пространством между ними. Постепенно повышая напряжение в обоих случаях, возникали разрядные процессы, которые были зафиксированы с помощью осциллографа и датчиков. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 3.

В ходе экспериментов через трансформатор T1 подавалось напряжение на ЛАТР, при помощи которого оно увеличивалось до возникновения разряда на искровой промежутке V. Напряжение на искровой промежутке подавалось через повышающий трансформатор T2, позволяющий повысить его до 6 кВ. Ток и напряжение возникающих при этом дуговых и искровых процессов регистрировались осциллографом PS1. Одновременно проводилась регистрация излучения двумя датчиками: ультрафиолетового излучения (GUVA-S12SD) и освещенности (GY-30), а также велась видеорегистрация электрических разрядов с обработкой данных в режиме реального времени.



T1-трансформатор источника электроэнергии; FU1, FU2- предохранители; ЛАТР-лабораторный автотрансформатор; Rш- шунтирующий резистор; PS1-осциллограф подключенный к делителю напряжения; T2-повышающий трансформатор; R1-реостат; V-искровой промежуток; GY-30 – датчик освещенности; GUVA-S12SD-датчик ультрафиолетового излучения; A -микропроцессор Arduino UNO; PS2- осциллограф подключенный к Arduino UNO

Рис. 3. Схема экспериментальной установки

В ходе экспериментов было обнаружено, что при возникновении разрядных процессов в первом типе опытов реагировал только датчик освещенности GY-30 изменение показаний датчика из-за возникновения дуги показаны на рис. 4.

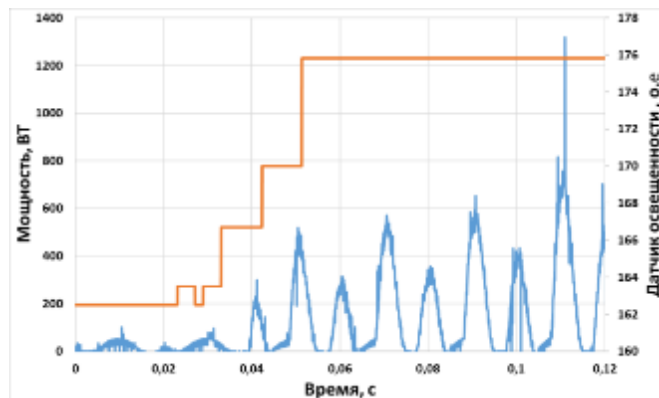


График изменение освещенности от возникновения дуги (оранжевый график)

График изменения мощности (синий график)

Рис. 4. График изменения показаний датчика от возникновения дуги

Взаимосвязь мощности дуги и максимальных показаний датчика освещенности представлена на рис. 5.

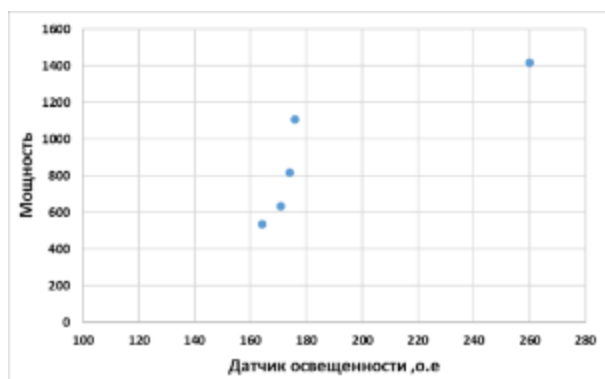


Рис. 5. Зависимость мощности от показателей освещенности

Вторая часть экспериментов была выполнена с возникновением разрядов в воздухе. Согласно [4] такие разряды должны сопровождаться излучением ультрафиолетового спектра. Эта часть экспериментов проводилась при различных расстояниях между электродами.

Полученные результаты можно разделить на две группы. К первой относятся данные, полученные при условно больших межэлектродных расстояниях, когда для возбуждения электрического разряда требовалось большее напряжение, а сам разряд носил более устойчивый характер. При таких разрядах датчик ультрафиолетового излучения, свои показатели не изменял, а зависимости полученные датчиком освещенности оказались подобны результатам предыдущих экспериментов. Влияние мощности на показания датчика освещенности показано на рис. 6.

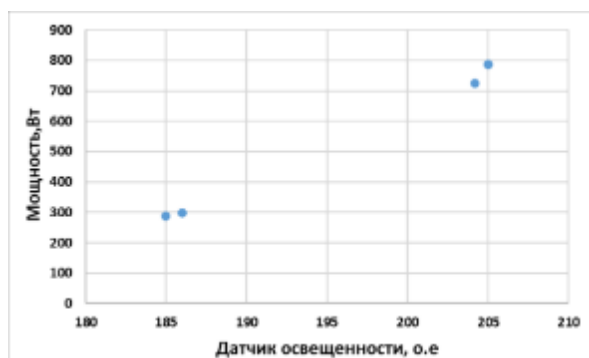
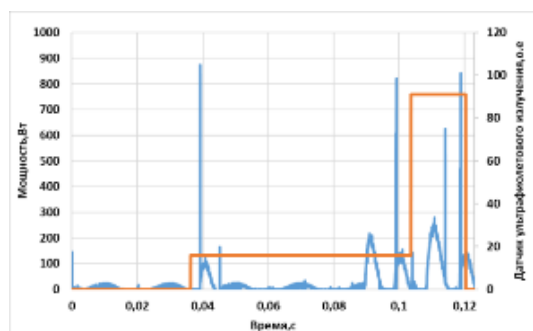


Рис. 6. Зависимость мощности от показателей освещенности

Вторая группа результатов получена при возникновении искровых разрядов между электродами, условно близко расположенными друг к другу. Для возбуждения разряда требовалось, как правило, меньшее напряжение. Сам процесс их протекания носил неустойчивый характер. Реакция датчика освещенности на такие разряды оказалась несущественной, в то время как датчик ультрафиолетового излучения продемонстрировал к ним чувствительность. Пример регистрации показаний датчика и изменение мгновенной мощности электрического разряда показано на рис. 7.



*Изменение показаний датчика ультрафиолетового излучения -оранжевый график
Изменение мощности -синий график*

Рисунок 7 - График зависимости изменения показаний датчика от возникновения дуги

Влияние мощности электрического разряда на максимальные показания датчика ультрафиолетового излучения представлено на рис. 8.

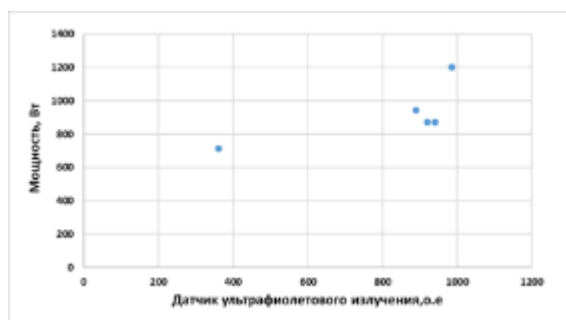


Рис. 8. Зависимость мощности от показателей датчика ультрафиолетового излучения

Таким образом необходимо использовать совокупность датчиков, реагирующих на широкий спектр излучения.

Результаты

Проведены испытания работы обученной модели YOLOv7-tiny, на видеофайле, затем в реальном времени. В процессе обработки видеофайла нейросеть демонстрирует более высокую точность, это связано с тем, что нет ограничения времени на обработку каждого кадра видео. Результаты представлены на рис. 9.



Рис. 9. Результаты детекции объектов на видеофайле

В процессе описанных выше экспериментальных исследований при помощи нейросети анализировался видеопоток в реальном времени. Пример работы системы продемонстрирован на рис. 10.



Рис. 10. Результаты детекции на видеопотоке

Значительно повысилась точность выявления разрядов при совместном использовании нейросети с датчиками оптического излучения. Для формирования данных в удобном для анализа видеопотока, система сохраняет информацию о нарушениях и дефектах в базе данных с использованием библиотеки LiteSQL. Интерфейс, разработанный на базе PyQt5, предоставляет инструменты для управления системой, включая функции запуска и остановки видеопотока, отображения результатов детекции и генерации отчетов рис. 11.

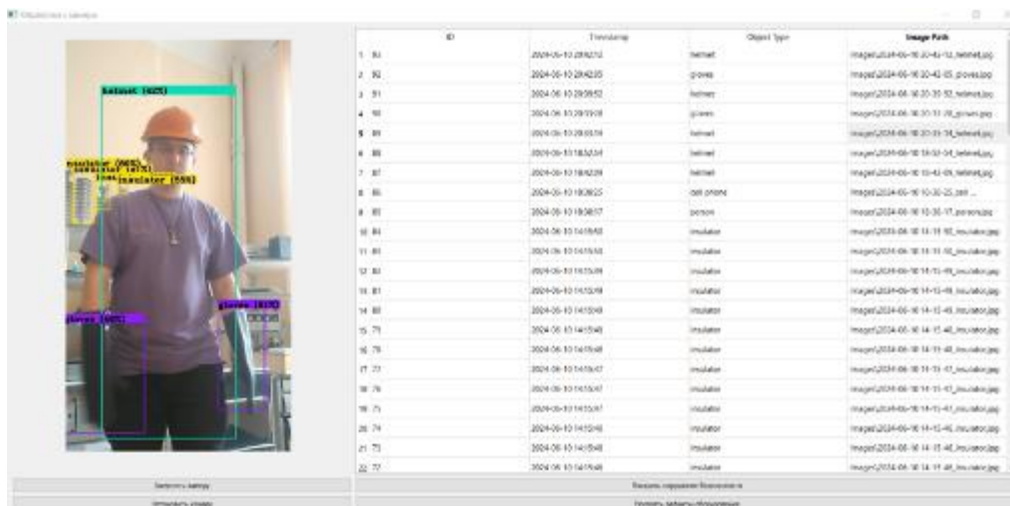


Рис. 11. Работа системы

Таким образом, первая версия системы поддержки принятия решений была разработана и прошла испытания в лабораторных условиях, продемонстрировав свою функциональность и соответствие заявленным требованиям. Результаты проведенных испытаний предоставили ценные данные, необходимые для дальнейшего совершенствования системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Диагностика электрооборудования электрических станций и подстанций: учебное пособие / А. И. Хальясмаа. – Екатеринбург: Издво Урал. ун-та, 2015. – 64 с
2. Alexey A B, Yolo-mark, [Электронный ресурс] Режим доступа: https://github.com/AlexeyAB/Yolo_mark [Дата обращения 22.03.2024] .
3. AlexeyAB, Yolo-v3 and Yolo-v2 for Windows and Linux. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://github.com/AlexeyAB/darknet#how-to-train-to-detect-your-custom-objects> [Дата обращения 27.03.2024]
4. Арбузов Роман Сергеевич. Исследования и совершенствование метода оптического коутроля внешней изоляции электрооборудования высокого напряжения: дис. канд. техн. наук : 05.14.12 : Новосибирск, 2005.- 203 с

DEVELOPMENT OF A DECISION-MAKING SYSTEM FOR MAINTENANCE OF ELECTRICAL EQUIPMENT AT SUBSTATIONS

¹Lyashenko Andrey Pavlovich, Master of the Department of Power Engineering

²Kazhekin Ilya Evgenievich, Ph.D. in Engineering, Associate Professor

^{1,2}Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,

e-mail: ¹goron8671@gmail.com; ²kazhekin@mail.ru

Modern methods of electrical equipment diagnostics are subject to the influence of the human factor, which can lead to errors. Industry 4.0 technologies, such as artificial intelligence and decision support systems, can minimize this influence and automate the diagnostic process. In the course of the work, a diagnostic system was developed and tested that is capable of recognizing objects of the power grid and recording electrical discharges. The test results confirmed its ability to detect discharges in various conditions. The work was carried out with the financial support of the Federal Agency for Fisheries (contract No. 122030900054-0).

НАКОПИТЕЛИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ КАК СРЕДСТВО УЛУЧШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МОРСКИХ СУДОВ С СИСТЕМОЙ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Русаков Сергей Михайлович, канд. техн. наук, доцент

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

Цель – анализ возможностей и способов применения современных гибридных накопителей электроэнергии на морских судах с системой динамического позиционирования. Новизна работы заключается в разработке предложений, обеспечивающих повышение экологичности и экономичности морских судов с системой динамического позиционирования. Дополнительно к этому применение гибридных накопителей будет способствовать повышению надежности электроснабжения таких судов.

Морские суда с системой динамического позиционирования (СДП) используются для снабжения морских буровых платформ, для проведения геологических изысканий, бурения, монтажных работ и прокладки трубопроводов и кабелей на морском дне, выполнения операций буксировки крупногабаритных конструкций и других разнообразных операций. Основное требование к электроэнергетическим системам таких судов – бесперебойное снабжение электроэнергией всех потребителей электроэнергии СДП и электроприводов мощного технологического оборудования.

К потребителям электроэнергии в СДП относятся многочисленные и разнообразные датчики положения и курса судна, датчики направления и скорости ветра и волнения, компьютеры управления системой динамического позиционирования, компьютеры для отображения информации о параметрах системы динамического позиционирования, консоли управления системой динамического позиционирования, электроприводы механизмов и устройств позиционирования судна.

Технологическое оборудование морских судов, работающих с СДП, также отличается разнообразием и большой потребляемой мощностью. В частности, суда снабжения буровых платформ обеспечивают прием и передачу топлива, сыпучих и жидких грузов, запчастей и оборудования. Мощность электроприводов грузовой лебедки, насосов подачи топлива, воды и сыпучих грузов по отношению к мощности другого технологического электрооборудования судна выше на один, два порядка.

Особенность морских судов с СДП заключается в избыточности (redundancy) или в использовании принципа резервирования оборудования, связанного с работой СДП. Это особенность также характеризует и источники электрической энергии судовой электростанции, что, в частности, отображено на структурной схеме (рис. 1) электроэнергетической системы судна «LEESE TIDE» [1, 2].

Избыточность по оборудованию СДП позволяет в случае одного или нескольких отказов включить резервное оборудование и сохранить работоспособность системы СДП.

Избыточность по электрической энергии обеспечивает бесперебойность подачи электроэнергии к потребителям при сохранении требуемых показателей её качества. Такая избыточность достигается за счет увеличения количества и мощности источников электроэнергии по отношению к рекомендациям по выбору количества и мощности генераторов для морских судов без системы СДП. Избыточность по количеству источников электроэнергии также значительно повышает надежность электроснабжения потребителей.

Значительный запас мощности на шинах ГРЩ судовой электростанции позволяет без существенных по величине и длительности провалов напряжения обеспечить быстрый пуск и работу мощных асинхронных электродвигателей электроприводов технологического оборудования. Это необходимо для точной и безопасной работы оборудования и судна с СДП. Кроме этого отсутствие провалов напряжения или нахождение их в допустимых пределах обеспечивает надежную работу всех судовых электроприводов, обеспечивающих работу СДП.

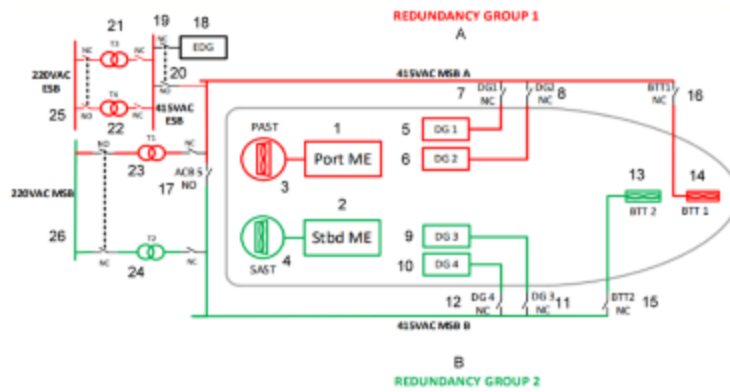


Рис. 1. Структурная схема электроэнергетической системы судна «LEESE TIDE»

На структурной схеме электроэнергетической системы судна «LEESE TIDE» (рис. 1) обозначены:

А, В – две одинаковые по составу группы источников и потребителей электроэнергии, подключаемых к секциям А и В ГРЩ (MSB А и MSB В);

1, 2 – главные двигатели, работающие на азимутальные подруливающие устройства (трастеры) 3 и 4;

3, 4 – кормовые азимутальные подруливающие устройства (трастеры);

5, 6 – ВДГ, подключенные к секциям А ГРЩ (MSB А);

7, 8 – автоматические выключатели генераторов 5 и 6;

9, 10 – ВДГ, подключенные к секциям В ГРЩ (MSB В);

11, 12 - автоматические выключатели генераторов 9 и 10;

13, 14 – носовые туннельные подруливающие устройства;

15, 16 – автоматические выключатели носовых туннельных подруливающих устройств;

17 - межсекционный автоматический выключатель;

18 – АДГ;

19 - автоматический выключатель АДГ;

20 - автоматический выключатель, через который подается питание на аварийный распределительный щит (АРЩ, ESB) от секций А ГРЩ (MSB);

21, 22 – трансформаторы напряжения 415В/220В для питания потребителей секции 25 АРЩ (ESB) напряжением 220В ;

23, 24 - трансформаторы напряжения 415В/220В для питания секции потребителей напряжением 220В ГРЩ от секций А или В ГРЩ (MSB) напряжением 415В;

25, 26 – секции потребителей 220 В АРЩ и ГРЩ.

В таблице 1 представлены параметры потребителей электроэнергии типового судна снабжения морской платформы [1]. Для обеспечения электроэнергией потребителей этого судна используются три вспомогательных дизель-генератора (ВДГ) по 800 кВт и один ВДГ мощностью 330 кВт.

Однако работа судовой электростанции с избыточностью по вырабатываемой электроэнергии происходит при существенной недогрузке ВДГ, которые работают одновременно на шины ГРЩ. Это особенно характерно для судов снабжения. В таблицах 2 и 3 приведены режимы работы соответствующие разным погодным условиям и загрузка ВДГ при этих условиях [3]. Информация в таблицах 2 и 3 представляет собой несколько последовательных выборок данных из зарегистрированной совокупности показаний средств контроля погодных условий, мощности ВДГ и основных потребителей судовой электростанции во время стабилизации положения судна посредством СДП и работы технологического оборудования. Из данных представленных в таблице 3 следует, что в установившемся режиме работы судовой электростанции фактическая нагрузка электростанции находится в пределах от 10 % до 22 % и не превышает 25 % доступной мощности.

Параметры потребителей электроэнергии судна снабжения

Наименование групп и приемников электроэнергии	Количество приемников	Номинальные параметры приемника электроэнергии			
		Установленная мощность, кВт	Коэффициент мощности	К.п.д.	Потребляемая мощность, кВт
Средства судовождения и связи					
Гирокомпас, лаг, эхолот	-	4,7	0,7	-	4,7
Радиосвязь	-	9.6	0,8	-	9.6
Приборы радиолокации	-	18	0,8	-	18
Авторулевой	1	2,7	0,85	-	2,7
Палубные механизмы					
Электропривод брашпиля	2	55	0,84	0,8	65,7
Электропривод грузовой лебедки	4	36	0,85	0,8	169,2
Электроприводы судовых механизмов					
Электроприводы гидравлических механизмов кормовых подруливающих устройств	2	45	0,85	0,8	112,5
Электропривод носового подруливающего устройства №1	1	610	0,25	0,8	762,5
Электропривод носового подруливающего устройства №2	1	575	0,25	0,8	718,8
Электропривод насоса подачи топлива	2	80	0,85	0,8	200
Электропривод насоса подачи воды	2	84	0,85	0,8	210
Электропривод воздушного компрессора подачи сыпучих грузов	2	126	0,85	0,8	315
Электроприводы вспомогательных механизмов СЭУ					
Электропривод насоса подачи топлива ГД	2	15	0,85	0,8	37,5
Электропривод насоса смазки ГД	2	5,5	0,85	0,8	13,8
Электропривод насоса охлаждающей жидкости ГД	2	5,5	0,85	0,8	13,8
Электропривод насоса подачи топлива ВДГ	2	1,5	0,85	0,8	3,75
Электропривод насоса смазки ВДГ	2	1,5	0,85	0,8	3,75
Электропривод насоса охлаждающей жидкости ВДГ	2	1,5	0,85	0,8	3,75

Таблица 2

Параметры режима работы: погодные условия и состояние моря (возмущения СДП)

№ п/п	Ветер, курс / скорость, / узлов	Течение, курс / скорость, / узлов	Волнение, высота, м / период, с / курс	Температура: воздуха / забортной воды, °С
1	357 ⁰ NNW / 3	317 ⁰ WNW / 0,5	0,3 / 2,5 / NW	43 / 30
2	339 ⁰ NNW / 15	78,5 ⁰ ENE / 1,2	1 / 4,6 / NNW	42 / 31
3	41,7 ⁰ NNE / 22,8	87,4 ⁰ ENE / 3	2,5 / 3,5 / NE	42 / 31
4	94,8 ⁰ ESE / 11,5	105,80 ESE / 0,8	0,8 / 3,7 / ESE	37 / 28

**Нагрузка генераторов (ВДГ1 – ВДГ4), мощность, потребляемая электродвигателями
носовых подруливающих устройств (БТ1 и БТ2) и мощность,
потребляемая с шин А и В в соответствующих режимах работы судна с СДП**

№ п/п	ВДГ1, (800 кВт)	ВДГ2 (800 кВт)	ВДГ3 (330 кВт)	ВДГ4 (800 кВт)	БТ1 (575 кВт)	БТ2 (610кВт)	Шина А, фактическая / доступная мощность, кВт, (%)	Шина В, фактиче- ская/ доступная мощность, кВт, (%)
1	102	95	31	74	123	125	189/1333 (10% / 95%)	107 / 967 (9% / 95%)
2	174	165	65	159	139	145	354 / 1169 (22% / 95%)	225 / 848 (20% / 95%)
3	118	117	37	130	278	263	236 / 1284 (15% / 95%)	167 / 906 (15% / 95%)
4	162	150	75	205	121	128	307 / 1183 (20% / 95%)	286 / 789 (25% / 95%)

При работе приводных дизельных двигателей с пониженной мощностью резко повышается удельный эффективный расход топлива и смазочного масла, происходит выброс и отложение мелких частиц смазочного масла в выхлопном коллекторе двигателя [4]. Это может привести к возгоранию накопленных в коллекторе отложений смазочного масла.

Длительная работа ВДГ с недогрузкой приводит к перерасходу топлива и смазочного масла и повышению суммарного выброса вредных продуктов сгорания топлива и масла в атмосферу.

Таким образом, возникает задача компенсации серьезных отрицательных экологических и экономических последствий длительной работы ВДГ с избыточной электрической мощностью. Одним из эффективных способов решения этой задачи является использование накопителей электрической энергии. Они должны подпитывать судовую сеть во время пуска мощных асинхронных электродвигателей, обеспечивающих действие СДП и технологического оборудования, и препятствовать появлению провалов напряжения до взятия нагрузки на шинах ГРЩ резервными ВДГ.

Использование накопителей позволяет исключить существенную разницу между фактически потребляемой электроэнергией и располагаемой мощностью работающих ВДГ. Как было отмечено выше, на судах, при выполнении операций требующих работы СДП, работающие ВДГ обеспечивают многократный запас мощности.

Современные накопители электроэнергии выполняются на основе аккумуляторов и суперконденсаторов [5]. Наибольшее распространение, в частности на городском транспорте, получили аккумуляторные накопители. К ним относятся широко известные кислотные, щелочные и литий-ионные аккумуляторы.

Суперконденсаторы, как и обычные конденсаторы, являются накопителями электрического заряда. Однако за счет двойного электрического слоя современные суперконденсаторы отличаются большой электрической емкостью и удельной мощностью, высокой скоростью накопления и значительной степенью отдачи электрического заряда.

Гибридный накопитель энергии представляет собой комплекс, в который входят аккумуляторная батарея, как долговременный накопитель и набор суперконденсаторов, как кратковременный накопитель. В такой комплекс входят подсистемы защиты, контроля и мониторинга параметров накопителя, подсистема, обеспечивающая преобразование постоянного тока в переменный и параллельную работу с сетью переменного тока [6]. В гибридных накопителях сочетаются лучшие характеристики аккумулятора (высокая электроемкость и длительность хранения) и суперконденсатора (высокая скорость накопления и отдачи энергии).

К основным характеристикам накопителей, определяющим способность качественно решать задачи сглаживания пикового потребления электроэнергии в автономных энергосистемах, относятся следующие:

- мощность (определяется величиной мощности, которую накопитель может выдать в энергосистему);
- энергоемкость (энергия, которая может быть запасена накопителем и поставлена в энергосистему);
- время отклика (время перехода накопителя из нерабочего состояния в состояние поставки энергии с требуемыми параметрами);
- время разряда (время, в течение которого мощность и энергия поставляются в энергосистему без подзарядки).

Структурная схема гибридного накопителя, предназначенного для использования в судовых электроэнергетических системах, представлена на рис. 2.

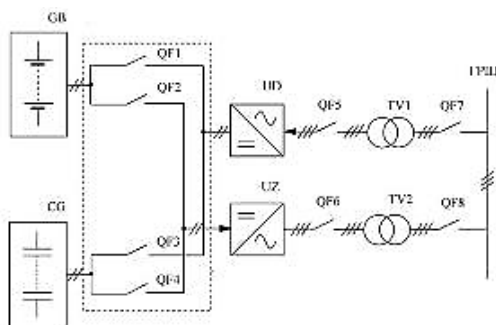


Рис. 2. Структурная схема гибридного накопителя, предназначенного для использования в судовых электроэнергетических системах

На рис. 3 приняты следующие обозначения:

GB – батарея литий-ионных аккумуляторов;

CG – батарея суперконденсаторов;

QF1 ... QF8 – автоматические выключатели для подключения элементов накопителя к главному распределительному щиту (ГРЩ) в процессе зарядки и передачи электроэнергии;

UD – выпрямительный преобразователь для зарядки аккумуляторного и конденсаторного накопителей;

UZ – инверторный преобразователь для передачи электрической энергии от накопителей на ГРЩ;

TV1, TV2 – понижающий и повышающий трансформаторы для согласования параметров преобразователей UD и UZ с судовой сетью.

На структурной схеме не показано устройство управления, которое должно обеспечивать координацию процессов накопления и отдачи электроэнергии с работой судовой электростанции, а также подсистемы защиты и мониторинга. Эти устройства и подсистемы должны выполняться на базе программируемых логических контроллеров.

Алгоритмы управления циклами зарядки и разрядки накопителей, защиты и мониторинга должны разрабатываться с учетом назначения судна и режимов его работы. Необходима оптимизация соотношения между количеством и мощностью ВДГ и количеством и мощностью накопителей. Требуется тщательный анализ экономического эффекта от использования накопителей энергии на каждом конкретном судне с учетом технического состояния оборудования. Немаловажно и место размещения накопителя - в машинном отделении, рядом с ГРЩ или на удалении, рядом с мощными потребителями. От этого зависят затраты на обеспечение условий безопасной и надежной работы накопителей – дополнительное охлаждение или нагрев для поддержания оптимальных условий их работы.

На основании выполненной работы можно сделать следующие выводы:

- использование на морских судах с системой динамического позиционирования современных гибридных накопителей электроэнергии позволяет организовать работу генераторных агрегатов без постоянной работы с существенно избыточной мощностью и за счет этого снизить расход топлива и сократить выбросы с обработавшими газами вредных веществ в атмосферу;

- использование гибридных накопителей электроэнергии и на других типах морских судов позволяет при соответствующем алгоритмическом обеспечении также решать задачи сглаживания пикового потребления электроэнергии при пуске мощных потребителей;
- накопители электроэнергии позволяют применять на судах возобновляемые источники электроэнергии в виде солнечных батарей и компактных ветрогенераторов вертикального типа;
- накопители электроэнергии позволяют повысить степень утилизации тепловой энергии, выбрасываемой с отработавшими газами путем использования полупроводниковых термоэлектрических преобразователей и утилизационных турбогенераторов, приводимых в движение парами легкокипящих жидкостей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Leese-Tide-Brochure-5-Pages-2368. – TIDEWATER, 2016
2. DU-G43-2417-R4997 Leese Tide Annual DP Trials Rev 0, 2022
3. Демин М.К. Исследование влияния эксплуатационных факторов на работу СЭС судна «Leese Tide» с системой динамического позиционирования / Выпускная квалификационная работа, руководитель Русаков С.М. – БГАРФ, 2023. – 78 с.
4. Алексеев Н.А., Макаров С.Б., Портнягин Н.Н. Микропроцессорные системы управления электроэнергетическими установками промысловых судов. – М.: Колос, 2008. – 424 с.
5. Зырянов, В.М. Системы накопления энергии: российский и зарубежный опыт / В.М Зырянов, Н.Г. Кирьянова, И.Ю. Коротков [и др.] // Энергетическая политика. – 2020. – № 6(148). – С. 76–87.
6. Бердников Р.Н. Гибридный накопитель электроэнергии для ЕНЭС на базе аккумуляторов и суперконденсаторов / Р.Н. Бердников, В.Е. Фортов, Э.Е. СОН, К.К. Дельщикова, А.З. Жук, Н.Л. Новиков, Ю.Г Шакарян. // Энергия единой сети. – 2013. – №2(7). – С.41

ENERGY STORAGE AS A MEANS OF IMPROVING ENVIRONMENTAL AND ECONOMIC INDICATORS MARINE VESSELS WITH THE SYSTEM DYNAMIC POSITIONING

Rusakov Sergey Mikhailovich, Candidate of Technical Sciences, Associate

Baltic Fishing Fleet State Academy FSBEI HE "KSTU",
Kaliningrad, Russia, e-mail: rusakov.sm@bgarf.ru

The purpose of the work is to analyze the possibilities and ways of using modern hybrid power storage devices on ships with a dynamic positioning system. The novelty of the work lies in the development of proposals to improve the environmental friendliness and efficiency of marine vessels with a dynamic positioning system. In addition, the use of hybrid storage devices will contribute to improving the reliability of power supply to such vessels.

ПОДХОД К РЕАЛИЗАЦИИ СЕЛЕКТИВНОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОВТОРНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ КАБЕЛЬНО-ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

¹Старостин Егор Сергеевич, аспирант кафедры энергетики

²Харитонов Максим Сергеевич, канд. техн. наук, доцент кафедры энергетики

¹Филиал АО «СО ЕЭС» Балтийское РДУ,

^{1,2}ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,
Калининград, Россия, e-mail: starostin-es@list.ru

Рассмотрены структура и принцип действия алгоритма работы системы селективного АПВ в сравнении с классическим исполнением АПВ для кабельно-воздушных линий среднего напряжения. Представлены результаты разработки устройства регистрации и передачи направления мощности, как составного элемента полевого уровня интеллектуальной системы селективного АПВ кабельно-воздушных ЛЭП. Исследования проведены при поддержке Фонда содействия инновациям (соглашение № 18639ГУ/2023).

Процесс развития электроэнергетики неразрывно связан с увеличением протяженности распределительных сетей и их нагрузкой. В то же время процесс урбанизации неизбежно влечет за собой расширение застроенной среды. Известно, что воздушные ЛЭП имеют преимущество перед кабельными ЛЭП в связи с более низкими капитальными затратами при строительстве, простотой в обслуживании и эксплуатации. Однако в условиях развития застроенной среды широко применяется замена воздушных ЛЭП на кабельные. В результате таких реконструкций на ранее полностью воздушных ЛЭП возникают участки, выполненные кабелем. Таким образом, урбанизация неизбежно ведет к росту числа кабельно-воздушных ЛЭП. На рис. 1 - 2 представлены темпы роста протяженности распределительных сетей по Калининградской области в период с 2018 по 2022 гг. и по территории РФ с 2016 по 2020 гг. [1-3].

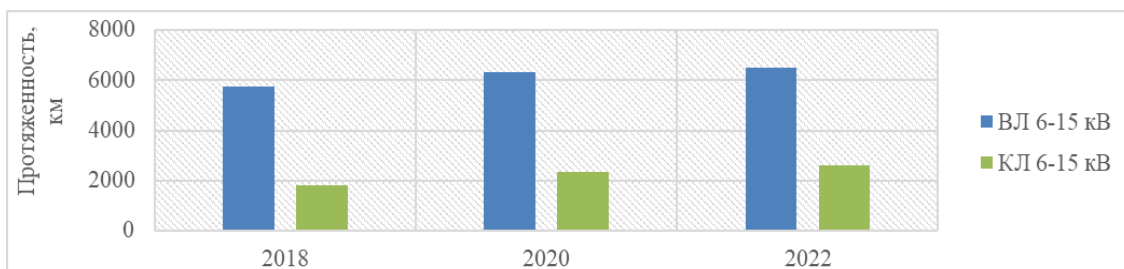


Рис. 1. Темпы роста протяженности распределительной сети в Калининградской области

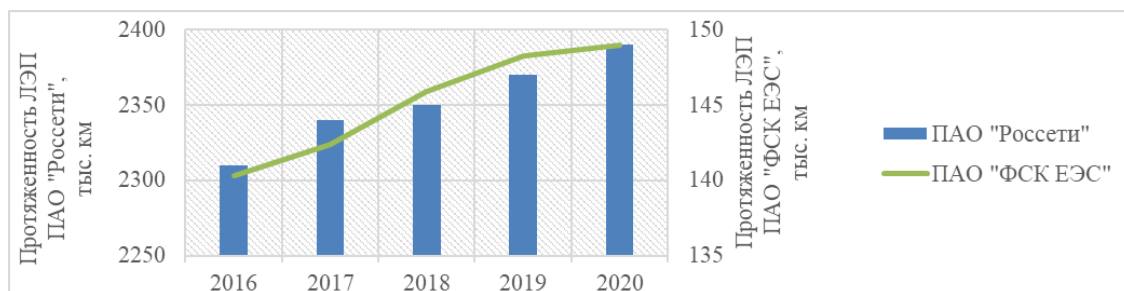


Рис. 2. Темпы роста протяженности распределительных сетей по территории Российской Федерации

В соответствии с ПУЭ п. 3.3.2: «должно предусматриваться автоматическое повторное включение воздушных и смешанных (кабельно-воздушных) линий всех типов напряжением выше 1 кВ, отказ от применения АПВ должен быть в каждом отдельном случае обоснован» [4]. Таким образом, при наличии протяженных относительно общей длины ЛЭП кабельных участков, АПВ кабельно-воздушной линии, как правило, не допускается. В таком случае целесообразным является применение системы селективного АПВ (САПВ), разрешающего работу АПВ при повреждении на участках ВЛ и запрещающего работу АПВ при повреждении КЛ. Эффективность применения САПВ показана в исследованиях [5,6].

В результате анализа по информационно-поисковой системе Роспатента установлено, что существующие решения в области САПВ основаны на использовании экранов и металлических оболочек кабелей [7-8] и имеют ряд недостатков:

1) техническая сложность и возможность недостоверного измерения тока заземления экранов кабелей;

2) необходимость прокладки волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), или дополнительная нагрузка существующих, и использования дорогостоящего оборудования;

3) сложность монтажа;

4) высокая стоимость и крупные габариты используемых трансформаторов тока;

5) возможность высокочастотных помех и конфликтов с другими защитами и автоматикой;

6) сложная структура систем при наличии 2-х и более кабельных участков ЛЭП.

В результате анализа рынка промышленного оборудования было установлено, что некоторые решения способны облегчить локализацию повреждений, но остаются нерешенными вопросы реализации САПВ.

Таким образом, актуальным вопросом в области повышения надежности распределительных сетей является разработка интеллектуальной системы САПВ, исключающей недостатки существующих запатентованных решений и обеспечивающей возможность беспрепятственного внедрения в существующие электроэнергетические системы с соответствующей экономической выгодой.

Интеллектуальная система САПВ

Разрабатываемую интеллектуальную систему САПВ отличает от традиционного исполнения АПВ (рис. 3) использование нового способа определения места повреждения кабельно-воздушной ЛЭП, основанного на сравнении электрических параметров режима работы электрической сети на переходных пунктах (ПП) КВЛ (рис. 4).

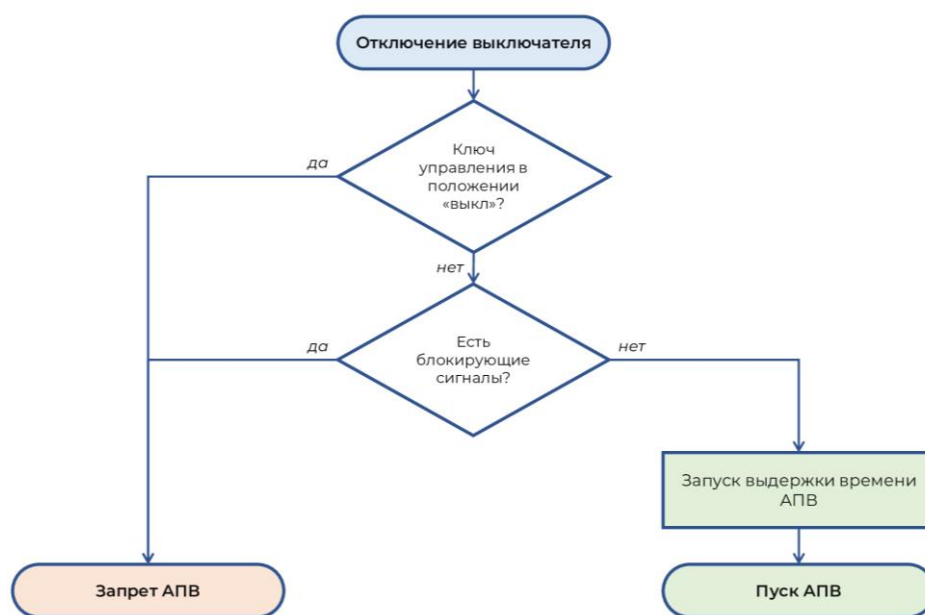


Рис. 3. Логическая блок-схема алгоритма АПВ

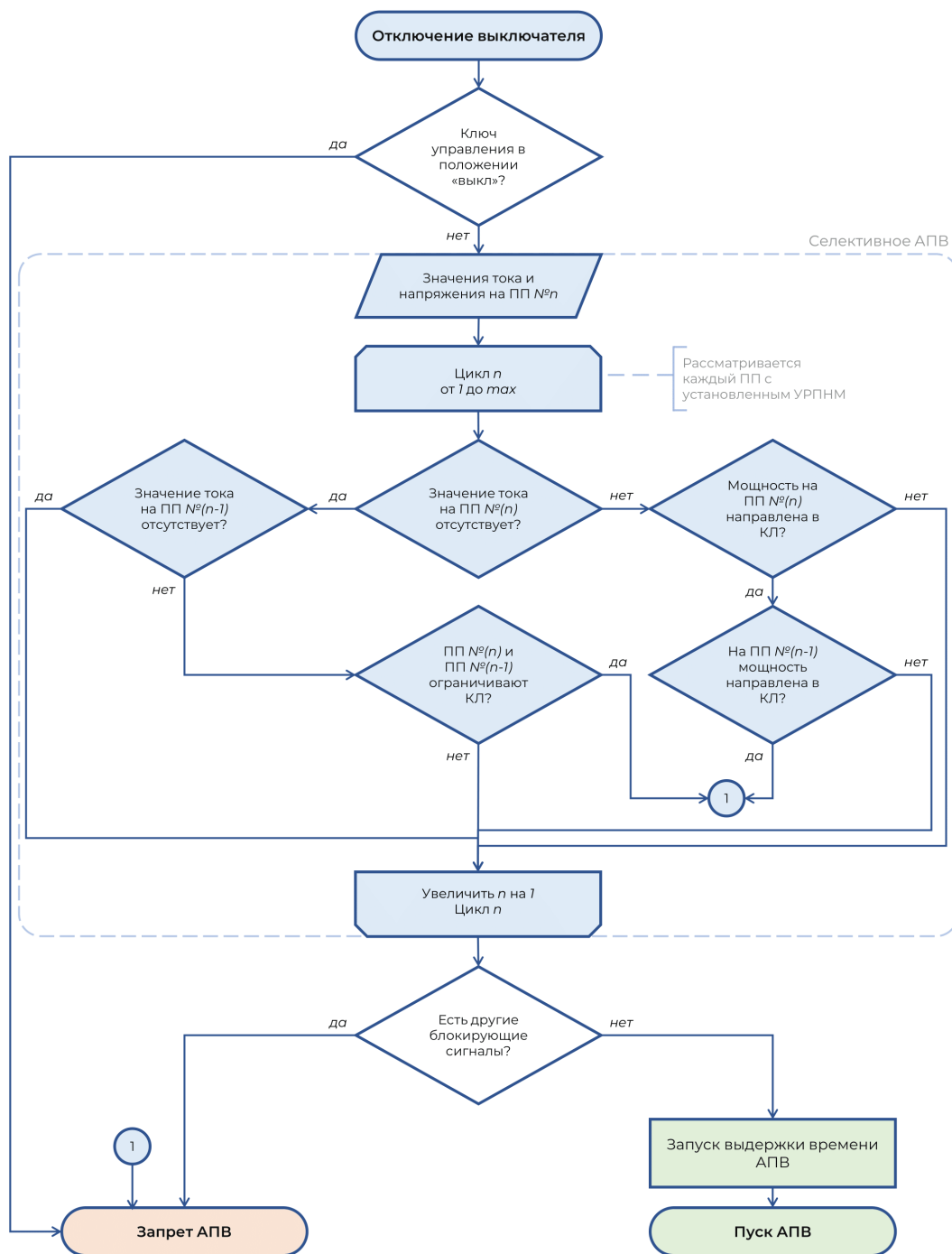


Рис. 4. Логическая блок-схема алгоритма интеллектуальной системы САПВ

Как видно из рис. 4, интеллектуальная система САПВ может быть легко интегрирована в существующие системы РЗА в соответствии с возможностью гибкого параметрирования логических входов современных микропроцессорных терминалов.

Устройство регистрации и передачи направления мощности

В качестве полевого устройства интеллектуальной системы САПВ, представляющего собой программно-аппаратный комплекс для регистрации направления мощности в узле электрической сети с целью обеспечения функциональной возможности реализации интеллектуальной системы САПВ КВЛ в распределительных сетях среднего напряжения, предлагается разработанное устройство регистрации и передачи направления мощности (УРПНМ), предполагаемое к установке на ПП КВЛ в соответствии с рис. 5.

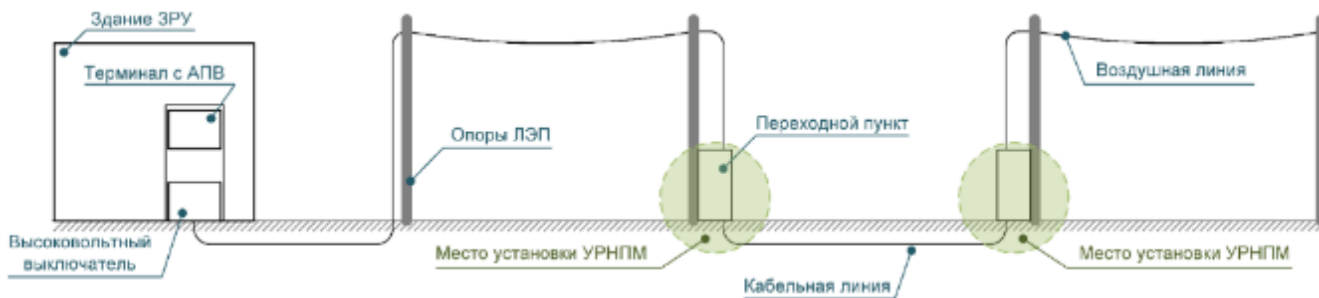


Рис. 5. Схема расположения УРПНМ на ЛЭП

Принципиальная схема УРПНМ представлена на рис. 6.



Рис. 6. Принципиальная схема УРПНМ

Аппаратная часть УРПНМ в соответствии с рис. 4, 6 выполнена на базе микроконтроллера с открытым исходным кодом АТмега 328. На рис. 7 представлена конструкция технической части разработанного УРПНМ.

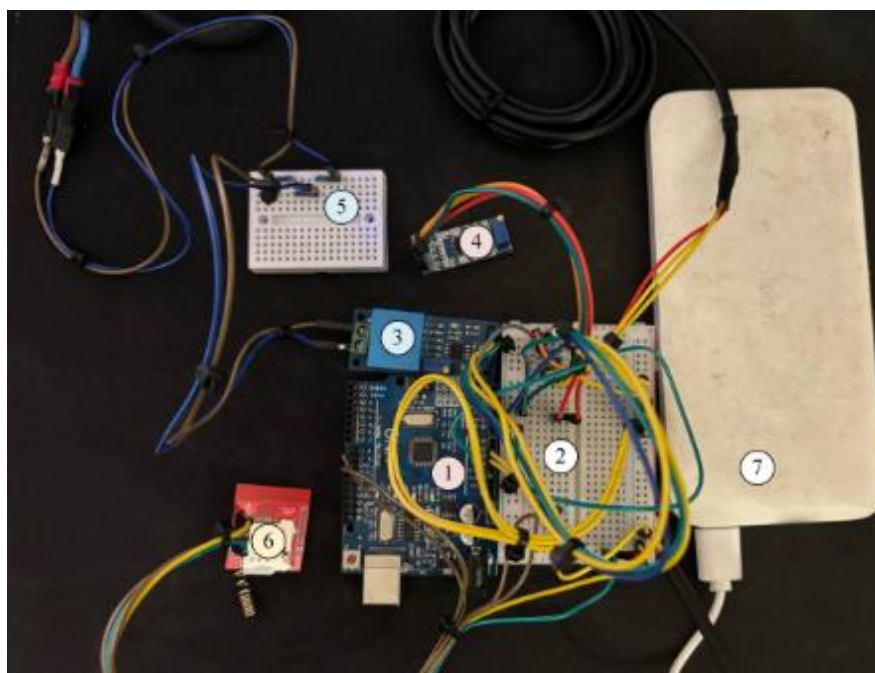


Рис. 7. Конструкция аппаратной части УРПНМ

На рис. 7 представлены следующие элементы: 1 – плата микроконтроллера с открытым исходным кодом; 2 – макетная плата; 3 – модуль ZMPT101B, включающий трансформатор с коэффициентом трансформации равным единице, служащий для создания гальванической развязки между первичной и вторичной цепью; 4 – модуль операционного усилителя LM358, служащий для усиления сигнала воздушного трансформатора тока на немагнитном каркасе; 5 – делитель напряжения 220/5 В; 6 – GSM-модуль SIM800L; 7 – внешний портативный аккумулятор, необходимый для питания GSM-модуля.

Для аппаратной части устройства была разработана программа для ЭВМ. В программе реализовано два алгоритма работы, обеспечивающих возможность корректной работы УРПНМ как в сети с односторонним питанием, так и в сети с двусторонним питанием. В случае работы в сети с односторонним питанием устройство служит в качестве датчика тока. Вывод о местоположении повреждения на ЛЭП, и соответственно решение о запрете АПВ, делается на основе анализа показаний датчиков по концам кабельного участка КВЛ. В случае работы в сети с двусторонним питанием в программу для ЭВМ заложен алгоритм вычисления угла сдвига фазы между током и напряжением на ПП КВЛ. По полученному значению угла может быть сделан вывод о направлении мощности в узле электрической сети. В таком случае сигнал запрета АПВ формируется при направлении мощности в КЛ на обоих ограничивающих кабельный участок ПП.

По результатам проведенных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ был изготовлен прототип устройства (рис. 8), представляющий собой программно-аппаратный комплекс для регистрации и передачи направления мощности.

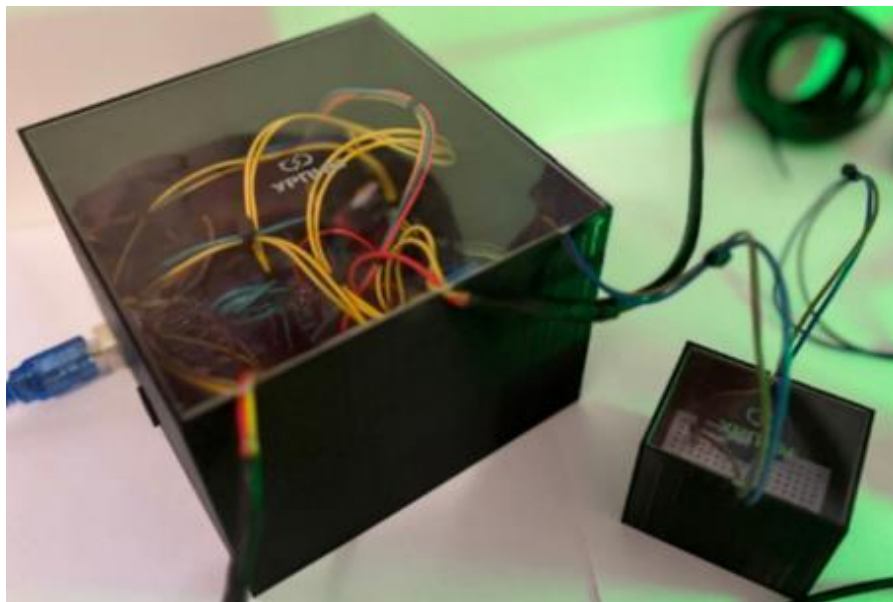


Рис. 8. Прототип устройства регистрации и передачи направления мощности

Выводы

В результате проведенного комплекса исследований было разработано устройство регистрации и передачи направления мощности УРПНМ, необходимое для реализации интеллектуальной системы САПВ на полевом уровне. Разработана техническая часть устройства и программа для ЭВМ. Устройство позволяет определить повреждение на ЛЭП, облегчить его локализацию и, в случае принадлежности повреждения к кабельному участку КВЛ, обеспечить селективность АПВ. Принцип работы устройства предусматривает два алгоритма работы: для сети с односторонним или с двусторонним питанием. Функционал программы позволяет устройству: проводить и обрабатывать измерения электрических параметров режима первичной электрической цепи; проводить вычисления угла сдвига фазы между током и напряжением, определяющего направление мощности в узле электрической сети; отправлять сообщение об изменениях в режиме работы первичной электрической цепи. Таким образом, разработанная программа полностью позволяет реализовать требуемый функционал устройства регистрации и передачи направления мощности.

УРПНМ в составе интеллектуальной системы САПВ позволит снизить недоотпуск электроэнергии и повысить надежность распределительной сети среднего напряжения. Техничко-экономическая эффективность внедрения доказана улучшением показателей SAIDI и SAIFI на модернизируемом участке сети в результате применения САПВ [5,6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О схеме и программе перспективного развития электроэнергетики Калининградской области на 2022-2026 годы и признании утратившими силу отдельных решений Губернатора Калининградской области: Распоряжение Губернатора Калининградской области от 28.05.2021 № 19-р // URL: <https://infrastruktura.gov39.ru/activity/fuel.php> (дата обращения: 27.08.2024).

2. ПАО «Россети». Акционерам и инвесторам. URL: <https://old.rosseti.ru/investors/> (дата обращения: 27.08.2024).

3. ПАО «ФСК – Россети». Обзор компании. URL: https://old.fsk-ees.ru/shareholders_and_investors/company_overview/ (дата обращения: 27.08.2024).

4. Об утверждении глав Правил устройства электроустановок: приказ Министерства Энергетики Российской Федерации от 08.07.2002 № 204. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456072457> (дата обращения: 27.08.2024).

5. Старостин, Е. С. Оценка надежности применения САВС и САПВ на примере участка электрической сети / Е. С. Старостин // Балтийский морской форум : Материалы XI Международного Балтийского морского форума. В 8-ми томах, Калининград, 25–30 сентября 2023 года. – Калининград: Калининградский государственный технический университет, 2023. – С. 137-143.

6. Старостин, Е. С. Повышение надежности распределительных сетей путем внедрения САВС и селективного АПВ / Е. С. Старостин // Известия КГТУ. – 2024. – № 73. – С. 125-139.

7. Патент № 2669542 Российская Федерация, МПК G01R 15/24 (2006.01), H02H 3/06 (2006.01). Система селективного блокирования автоматического повторного включения на комбинированных кабельно-воздушных линиях электропередачи : № 2018101148 : заявл. 12.01.2018 : опубл. 11.10.2018 / Нудельман Г.С., Балашов С.В., Ерохин Е.Ю., Сдобин А.В., Шапеев А.А., Артюнов С.А., Смекалов В.В. – 15 с.

8. Патент № 2663413 Российская Федерация, МПК H02H 3/06 (2006.01). Способ автоматического повторного включения кабельно-воздушной линии электропередачи : № 2017130666 : заявл. 29.08.2017 : опубл. 06.08.2018 / Куликов А.Л., Лоскутов А.А., Петрухин А.А. – 7 с.

APPROACH FOR IMPLEMENTING SELECTIVE AUTOMATIC RECLOSING OF MIXED POWER TRANSMISSION LINE IN A MEDIUM-VOLTAGE DISTRIBUTION NETWORK

¹Starostin Egor Sergeevich, post-graduate student of the Department of Energy

²Kharitonov Maxim Sergeevich, Dr.-Ing., Associate Professor of the Department of Energy

¹Branch of the JSC "SO UPS" "Regional Dispatching Management of Power System of the Kaliningrad region"

^{1,2}Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,
e-mail: starostin-es@list.ru

The article considers the structure and principle of operation of the algorithm of the selective auto-reclosing system in comparison with the classical version of the auto-reclosing system for medium-voltage cable and overhead lines. The results of the development of a device for recording and transmitting power directions as an integral element of the direct run level of the intellectual system of selective auto-reclosing system of a mixed power lines are presented. The research was carried out with the support of the Innovation Promotion Fund (Agreement No. 18639GU/2023).

ХИМИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ТОКА ДЛЯ СУДОВ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

¹Хорошенький Александр Владимирович, аспирант

²Романовский Виктор Викторович, д-р техн. наук, профессор

³Бежик Артём Сергеевич, инженер

^{1,2,3}ФГБОУ ВО «ГУМРФ им. адмирала С. О. Макарова», Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: khoroshenkii@yandex.ru

В настоящее время наблюдается глобальное движение к альтернативным и устойчивым источникам энергии в морском секторе. Все большие судов строятся с использованием химических источников тока (ХИТ). Настоящая статья рассматривает использование аккумуляторных систем в морском транспорте. Исследование включает в себя различные аспекты использования высокомоощных батарейных систем, применение разных типов аккумуляторов, их экологическую составляющую, а также меры безопасности при использовании аккумуляторных систем. Также уделяется внимание использованию аккумуляторных блоков для расширения возможностей проходимости судов.

Морская индустрия в настоящий момент проходит через период трансформации, вызванной стремлениями человечество сохранить природу от последствий развития технологий, выбросов парниковых газов и др. По этой причине отмечается значительный рост производства судов с гребными электрическими установками и электроэнергетическими установками, которые основаны на передовых технологиях, связанных прежде всего с использованием аккумуляторных систем. Мощный прорыв в развитии судоходства на аккумуляторных системах сделает крупный проект по разработке China Ocean Shipping Group полностью электрического контейнеровоза Greenwater 01. Рассмотрим важные факторы, которые способствуют увеличению дальности хода судов с энергетическими установками с химическими источниками тока.

Контейнеровоз Greenwater 01 оснащен основным блоком батарей с емкостью более 50 000 кВт·ч. Используются аккумуляторы на основе лития, размещенные в стандартных 20-футовых контейнерах. Мощность судна может быть увеличена за счет добавления дополнительных контейнеров с батареями, каждый из которых добавляет 1600 кВт·ч. Такой модульный подход не только обеспечивает гибкость в регулировании энергетических требований, но и повышает дальность и эффективность судна.

В последние десятилетия наблюдается разработка и внедрение более мощных энергетических установок на основе химических источников тока. Рассмотрим этот рост мощности на примере нескольких инновационных проектов, таких как китайский контейнеровоз Greenwater 01, норвежский Yara Birkeland и японский Power ARK 100. Проанализируем типы аккумуляторов, используемых в этих проектах, рассмотрим роль мощностных блоков в повышении производительности, увеличении энергоэффективности судов и диагностику ХИТ.

Greenwater 01:

Китайский контейнеровоз Greenwater 01 является первым в мире полностью электрическим контейнеровозом. Его основная батарея имеет ёмкость более 50 000 кВт·ч и использует литий-железо-фосфатные аккумуляторы. Этот контейнеровоз установил несколько мировых рекордов в своей области и демонстрирует потенциал аккумуляторных систем в морской индустрии [1].

Yara Birkeland:

Норвежский Yara Birkeland также представляет собой перспективный проект в области судов с ХИТ. Этот контейнеровоз будет работать на электричестве, собираемом от морских ветровых электростанций.

Судно имеет длину 80 метров (260 футов), ширину 14,8 метра (49 футов) и глубину 12 метров (39 футов). Его осадка составляет 6 метров (20 футов). Электродвигатели приводят в движение два азимутальных модуля и два туннельных двигателя. Аккумуляторы мощностью 6,7 МВт ч питают электродвигатели, обеспечивая оптимальную скорость 6 узлов (11 км / ч) и максимальную скорость 10 узлов (19 км / ч) [2].

Power ARK 100:

Японская компания PowerX разрабатывает судно Power ARK 100, которое будет использоваться для транспортировки электроэнергии с морских ветровых ферм на берег. Это тримаран длиной 100 метров, работающий на электричестве и имеющий запас хода 300 км. На судне будет установлено 100 аккумуляторов, емкостью 220 МВт ч [3].

Сводные данные судовых пропульсивных аккумуляторов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Проект	Емкость АКБ [кВт·ч]	Год постройки
Greenwater 01	50 000 (+38 400)	2024
Yara Birkeland	6 700	2021
Power ARK 100	220 000	2025

Анализируя данную таблицу, мы видим, что запрос на аккумуляторные суда растет и масштабируется.

Выбор судовых аккумуляторов

Наиболее перспективными в настоящее время считаются литий-ионные и литий-полимерные аккумуляторы, то есть аккумуляторы, построенные на основе применения лития в качестве анодного материала. Уже сегодня они применяются для широкого круга потребителей и трудно назвать область техники без Li-ion аккумуляторов. Ощутимый скачок в развитии литий-ионных АБ для увеличения мощности связан с автомобильной промышленностью [4].

Литий-железо-фосфатные аккумуляторы (LiFePO4)

Литий-железо-фосфатные аккумуляторы более стойкие к перезаряду.

В случае длительного времени приложения к ним напряжения деградационные последствия заметно меньше, чем у других систем.

Соединение Fe-P-O сильнее, чем Co-O, поэтому при возникновении экстремальных ситуаций (короткое замыкание, перегрев) атомы кислорода труднее вывести. Такая стабилизация окислительно-восстановительных реакций также ускорит перенос ионов. Только при нагреве более 800 °С аккумулятор разрушается, причем без выброса тепла [5].

Литий-титанатный аккумулятор (Li4Ti5O12)

Аккумулятор оперативно заряжается и обеспечивает высокий ток разряда – 1 °С, то есть в 10 раз превышающий показатель емкости. Литий-титанатный аккумулятор безопасен, с отличными низкотемпературными характеристиками: при минус 30 °С его емкость сохраняется на уровне 80 %. Номинальное напряжение ячейки – 2,8 В, а работоспособным аккумулятор считается до 1,8 В. Эффективная эксплуатация до –40 °С окружающего воздуха. Уровень саморазряда составляет 2–5 % в месяц [5].

Литий-титанатное устройство поддерживает режимы ускоренной зарядки, допускает эксплуатацию при низких температурах. Изделие не подвержено тепловым пробоям. Сдерживается распространение высокой стоимостью и низкой энергоемкостью.

Роль мощностных блоков

Контейнеровоз Greenwater 01 оснащен заменяемыми блоками, что дает большой потенциал для использования. Мощностные блоки позволяют максимально эффективно использовать аккумуляторное судно, сокращая время простоя на зарядке или минимизировать используемый ресурс судном, рассчитывая необходимый объем электрической энергии для конкретного маршрута. Они обеспечивают стабильное электроснабжение и управление энергией, а также обеспечивают безопасность и эффективность работы аккумуляторных систем.

Судно оснащено основной батареей емкостью более 50 000 киловатт часов и платформой, позволяющей при необходимости установить дополнительные батареи.

Согласно отчетам, емкость стандартного блока батарей размером с контейнер может составлять 1 600 кВт ч (на блок). Можно добавить 24 таких блока. По данным компании, путешествие, потребляющее 80 000 кВт ч электроэнергии, может быть завершено на полной мощности.

Применение мощностных аккумуляторных блоков может изменять емкость ходовых батарей судна от 50 000 кВт ч до 88 400 кВт ч т.е. дополнительно 76,8 % к основным блокам судна. Данные блоки можно заряжать в береговых зонах и менять на грузовых операциях.

Технология заменяемых контейнеров с ХИТ, позволяет уменьшить время зарядки ходовых аккумуляторов судов. Но для данной технологии требуется подготовлена соответствующая архитектура порта. В частности, мощные зарядные станции, который способны заряжать само судно, а также терминал с зарядными станциями, для сменных контейнерных блоков.

Для заряда контейнера мощностью 1600 кВт·ч., требуется подобрать зарядную станцию.

Станция должна выполнять несколько условий.

- соответствовать требованиям для зарядной инфраструктуры в порту, безопасность.
- способность заряжать контейнеры с ХИТ в быстром режиме, обеспечивающей полную зарядку, к следующему визиту судна [6].

Для расчета мощности зарядной станции примем, что напряжение на ХИТ 614 В.

$$E = \frac{U * C}{1000};$$

где, E- энергия (кВт ч);

U- напряжение (В);

C- Емкость (А ч).

Подставив значения, можно получить, что емкость (С), для нашей системы равен 2605.8 (А ч).

Метод заряда аккумулятора может меняться. От быстрого заряда, где используется ток от 0,3 до 1,0 от С (в среднем эквиваленте). Для защиты АКБ от перегрева, при таких больших токах применяются системы защиты по температуре. В системах быстрого заряда отслеживают изменение температуры АКБ и при достижении критических температур (когда температура АКБ значительно превышает температуру окружающей среды) переводит на медленный режим заряда 0.1 от С.

К примеру, для оценки технического состояния судового электрооборудования и ХИТ компанией АВВ разработана система дистанционного диагностирования типа «RDS4Marine».

Данная система объединяет три главные функции:

– дистанционная коммуникация, при которой применяется безопасный, SSL-зашифрованный коммуникационный туннель между потребителем и сервисной службой компании производителя.

– анализ технических решений. В основе системы СДД применяется специализированный контроль и диагностическая платформа для сбора, хранения и анализа данных от отдельных компонентов, подсистем и полных интегрированных технических решений. СДД предоставляет легкий доступ береговым инженерным службам через линию спутниковой связи к судовым данным о состоянии всего комплекса электроэнергетической системы. Собранный информация сохраняется на электронных носителях на борту судна и может быть дистанционно передана для осуществления анализа технического состояния систем.

– сервисное обслуживание. Используя диагностическую платформу вместе с современной коммуникацией, сервисные инженерные службы могут в любое время помочь экипажу в анализе неисправностей и оперативном поиске решений аварийных ситуаций.

Для оптимизации времени зарядной сессии, часто, применяется интеллектуальные системы, где поддерживается динамическое изменение тока заряда, по отслеживаемым параметрам батареи.

$$I = \frac{C}{t};$$

где, I - зарядный ток (Ампер, А);

C - емкость аккумулятора (Ампер-часы, Ач);

t - время зарядки (часы).

Подставив значения, 0,3 до 1,0 от С- получаем, что время заряда 1 контейнера, может разница от 1 до 3.3 часов при должном охлаждении ХИТ или до 10 часов в плохих температурных условиях.

При условии, что зарядное устройство сможет обеспечить 2605.8 А.

При таких высоких значениях тока параллельный заряд одного контейнера, для снижения мощности отдельной зарядной станции. Имеется в виду деление контейнера на секции ключами, и заряд каждой секции производится отдельным коннектором, что снизит токовую нагрузку с одной линии.

Заключение

Развитие судов на аккумуляторных системах открывает вектор развития экологически чистого транспорта и устойчивому развитию морского и речного судоходства. Благодаря прогрессу в области аккумуляторных технологий и внедрению модульной/блочной структуры энергетических аккумуляторных блоках, таких как на контейнеровозе Greenwater 01, демонстрируется возможность расширения области применения всей технологии в целом, за счет увеличения дальности хода и возможности блочной замены, для быстрой подзарядки с берега. При сохранении приоритета устойчивого развития индустрий по всему миру распространение систем с ХИТ готово изменить будущее морского транспорта, внедряя более чистые и эффективные практики судоходства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. China Ocean Shipping Group (Cosco). Описание проекта контейнеровоза Greenwater 01.
2. Yara International. Пресс-релиз по запуску контейнеровоза Yara Birkeland.
3. Power X. Техническая документация и пресс-релизы по проекту Power ARK 100.
4. Никифоров Б.В., Шмыга С.В. Электрохимические источники электроэнергии для автономных морских объектов / - СПб. : ИД «Петрополис», 2020.- 306 с.
5. Никифоров Б.В., Радаев А.В., Романовский В.В. Судовые аккумуляторы. СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм.С.О.Макарова 2023.-244
6. Романовский В.В., Никифоров Б.В., Макаров А.М. Современные системы электродвижения на морском транспорте. // Электрооборудование : эксплуатация и ремонт.-№12.-2018.-с.70-75

CHEMICAL CURRENT SOURCES FOR HIGH-POWER VESSELS

¹Khoroshenkii Alexander Vladimirovich, graduate student

²Romanovsky Viktor Viktorovich, Doctor of Technical Sciences, Professor

³Bejik Artyom Sergeevich, engineer

^{1,2,3}Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russia,
e-mail: khoroshenkii@yandex.ru

The global shift towards sustainable energy solutions has led to significant advancements in the field of marine transportation. This paper explores the increasing power of energy installations utilizing chemical power sources, particularly focusing on the rise of battery-powered vessels. Through a case study of the largest fully electric container ship introduced by China Ocean Shipping Group (Cosco), this research examines the utilization of powerful battery systems, the types of batteries employed, and their environmental implications. Furthermore, it discusses the importance of power modules in enhancing vessel capabilities and addresses safety measures for handling battery-related incidents.

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ АККУМУЛЯТОРОВ

¹Чижма Сергей Николаевич, д-р техн. наук, доцент,
профессор кафедры электрооборудования и автоматики судов

²Яковлев Кирилл Сергеевич, магистрант

³Кобзарев Илья Сергеевич, магистрант

⁴Девятков Александр Андреевич, бакалавр

⁵Быстров Иван Михайлович, бакалавр

¹Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ»,
Калининград, Россия, e-mail: SChizhma@kantiana.ru

^{2,3,4,5}Балтийский федеральный университет им. И. Канта,

Калининград, Россия, e-mail: ²KIakovlev@stud.kantiana.ru; ³IKobzarev@stud.kantiana.ru;

⁴ADeviatkov@stud.kantiana.ru; ⁵IBystrov@stud.kantiana.ru

Цель – создание системы контроля состояния автомобильных аккумуляторов бюджетного класса; разработана методика контроля на основе фильтра Калмана; составлена модель аккумулятора и системы контроля; проведено моделирование системы, на основе которой разработаны алгоритмы и программное обеспечение; изготовлен прототип системы контроля и проведены его испытания. Разработанная система мониторинга состояния свинцово-кислотных аккумуляторных батарей на базе Arduino показала свою работоспособность. Результаты экспериментальных данных совпали с результатами моделирования.

Неотъемлемой частью каждого автомобиля является аккумуляторная кислотная батарея (АКБ). И каждый из тех, кто водит машину, хоть раз в жизни сталкивался с проблемой разрядившегося или пришедшего в негодность аккумулятора. Для таких случаев желательно иметь системы контроля и управления аккумуляторными батареями (АКБ).

На сегодняшний день на территории нашей страны практически отсутствует производство систем контроля состояния АКБ, выполненных по отечественным технологиям и предназначенных для владельцев недорогих автомобилей со свинцово-кислотными аккумуляторами. Следовательно, разработка системы мониторинга состояния свинцово-кислотных АКБ является актуальной.

Целью данной работы является разработка системы мониторинга АКБ на базе микроконтроллера Arduino. Система будет включать в себя датчики напряжения, тока и температуры для получения точных данных о состоянии аккумулятора в реальном времени и передавать эти данные по беспроводному интерфейсу на компьютер или смартфон.

Свинцово-кислотный аккумулятор является, как говорилось ранее, одним из самых распространённых источников питания для автомобилей.

С каждым циклом заряда-разряда из-за необратимых химических процессов происходит снижение емкости и зарядной способности аккумулятора. Так, при обычном использовании примерно после тысячи циклов заряда-разряда свинцово-кислотный АКБ постепенно начнёт терять свою ёмкость, а его внутреннее сопротивление начнёт увеличиваться [1].

Внутреннее сопротивление АКБ является суммой сопротивлений каждого его элемента: пластин, сепараторов, выводов и электролита. И в связи с протекающими внутри реакциями оно со временем растёт. Для нового аккумулятора с номинальным напряжением 12 В и ёмкостью 60 А/ч нормальным будет сопротивление, равное 4...6 мОм. Через несколько лет этот показатель вырастет в 2-3 раза, что повлияет на пусковой ток батареи и его напряжение. И вместе с этим упадёт и ёмкость АКБ [2].

Также на значение ёмкости и внутреннего сопротивления свинцово-кислотного аккумулятора значительно влияет глубина разряда [3]. Данная зависимость отражена на рис. 1, где *DOD* – это глубина разряда АКБ.

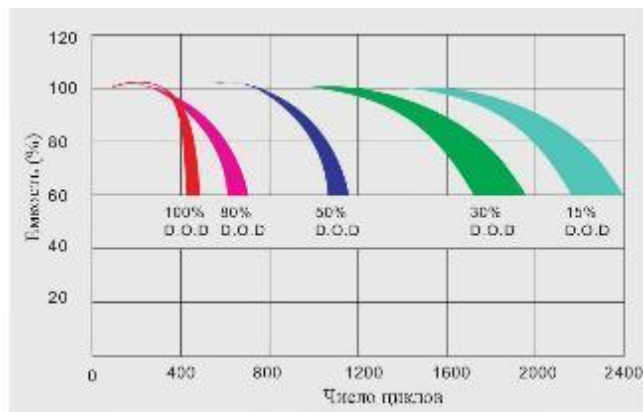


Рис. 1. Зависимость ёмкости аккумуляторной батареи от глубины разряда и количества циклов заряда-разряда

При информационном обзоре существующих систем мониторинга аккумуляторов был найден ряд систем, позволяющих контролировать аккумуляторные батареи, используемые в качестве резервных источников питания в промышленных объектах [4, 5, 6, 7].

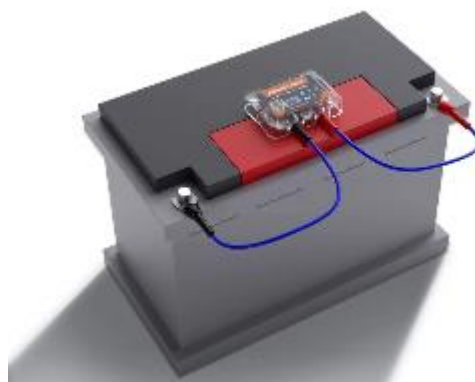
В целевом рынке автомобильных АКБ широко представлено два вида устройств контроля АКБ. Тестер АКБ Lancol Micro-468 от китайской компании Lancol [8] представляется как дешевое устройство, которое может приобрести каждый желающий (рис. 2, а). Данное устройство подключается при помощи зажимов к клеммам АКБ, тем самым получая питание. Оно выводит на дисплей после проведения тестирования батареи следующие параметры:

1. Напряжение;
2. Ток холодной прокрутки;
3. *SOC* (state of charge, уровень заряда);
4. *SOH* (state of health, степень работоспособности аккумулятора).

Система мониторинга АКБ ВМ-6 [9], также разработанная в Китае, значительно выделяется среди других, которые были рассмотрены выше. Самое важное отличие – она устанавливается непосредственно под капот автомобиля и подключается к клеммам аккумулятора (рис. 2, б).



а)



б)

Рис. 2. Внешний вид тестеров Micro-468 (а) и ВМ-6 (б)

Вместе с ВМ-6 поставляется мобильное приложение, подключение к которому реализовано при помощи Bluetooth на расстояние до 10 метров, на котором можно отслеживать все показатели, которые выдает данная система, а именно: температура, напряжение, состояние заряда *SOC*.

Данная система имеет ряд преимуществ. Во-первых, она является системой мониторинга АКБ, предназначенной в первую очередь для водителей автомобилей. Во-вторых, ВМ-6 является универсальной для всех АКБ с номинальным напряжением 12 В. В-третьих, ВМ-6 имеет удобное мобильное приложение, данные на которое передаются через Bluetooth. Также стоит отметить и встроенный GPS-трекер для отслеживания местоположения автомобиля и маршрутов передвижения.

Однако, присутствует и ряд недостатков. Во-первых, ВМ-6 не определяет значения *SOH* и тока. Следовательно, из-за падения ёмкости аккумулятора со временем метод определения *SOC* через значения напряжения будет очень неточным, так как с падением ёмкости АКБ будут меняться и значения напряжения. Во-вторых, устройство китайского производства, а не отечественного. В-третьих, у ВМ-6 нет резервного питания, что приведёт к его отключению при полном разряде АКБ.

Существует ряд методов, с помощью которых можно провести оценку состояния заряда аккумуляторной батареи [10, 11, 12]:

- по кривой напряжения;
- при помощи интегрирования по силе тока;
- при помощи фильтра Калмана.

Первый и второй методы дают малую точность, поэтому предпочтительнее использовать третий метод. Он имеет значительную вычислительную сложность, однако в современных условиях это не является препятствием. Фильтр Калмана оценивает вектор состояния какой-либо динамической системы на основе ряда зашумленных измерений. Его особенность в том, что он оперирует как с оценками состояния системы, так и с оценками плотности распределения вектора состояния.

Фильтр Калмана [13] выполняет две функции: прогнозирование и коррекцию. При выполнении прогнозирования происходит предсказание вектора состояния системы на основе оценки такого же вектора, но с предыдущей итерации, с примененным к нему вектором управления. После чего строится ковариационная матрица. Описывается это формулами (4) и (5):

$$\hat{x}_{k|k-1} = \mathbf{F}_k \hat{x}_{k-1|k-1} + \mathbf{B}_k u_k \quad (1)$$

$$\mathbf{P}_{k|k-1} = \mathbf{F}_k \mathbf{P}_{k-1|k-1} \mathbf{F}_k^T + \mathbf{Q}_k \quad (2)$$

где $\hat{x}_{k|k-1}$ – предсказание вектора системы по оценке вектора состояния с предыдущей итерации вместе с применением управления (\mathbf{B}_k); $\mathbf{P}_{k|k-1}$ – ковариационная матрица ошибок; \mathbf{F}_k – матрица эволюции процесса; \mathbf{B}_k – матрица управления; u_k – вектор управляющего воздействия, а \mathbf{Q}_k – ковариационная матрица случайных воздействий.

Применив формулы (1, 2) к АКБ, используя теорему Тевенина и правила Кирхгофа, получим выражения для прогноза напряжения и *SOC* АКБ:

$$\begin{bmatrix} SOC_{k+1} \\ U_{1,k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{-\frac{T_s}{C_1 R_1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} SOC_k \\ U_{1,k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{T_s}{Q} \\ R_1(1 - e^{-\frac{T_s}{C_1 R_1}}) \end{bmatrix} I_k, \quad (3)$$

$$U_k = U_0 - R_0 I_k - R_1 I_k e^{-\frac{T_s}{\tau_1}}; \quad (4)$$

где R – значение, равное квадрату стандартного отклонения шумов данных; Q – номинальная ёмкость аккумуляторной батареи, $U_{1,k}$ – напряжение на выводах аккумулятора в предыдущий отсчет, C_1 – текущая ёмкость АКБ, $U_{1,k+1}$ – напряжение на выводах аккумуляторной батареи, а U_0 – напряжение холостого хода, T_s – текущее время. Данная система даёт возможность проводить оценку состояния заряда аккумулятора *SOC* при помощи фильтра Калмана.

Далее был выбран метод оценки *SOH* по текущему значению внутреннего сопротивления аккумуляторной батареи [14]. Его описывает следующая формула:

$$SOH = \frac{R_{eol} - R_{real}}{R_{eol} - R_{new}} \cdot 100\% \quad (5)$$

Здесь R_{real} – внутреннее сопротивление батареи на текущий момент времени; R_{new} – внутреннее сопротивление нового аккумулятора; R_{eol} – внутреннее сопротивление пришедшего в негодность аккумулятора [15]. Данная формула позволяет оценить общее состояние аккумулятора в процентах.

Моделирование поведения АКБ было проведено в системе MATLAB Simulink. В качестве основы модели, а именно аккумуляторной батареи, был выбран блок Battery (Table-Based) из библиотеки MATLAB Simulink – Simscape. Для моделирования тепловых процессов использовался

блок теплообмена, работающий по закону Ньютона – Рихмана. Для оценки SOC был выбран метод с использованием фильтра Калмана, так как он позволяет добиться большей точности. В Simulink есть соответствующий блок – SOC Estimator (Kalman Filter). SOH оценивался по текущему значению внутреннего сопротивления аккумуляторной батареи

Объединив указанные блоки, а также добавив блоки SOC Estimator (Kalman Filter) и SOH Estimator, получим схему модели динамики заряда-разряда аккумулятора и его деградации, которая решает поставленные ранее задачи. В данной схеме были добавлены вольтметр для передачи значений на вход блока оценки SOC, а также два блока констант: начальный уровень SOC и начальное внутреннее сопротивление батареи R_0 .

Далее для визуализации всех получаемых результатов в схему были добавлены осциллографы: U (напряжение), I (ток), T (температура), SOC и SOH. Помимо этого, для создания более реальных условий и более детальной проверки работы фильтра Калмана при оценке SOC были внесены два блока Band-Limited White Noise (белый шум с ограниченной полосой частот), которые создают белый шум (уровень самого шума задаётся в параметрах блока), который суммируется с измерениями тока и напряжения. Итоговая схема изображена на рис. 3.

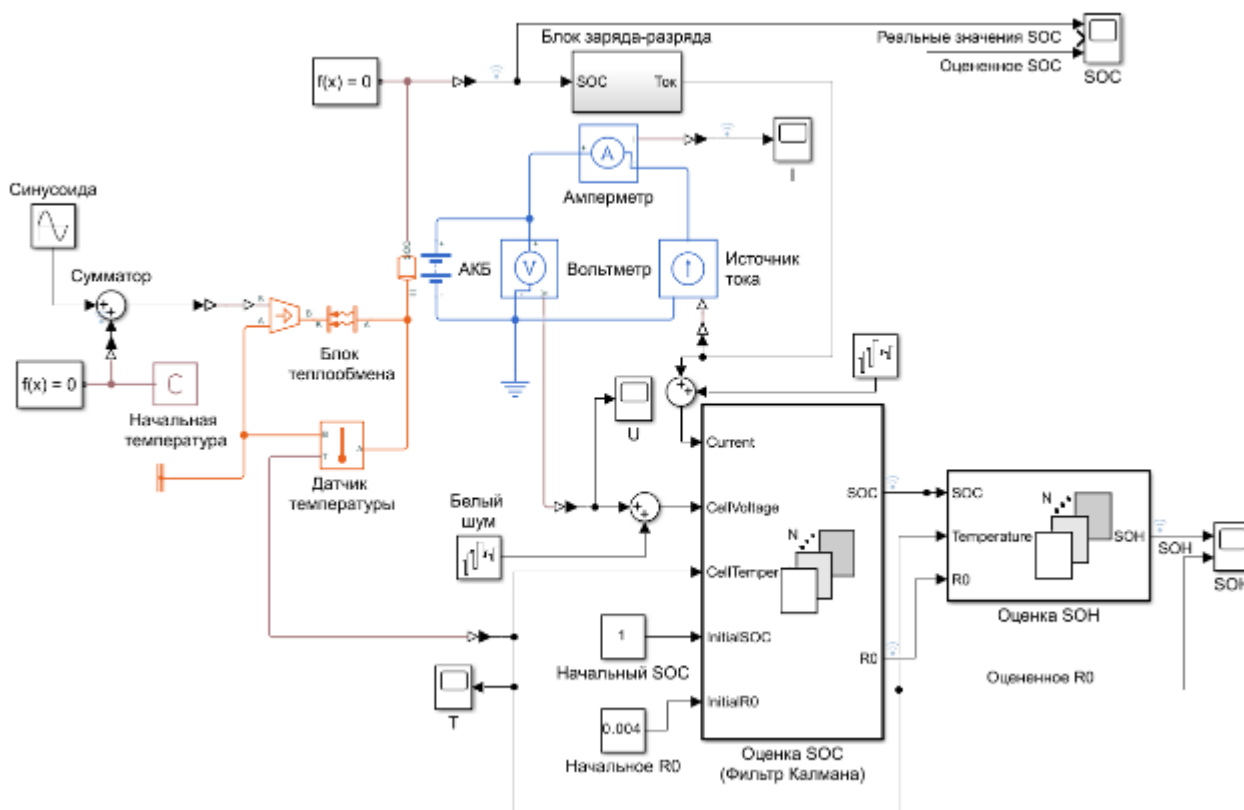


Рис. 3. Схема модели динамики заряда-разряда АКБ

Таким образом, используя построенную схему на базе MATLAB Simulink, будет возможно моделировать все основные физические процессы, протекающие в АКБ. По получаемым модельным данным при помощи специальных вычислительных блоков, являющихся в совокупности моделью аналитической подсистемы, будут выполняться оценка SOC на базе фильтра Калмана и оценка SOH.

После разработки модели заряда-разряда было проведено моделирование процессов, происходящих в АКБ. Моделирование проводилось в пять этапов с разной глубиной разряда (на 15%, 30%, 50%, 80% и 100%) для наглядной проверки влияния данного параметра на общее состояние аккумулятора. Ток заряда и разряда был принят за величину, равную $5,9 \pm 0,1$ А для тестирования работы фильтра Калмана при оценке SOC в постоянно меняющихся условиях. Графики тока одного цикла заряда-разряда, напряжения и SOC АКБ при разряде до 50% показаны на рис. 4.

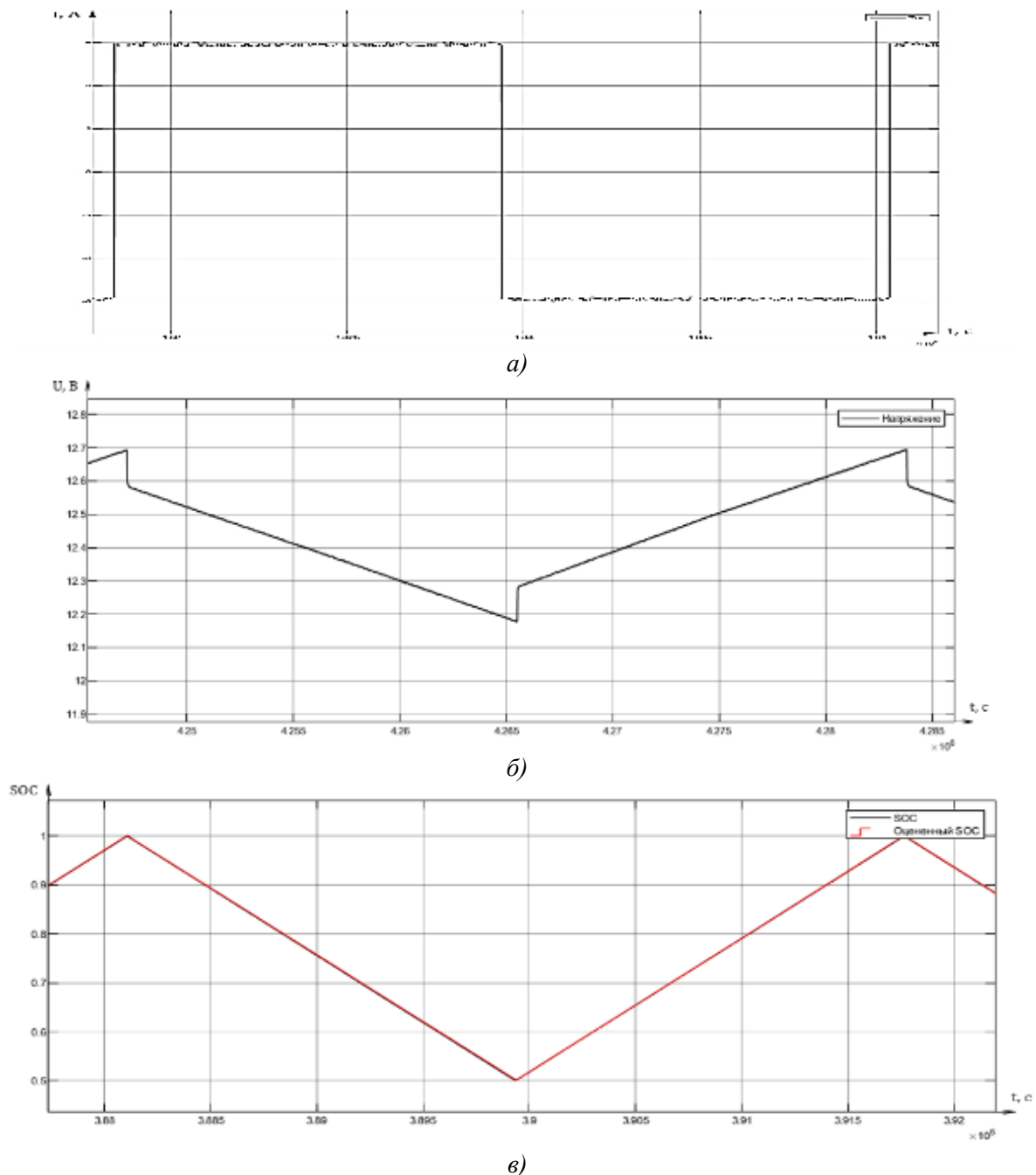


Рис. 4. Графики тока заряда-разряда (а), напряжения (б) и SOC (в) АКБ (DOD 50%)

На рис. 5 показаны графики моделирования изменения SOH и внутреннего сопротивления АКБ R_0 при многократном заряде/разряде аккумулятора до его полной деградации.

Также на графиках состояния АКБ (рис. 6) видна следующая тенденция: с ростом внутреннего сопротивления R_0 уменьшаются значения SOH . Данная тенденция также присутствует в исследовании по оценке состояния литий-ионной батареи и её внутреннего сопротивления [16].

Сравнивая графики состояния заряда аккумуляторной батареи, изображенные на рис. 6, можно заметить, что SOC, оцениваемый при помощи фильтра Калмана и выделенный красным цветом, с увеличением глубины разряда сильнее отклоняется от эталонных значений SOC, выделенных чёрным цветом. Следовательно, процент ошибок, допускаемых фильтром Калмана при оценке состояния заряда АКБ возрастает с увеличением глубины разряда.

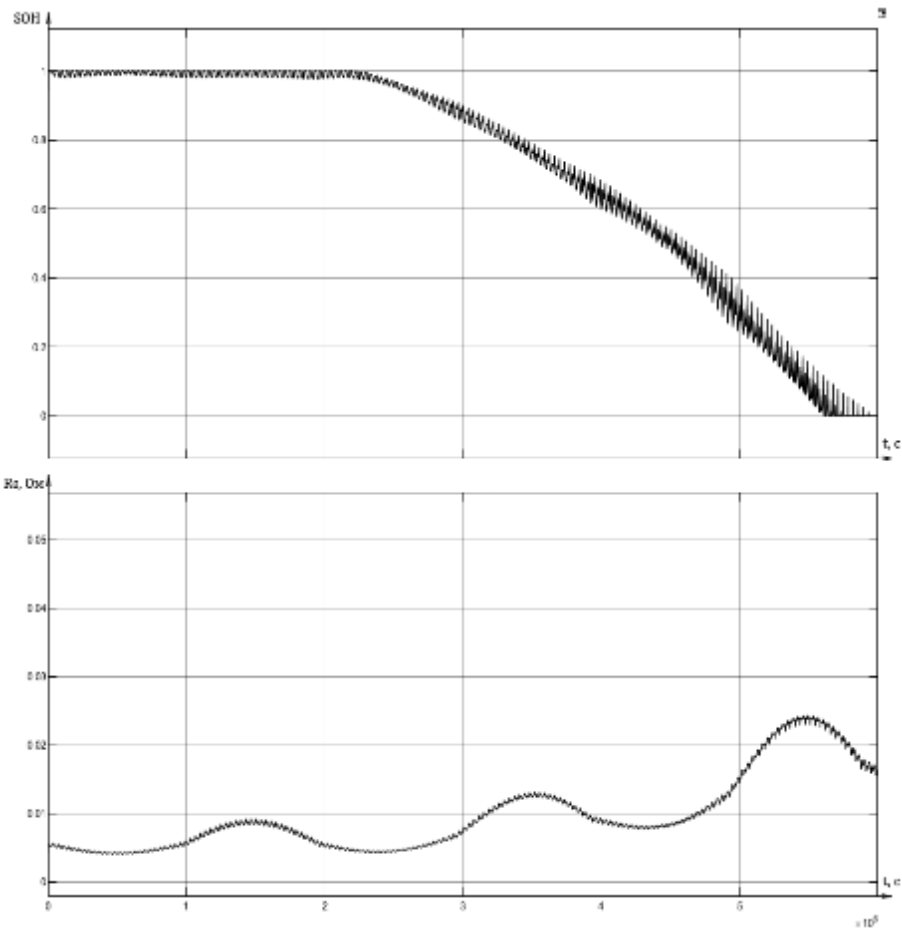


Рис. 5. Графики состояния АКБ и внутреннего сопротивления АКБ R_0 (DOD 50%)

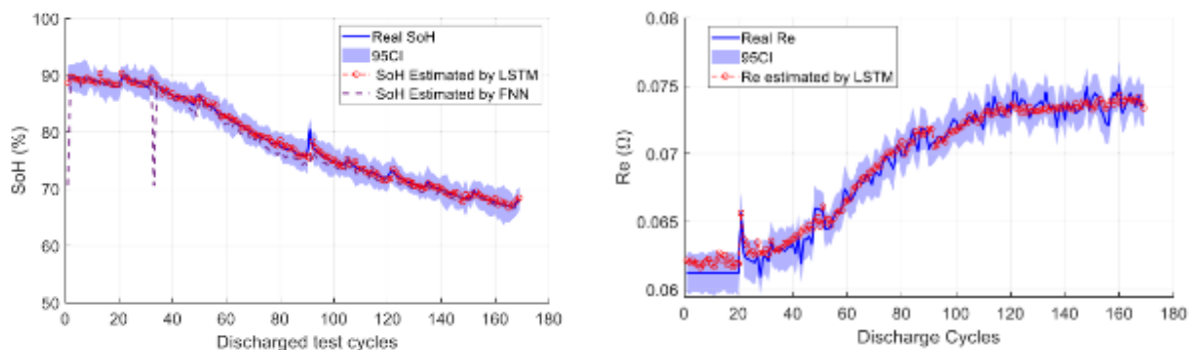


Рис. 6. Зависимость SOH и внутреннего сопротивления от количества циклов

Структурная схема опытного образца системы мониторинга состояния АКБ представлена на рис. 7. Состояние АКБ, режимы заряда и разряда оцениваются с помощью датчиков напряжения, тока и температуры, время определяется с помощью часов реального времени DS1302. Аналоговые и цифровые сигналы подаются на одноплатную ЭВМ Arduino, информация отображается с помощью дисплея LCD1602. Беспроводной модуль HC-06 предназначен для передачи информации на смартфон или ноутбук.

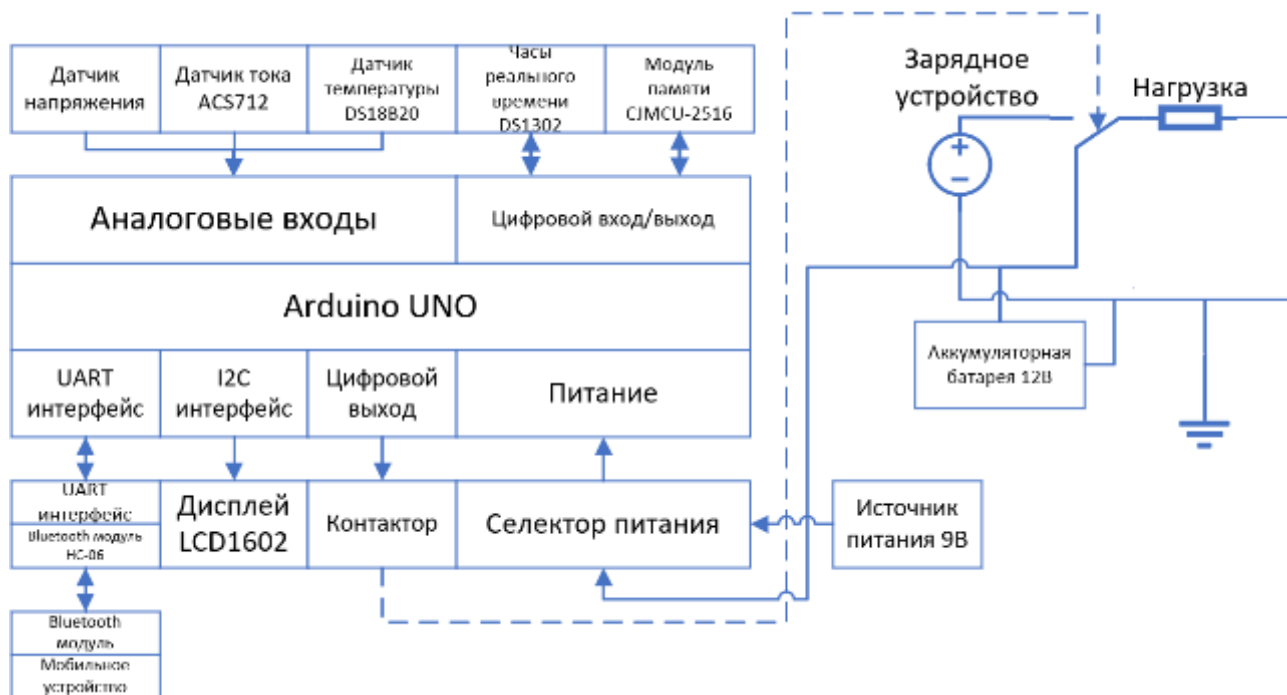


Рис. 7. Структурная схема опытного образца системы контроля состояния АКБ

Программное обеспечение (ПО) состоит из двух частей. Пользовательское записано в память Arduino. Его функции – обработка сигналов с датчиков и передача информации на смартфон. Вторая часть ПО, установленная на смартфон, позволяет отображать состояние АКБ. Блок-схема алгоритма программы представлена на рис. 8.



Рис. 8. Блок-схема алгоритма программы

Программа для системы мониторинга состояния АКБ состоит из нескольких разделов, созданных с помощью приложения WinForms, все формы имеют в себе определённый функционал, направленный для работы с приложением. Приложение имеет панель вкладок с разделами:

- главная – раздел, в который попадает пользователь при запуске приложения через exe-файл;
- данные – кнопка с выпадающим меню, которое открывает раздел «показатели» и «графики»;
- показатели – раздел, содержащий в себе данные о характеристиках АКБ (Уровень заряда, качество заряда, ток, напряжение и температура);
- помощь;
- настройки;

графики – раздел, содержащий графики изменения тока, напряжения и температуры (currentChart, voltageChart, tempChart). Чтобы подробнее рассмотреть линейные графики в приложении разработаны индивидуальные формы для графиков, отображающие актуальное состояние какого-либо значения (ток, напряжение, температура). Форма «Показатели» и «Графики» представлены на рис. 9.



а) б)
Рис. 9. Раздел «Показатели» (а) и «Графики» (б)

После разработки программного обеспечения был собран прототип устройства (рис. 10), а затем было проведено тестирование системы мониторинга состояния свинцово-кислотных аккумуляторных батарей.

Был смоделирован режим работы АКБ заряд/разряд, для этого АКБ поочередно подключалась к зарядному устройству и к нагрузке.

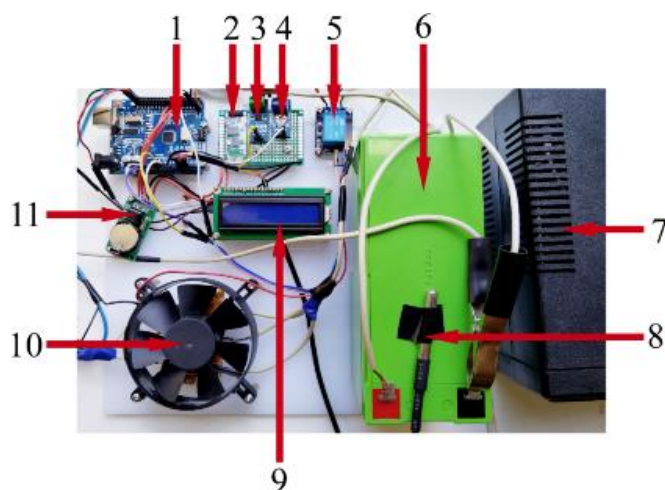


Рис. 10. Внешний вид прототипа системы контроля состояния АКБ

1. Arduino Uno;
2. Модуль Bluetooth HC-06;
3. Датчик тока ACS712;
4. Датчик напряжения Voltage sensor;
5. Реле SRD-03VDC-SL-C;

6. Аккумулятор WBR GPL1272 F2;
7. Зарядное устройство аккумулятора;
8. Датчик температуры DS18B20;
9. Дисплей LCD1602 + I2C;
10. Силовые резисторы АН 25W22J + охлаждающий вентилятор;
11. Часы реального времени (RTC) DS1302.

График изменения SOH и напряжения при многократном заряде/разряде АКБ (рис. 11), показывает, что с течением времени напряжение тестируемой аккумуляторной батареи снижается, что является следствием её деградации.

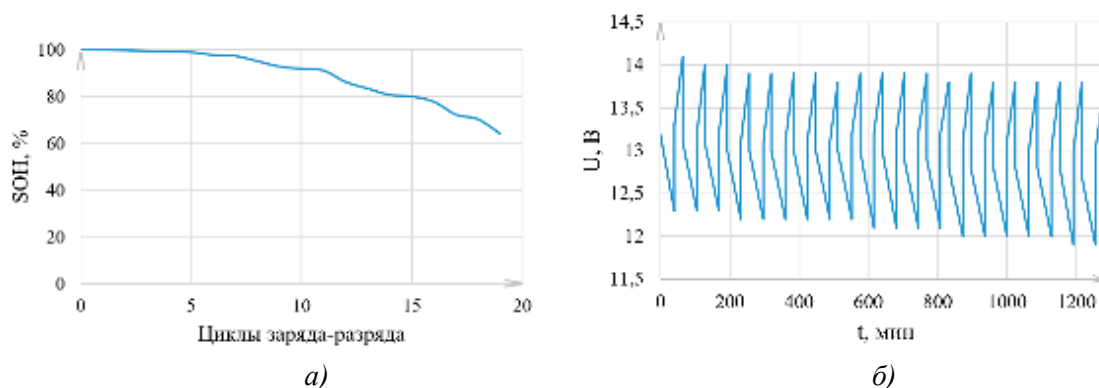


Рис. 11. График изменения SOH (а) и U (б) тестируемой АКБ при многократном заряде/разряде

В ходе тестирования система прототип системы мониторинга показал свою работоспособность, а результаты подтвердили адекватность математической модели, на основании которой был разработан алгоритм работы системы и ее программное обеспечение.

Заключение. Разработанная система мониторинга состояния свинцово-кислотных аккумуляторных батарей на базе Arduino показала свою работоспособность. Результаты экспериментальных данных совпали с результатами моделирования. Описанная система контроля АКБ является эффективным инструментом для контроля и управления состоянием аккумуляторов, что способствует продлению их срока службы и повышению надежности. В дальнейшем возможно улучшение системы за счет внедрения дополнительных функций прогнозирования состояния АКБ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Свинцовый кислотный аккумулятор. Устройство и принцип действия: сайт. – URL: https://eti.su/articles/electrotehnika/electrotehnika_312.html (дата обращения: 23.01.2024) – Текст: электронный.
2. Теория работы свинцово-кислотного аккумулятора: сайт. – URL: <https://batteryservice.ru/support/teoriya-svintsovo-kislotnogo-akkumulyatora/> (дата обращения: 23.01.2024) – Текст: электронный.
3. Внутреннее сопротивление аккумулятора – от терминологии до измерения: сайт. – URL: <https://bigteh.ru/category/vnutrennee-soprotivlenie-akkumulyatora-ot-terminologii-do-izmereniya/> (дата обращения: 23.01.2024) – Текст: электронный.
4. Контроллер АКБ-12/485: сайт. – URL: <https://ttronics.ru/products/kontrollery/monitoring-akb-i-energoparametrov/Ustroystvo-kontrolya-akkumulyatornykh-batarey-AKB-12-485/> (дата обращения: 05.02.2024) – Текст: электронный.
5. РВАТ - Система мониторинга аккумуляторов: сайт. – URL: <https://www.energometrika.ru/catalog/pbat-sistema-monitoringa-akkumulyatorov-vrta.html> (дата обращения: 08.02.2024) – Текст: электронный.
6. Car Battery Tester Analyzer MICRO-468: сайт. – URL: <https://global.lancol.com/item/micro-468-series/1536223960> (дата обращения: 10.02.2024) – Текст: электронный.
7. БМС01 - Система контроля состояния аккумуляторов: сайт. – URL: <https://www.energometrika.ru/catalog/check-sistema-kontrolya-sostoyaniya-akkumulyatorov-vrta.html> (дата обращения: 16.02.2024) – Текст: электронный.

8. Battery Monitoring System BM-6: сайт. – URL: <https://www.streetwizeaccessories.com/Catalogue/Streetwize/Power/Battery-Accessories/Bluetooth-Battery-Monitoring-System-Outer-Ctn-Qty-12-SWBMS1> (дата обращения: 22.02.2024) – Текст: электронный.
9. Battery State of Charge calculation with EPC converters: сайт. – URL: https://epicpowerconverters.com/wp-content/uploads/2020/08/AN026_State-Of-Charge-Calculation_v5.pdf (дата обращения: 14.03.2024) – Текст: электронный.
10. Различия и взаимосвязь трех состояний батареи: SOC, SOH, SOP: сайт. – URL: <https://www.mokoenergy.com/ru/differences-and-relationships-of-battery-state> (дата обращения: 25.03.2024) – Текст: электронный.
11. Компьютерное моделирование динамики состояния заряда (SOC) электрических аккумуляторов/ Чернов М. Б., Голубков А. В.// Ученые записки УлГУ. Сер. Математика и информационные технологии. 2023, Т. № 1. - с. 171–179.
12. Определение уровня заряда литий-ионного аккумулятора на основе алгоритма расширенного фильтра Калмана / У. Сяоган, Сюэфэн Ли, Н. И. Щуров, А. А. Штанг, М. В. Ярославцев, С. Дедов // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2020, Т. 13, № 4. – с. 420–437.
13. Оценка состояния заряда литий-ионной батареи на основе расширенного Фильтра Калмана/ Л. Чжи // Energy Procedia. 2017. Т. 105. - с. 3515–3520.
14. Сравнение методов оценки SOH батареи через её ёмкость и внутреннее сопротивление/ М. Нисво Рамадан, Бхишма Аджи Прамана, Сигит Агунг Видаят, Лора Хаула Амифия, Адха Кахьяди, Ояс Вахьюнггоро // Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology. 2015, Т. 6. - с. 113-122.
15. Таблица зависимости заряженности аккумулятора от температуры и плотности электролита (SOC): сайт. – URL: <https://battery-service.ru/support/soc/> (дата обращения: 10.04.2024) – Текст: электронный.
16. Оценка SOH и внутреннего сопротивления литий-ионной батареи на основе LSTM: сайт. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1452398123001931?via%3Dihub> (дата обращения: 15.04.2024) – Текст: электронный.

BATTERY CONDITION MONITORING SYSTEM

¹Chizhma Sergey Nikolaevich, doctor of engineering, docent,
professor Department of Electrical Equipment and Automation of Ships

²Iakovlev Kirill Sergeevich, master's student

³Kobzarev Ilya Segeevich, master's student

⁴Deviatkov Aleksandr Andreevich, bachelor

⁵Bystrov Ivan Mikhailovich, bachelor

¹Baltic Fishing Fleet State Academy FSBEI HE "KSTU",
Kaliningrad, Russia, e-mail: schizma@kantiana.ru

^{2,3,4,5}Immanuel Kant Baltic Federal University,

Kaliningrad, Russia, e-mail: ²Iakovlev@stud.kantiana.ru; ³IKobzarev@stud.kantiana.ru;

⁴ADeviatkov@stud.kantiana.ru; ⁵IBystrov@stud.kantiana.ru

The purpose of the work is to create a system for monitoring the condition of budget-class car batteries, a control technique based on the Kalman filter has been developed, a model of the battery and control system has been compiled, a simulation of the system has been carried out, on the basis of which algorithms and software have been developed, a prototype of the control system has been made, and its tests have been carried out. The developed system for monitoring the condition of lead-acid batteries based on Arduino has shown its efficiency. The results of the experimental data coincided with the results of the simulation.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ГРУЗОВЫХ КРАНОВ С ЧАСТОТНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ НА МОРСКИХ СУДАХ

¹Шабалин Леонид Дмитриевич, канд. техн. наук, доцент

²Савенко Александр Евгеньевич, канд. техн. наук, доцент

³Савенко Павел Станиславович, аспирант

¹ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,
Калининград, Россия, e-mail: shabalin44@mail.ru

^{2,3}ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический
университет», Республика Крым, Керчь, Россия, e-mail: savenko-70@mail.ru

Рассмотрено морское судно «Seven Vega», осуществляющее прокладку подводных трубопроводов. Одним из наиболее мощных электроприводов с частотным управлением на судне является кран грузоподъемностью 250 тонн. Отмечена сложность технического обслуживания при эксплуатации группового кранового электропривода. Приведены опытные данные об одной из аварийных ситуаций на судне, при которой стало невозможным запустить кран в работу. Проведенные исследования позволили определить и устранить причину возникшей неисправности, что позволило судну продолжить выполнение технологических операций по прокладке подводного трубопровода после длительного простоя. Результаты, приведенные в статье, могут быть использованы электромеханическими службами морских судов и службами, осуществляющими постройку судов на верфях.

Введение

Современные морские суда являются сложными электротехническими комплексами, выполняющими самые различные технологические операции в режиме полностью автономной работы [1,2]. Одним из важных направлений развития мировой экономики является строительство и использование подводных трубопроводов, расположенных на дне мирового океана и соединяющих различные страны и континенты. Для осуществления проектов, связанных с укладкой таких трубопроводов конструируются и создаются специальные морские суда трубоукладчики [3]. Основу технологического процесса по укладке подводных трубопроводов обеспечивают мощные крановые электроприводы. Для работы крановых электроприводов на судах трубоукладчиках используются частотные принципы управления, которые позволяют плавно регулировать скорость подъема и спуска трубы в процессе ее укладки с компенсацией волнения морской поверхности и обеспечения динамического позиционирования [4,5]. Очевидно, что бесперебойная работа судового электротехнического комплекса и особенно крановых электроприводов при выполнении трубоукладочных работ в мировом океане, имеет первостепенное значение с точки зрения обеспечения качества, безопасности и экономичности [6,7].

Общие сведения

Грандиозным примером трубоукладочного морского судна является судно «Seven Vega», построенное в 2020 году компаниями Subsea 7 и Royal IHC. На этом судне установлен супермощный пьедестальный грузовой кран фирмы Huisman, имеющий грузоподъемность 250 тонн [8]. Главный подъемник крана имеет грузовой барабан, который приводится во вращения шестью синхронно работающими асинхронными электродвигателями с частотным управлением, то есть каждый электродвигатель имеет индивидуальный частотный преобразователь. Конструкция как самого судна, так и крана являются уникальными и выполняют чрезвычайно ответственные технологические операции по прокладке трубопроводов по дну мирового океана в различных его географических районах. Специфика работы судна «Seven Vega» заключается в удаленности мест его работы от развитых сервисных центров. Электромеханическая служба судна постоянно сталкива-

ется с решением сложнейших технических задач, приводящих к возникновению аварийных ситуаций в работе группового кранового электропривода. Так, длительное время главный подъемник грузового крана не мог полноценно эксплуатироваться на номинальных скоростях. Длительные исследования позволили выявить и устранить причину этой неисправности. Перенастройка программного обеспечения частотных преобразователей с внесением изменений обеспечила длительную безаварийную работу главного кранового электропривода [8].

Спустя некоторое время экипаж судна «Seven Vega» столкнулся с аварийной ситуацией, когда при работе у берегов Бразилии запустить в работу основной грузовой кран стало невозможно.

Результаты исследования и обсуждение

Экипаж судна «Seven Vega» столкнулся с аварийной ситуацией, связанной с невозможностью запуска грузового крана. Поиски неисправности в течение суток дали основания предположить, что возникло короткое замыкание. Далее анализ электромеханической крановой системы показал, что короткое замыкание имеет место в одном из частотных преобразователей электропривода основного подъемника. Затем необходимо было определить в каком именно из частотных преобразователей, подключенных параллельно к одной шине, есть короткое замыкание.

После демонтажа и разборки неисправного частотного преобразователя обнаружилось, что внутрь этого устройства попал болтик, который замыкал плюс DC шины на минус. Можно с большой уверенностью сказать, что этот болтик попал туда при изготовлении этого частотного преобразователя или его установке на судно, то есть на этапе постройки судна. Болтик застрял между шиной и тефлоновой прокладкой, а за три года сделал в тефлоновой изоляции дырочку и замкнул. В итоге члены экипажа, эксплуатирующие кран, не могли даже включить выпрямители, их сразу выбивало.

Каждый частотный преобразователь имеет внутри предохранители, один на плюс, второй на минус. Исследование показало, что предохранители все остались исправные. Не выдерживали тиристоры в выпрямителях. При подаче питания и включении крана, сразу же сгорал один тиристор. Было предпринято нескольких попыток устранить неисправность путем замены вышедших из строя тиристоров. Таким образом было заменено четыре тиристора и неудачные пуски после их замены приводили к очередному выходу из строя. После потери четырех резервных тиристоров, попытки были прекращены, так как оставалось всего два запасных тиристора и стало понятно, что необходимо определить причину их входа из строя.

В течении трех суток электромеханическая служба отключала частотные преобразователи от шины и проводилось извлечение модулей, каждый из которых содержит два IGBT транзистора по 3600А и конденсаторы (рисунок 1).

На плате сверху обнаружена следующая неисправность - смыкание двух ножек (рисунок 2) фототранзисторов из-за сильного изгиба одной из них, которые управляют драйверами IGBT транзисторов. Таким образом коллектор с эмиттером расположены с зазором в 0,3 мм. Чёрная деталь - это разъем, в который вставляется два оптических кабеля.

Таким образом реализована оптическая развязка. В результате смыкания двух выводов фототранзистора могла возникать ситуация, когда был включен светодиодом транзистор нижнего плеча, а у этого верхнего при вибрации могли на миллисекунду закоротиться эти две ножки, а это коллектор с эмиттером и сразу же активизируется транзистор верхнего плеча и вот сразу возникает сквозной ток с плюса на минус через два открытых транзистора. Было такое или нет никто гарантировать не может, но ножки разогнули. С полной уверенностью можно сказать, что короткое замыкание, вызванное болтиком, приводило к невозможности запуска кранового электропривода.



Рис. 1. Модуль одной фазы частотного преобразователя в разобранном состоянии

Принцип работы состоит в следующем. Контроллер частотного преобразователя включает светодиод, луч идет по оптическому кабелю, затем попадает на фототранзистор на этой плате драйвера и драйвер включает транзистор.



Рис. 2. Плата управления

Демонтированный блок на одну фазу частотного преобразователя (рисунок 3) весит 90 кг. В каждом частотном преобразователе их по три штуки, а частотных преобразователей на шине - шесть штук. Очевидно, что затраты времени и труда на поиск и устранение возникшей неисправности очень значительны.



Рис. 3. Модуль одной фазы частотного преобразователя в сборе

После удаления болтика, вызывавшего короткое замыкание и разгиба смыкавшихся выводов фототранзистора, а также проведения промывки оплавившейся тефлоновой прокладки от сажи и копоти (рисунок 4), была произведена проверка всех транзисторов.



Рис. 4. Тефлоновая прокладка

Параметры транзисторов (рисунок 5) следующие - 3600А номинального тока, 7200А импульсного и 1700В, цена 1200 евро штука. Проверка показала, что все IGBT транзисторы оказались исправными.



Рис. 5. Внешний вид транзисторов

Установка всех частотных преобразователей на их штатные места и пробный запуск кранового электропривода подтвердил его исправность и работоспособность.

Заключение

В статье рассмотрена реальная аварийная ситуация, возникшая на суперсовременном морском трубоукладочном судне «Seven Vega», суть которой состояла в невозможности запуска в работу основного грузового крана, а значит произошла остановка выполнения технологических операций. Удаленность района работы судна не позволяла заказать прибытие сервисных инженеров и все это в совокупности приводило к большим экономическим потерям. Единственно правильным решением, позволяющим вернуть возможность судну выполнять прокладку трубопровода под водой, было провести исследования и обнаружить неисправность собственной электромеханической службой. Случайный характер неисправности, приведший к короткому замыканию в одном из частотных преобразователей кранового электропривода, является одной из наиболее сложных проблем в электротехническом комплексе судна. Поэтому, в случае получения аварийного сигнала «rectifier - trips from overcurrent», то есть обнаружения сверхтока на выпрямителях необходимо провести исследования, направленные на поиск мест коротких замыканий и устранения их причин. После этого производится проверка на исправность основных элементов частотных преобразователей, сборка и тестирование электропривода крана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хватов О.С., Тарпанов И.А., Кузнецов П.В. Судовая электроэнергетическая система с обратимой валогенераторной установкой по схеме машины двойного питания и дизель-генератором переменной частоты вращения. Вестник Астраханского государственного технического университета, 2021, № 3. С. 93–100.
2. Хватов О. С., Дарьенков А. Б. Электростанция на базе дизель-генератора переменной частоты вращения // Электротехника. – 2014. – № 3. – С. 28-32.
3. Савенко, А. Е. Обеспечение работы электротехнического комплекса современных судов специального назначения с динамическим позиционированием / А. Е. Савенко, П. С. Савенко // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23, № 6. – С. 99-108.
4. Dar'Enkov A.B., Samoyavchev I., Khvatov O.S., Sugakov V. Improving energy performance power station of ship with integrated electric propulsion. MATEC Web of Conferences, 2017, 108, 14002.
5. Sen'kov A.P., Dmitriev B.F., Kalmykov A.N., Tokarev L.N. Ship unified electric-power systems. Russian Electrical Engineering, 2017, 88(5), стр. 253–258.

6. Губанов Ю. А., Калинин И. М., Корнев А. С., Кузнецов В. И., Сеньков А. П. Направления совершенствования судовых единых электроэнергетических систем. Морские интеллектуальные технологии, 2019, №1-1(43), стр. 103–109.

7. Авдеев, Б. А. Интеллектуальные энергоэффективные системы морских судов / Б. А. Авдеев // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. – 2021. – № 4. – С. 99-113.

8. Савенко, А. Е. Особенности работы кранового группового электропривода с частотным управлением на морском судне / А. Е. Савенко, П. С. Савенко // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2024. – № 2. – С. 59-69.

ENSURING THE PERFORMANCE OF FREQUENCY-CONTROLLED LOADING CRANES ON SEA VESSELS

¹Shabalin Leonid, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor

²Savenko Aleksandr, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor

³Savenko Pavel, Postgraduate student

¹Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia, e-mail: shabalin44@mail.ru

^{2,3}Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Crimea Republic, Russia,
e-mail: savenko-70@mail.ru

The article considers the sea vessel "Seven Vega" that carries out the laying of underwater pipelines. One of the most powerful frequency-controlled electric drives on the vessel is a crane with a lifting capacity of 250 tons. The complexity of maintenance during operation of the group crane electric drive is noted. Experimental data on one of the emergency situations on the vessel, in which it became impossible to start the crane, are given. The conducted studies made it possible to determine and eliminate the cause of the malfunction, which allowed the vessel to continue performing technological operations on laying the underwater pipeline after a long downtime. The results presented in the article can be used by electromechanical services of sea vessels and services that build ships at shipyards.

СЕКЦИЯ «СТАЦИОНАРНЫЕ И ТРАНСПОРТНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ»

SECTION "STATIONARY AND TRANSPORT POWER PLANTS"

УДК 536.22

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВ В ЭНЕРГЕТИКЕ. ВЯЗКОСТЬ ЭТИЛЦИКЛОГЕКСАНА

¹Беркова Елена Анатольевна, ст. преподаватель

²Александров Игорь Станиславович, д-р техн. наук, доцент

³Герасимов Анатолий Алексеевич, д-р техн. наук, профессор

^{1,2,3}ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,
Калининград, Россия, e-mail: ²igor.aleksandrov@klgtu.ru

Представлен метод определения вязкости технически важного представителя нафтенных углеводородов (циклоалканов) – этилциклогексана. Разработка метода проводилась в рамках расширенного принципа соответственных состояний. Проведен сбор, анализ и компоновка массива надежных экспериментальных данных о переносных свойствах вещества для разработки метода. С использованием нелинейной оптимизационной процедуры определены константы фактора формы, входящего в соотношение для определения параметров приведения метода. Представлены анализ и результаты сравнения с экспериментальными данными.

Введение

Обеспечение энергетики надежными данными о теплофизических свойствах рабочих веществ и энергоносителей является весьма актуальной и непростой задачей. Номенклатура применяемых веществ очень широкая и восполнение информационного вакуума о справочных данных используемых веществ посредством только эксперимента задача трудно выполнимая. Поэтому перед разработчиками расчетно-теоретических моделей стоит задача создания надежных прогнозных методов расчета теплофизических свойств, требующих минимума исходной информации.

В данной работе в рамках широко известного принципа соответственных состояний предпринята попытка расчетным путем описать коэффициент динамической вязкости технически важного вещества – этилциклогексана. Данный представитель нафтенных углеводородов является компонентом суррогатных топлив, и входит в состав многих пластовых флюидов. Точные данные о коэффициентах переноса данного вещества необходимы при расчете процессов, протекающих в энергетическом и нефтехимическом оборудовании, а также при расчете процессов сжигания топлива.

1. Уравнение вязкости этилциклогексана

Вязкость этилциклогексана, в отличие от его термодинамических свойств, для которых нами разработано фундаментальное уравнение состояния (ФУС) [1,2] и таблицы стандартных справочных данных [3], исследована достаточно плохо. В литературе имеются данные немногочисленных авторов [4-10] ограниченные узким диапазоном температур (см. табл. 4). Поэтому разработать индивидуальную корреляцию на указанном массиве данных не представляется возможным.

Следует заметить, что главные трудности в предсказании вязкости плотных флюидов заключаются в зависимости этого свойства от ряда факторов. Это, прежде всего, структура вещества и характер взаимодействий между молекулами. Кроме этого, численные значения вязкости вещества могут изменяться в очень широком диапазоне. Получить соотношения, позволяющие производить

расчеты вязкости в широком диапазоне параметров с высокой для практического применения точностью, только на основе уравнений статистической механики не представляется возможным. Даже применение принципа соответственных состояний весьма затруднительно ввиду того, что значения вязкости полярных и неполярных веществ значительно отличаются друг от друга, как и значения вязкости многоатомных и простых веществ. Перспективным, по мнению авторов доклада, является расширенный принцип соответственных состояний. Однако при его применении вводятся ряд допущений. Межмолекулярное взаимодействие происходит посредством парного аддитивного потенциала. Поступательное движение молекул описывается методами молекулярной динамики, в основу которых положена классическая механика. Учет внутренних степеней свободы молекул отсутствует. В принцип соответственных состояний заложен постулат об универсальной зависимости безразмерных свойств от приведенных переменных (параметров состояния). Однако надежные расчеты можно провести только для термодинамически подобных веществ. Расширение диапазона применимости указанного принципа возможно введением дополнительных критериев подобия. С учетом этих критериев появляется возможность описывать коэффициенты переноса широкого класса веществ, используя свойства хорошо изученного эталонного вещества.

В связи с вышеперечисленным нами для расчета вязкости этилциклогексана предлагается использовать подход Эли и Хэнли [11]. При этом вязкость рассматриваемого вещества $\eta_x(\rho, T)$ соотносится с вязкостью эталонного вещества в соответственном состоянии $\eta_0(\rho_0, T_0)$:

$$\eta(\rho, T) = \eta^*(T) + \eta_x(\rho, T) = \eta^*(T) + \eta_0(\rho_0, T_0) \cdot F_\eta \quad (1)$$

Здесь и далее индекс x относится к рассматриваемому веществу, нижний индекс 0 – к эталонному веществу, индекс c – к критическим свойствам вещества.

В уравнении (1) вязкость разреженного газа определяется следующим образом:

$$\eta^*(T) = \frac{5\sqrt{\pi M k_B T}}{16\pi\sigma^2 S_\eta^*(T^*)} \quad (2)$$

где $\pi = p/p_c$ – приведенное давление; M – молекулярная масса, кг/кмоль; $k_B = 1,3805 \cdot 10^{-16}$ – постоянная Больцмана, эрг/К; T – температура, К; σ – линейный масштабный параметр потенциала Леннарда-Джонса, нм; $S_\eta^*(T^*)$ – приведенный эффективный интеграл столкновений.

Уравнение (2) представляет собой результат линеаризации уравнения Больцмана для разреженного газа, состоящего из молекул сферической формы и отсутствием внутренних степеней свободы. Эффективный интеграл столкновений для простых модельных потенциалов («твердых сфер», «трехпараметрический потенциал Кихары» и т.д.) может быть рассчитан аналитически достаточно просто. Однако отклонение потенциала от модельного приводит к отклонению температурной зависимости вязкости, и в практических расчётах пользуются приведенным интегралом столкновений. Естественно, что точных практических результатов получить сложно, используя соотношения для модельных потенциалов межмолекулярного взаимодействия. Поэтому для повышения точности теоретических расчетов необходимо учитывать внутренние степени свободы молекул многоатомных газов и использовать реальные потенциалы взаимодействия, параметры которых часто оптимизируются на основе термодинамических данных на линии насыщения. При этом следует учитывать ряд эффектов, связанных с ориентацией молекул, а также с обменом энергией между колебательными, вращательными и поступательными степенями свободы. Расчеты из первых принципов «ab initio» требуют высоких вычислительных мощностей и суперкомпьютеров. Поэтому для приближения точности расчетов к экспериментальным данным вводится эмпирическая составляющая. Что сделано и в данной работе, где предлагается эмпирическая формула, где интеграл столкновений является функцией приведенной температуры.

Для определения интеграла столкновений применительно к наиболее распространенному потенциалу Леннарда-Джонса предлагается использовать формулу Нойфельда [12]:

$$S_\eta^*(T^*) = 1,16145(T^*)^{-0,14874} + 0,52487 \exp(-0,773207 \cdot T^*) + 2,16178 \exp(-2,43787 \cdot T^*) \quad (3)$$

Коэффициент F_η в уравнении (1) определяется по выражению:

$$F_\eta = (M_x/M_0)^{1/2} \cdot f_x^{1/2} \cdot h_x^{-2/3} \quad (4)$$

Параметры ρ_0 , T_0 в уравнении (1) определяются через соотношения:

$$T_0 = T/f_x \quad \text{и} \quad \rho_0 = \rho h_x \quad (5)$$

где f_x и h_x являются функциями критических параметров и фактора ацентричности.

f_x и h_x определяются формулами, полученными из двухпараметрического принципа соответственных состояний:

$$f_x = T_{c,x}/T_{c,0} \quad \text{и} \quad h_x = \rho_{c,0}/\rho_{c,x} \quad (6)$$

$$f_x = (T_{c,x}/T_{c,0}) \cdot \theta_x(\delta_x, \tau_x, \omega_x) \quad (7)$$

$$h_x = (\rho_{c,0}/\rho_{c,x}) \cdot \varphi_x(\delta_x, \tau_x, \omega_x) \quad (8)$$

где θ_x , φ_x – это факторы формы, являющиеся функциями приведенной температуры $\tau = T/T_c$ и приведенной плотности $\delta = \rho/\rho_c$ и фактора ацентричности ω .

Эти факторы могут быть определены точно для чистых веществ посредством решения конформных уравнений

$$A_x^{conf}(V, T) = f_x A_0^{conf}(V/h_x, T/f_x) - RT \ln(h_x) \quad (9)$$

$$Z_x(V, T) = Z_0(V/h_x, T/f_x) \quad (10)$$

где A – безразмерная энергия Гельмгольца; $Z = P/(\rho RT)$ – фактор сжимаемости.

Индекс *conf* в уравнении (9) означает конфигурационный вклад.

Для улучшения описания свойств переноса предлагается также использовать дополнительный фактор формы:

$$\psi_x = \rho_{c,0}/(\rho_{c,x} \cdot h_x) \quad (11)$$

Этот фактор определяется по имеющимся экспериментальным данным и может быть представлен в виде ряда по степеням приведенной плотности:

$$\psi_x = \sum_{k=0}^1 c_k (\rho/\rho_c)^k \quad (12)$$

где $c_0 = 1,0321$; $c_1 = 0$.

В нашем случае параметры θ_x , φ_x в уравнениях (7) и (8) принимаются равными единице.

В качестве эталонного вещества для расчета вязкости этилциклогексана по уравнению (1) применяется пропан. Для пропана имеется индивидуальная корреляция вязкости, разработанная Вогелем, Кухенмайстером и др. [13]. Это уравнение применимо в диапазоне температур от тройной точки до 600 К при давлениях до 100 МПа. Погрешность описания вязкости пропана по данным авторов составляет 0,4% в области разреженного газа от комнатных температур до 600 К, 2,5% – в диапазоне от 100 до 475 К до давлений 30 МПа и около 4% за указанными пределами.

Корреляция для эталонного вещества (пропана) базируется на теоретически обоснованном уравнении, в котором коэффициент динамической вязкости чистого вещества $\eta(\rho, T)$ представляется в виде суммы вязкости разреженного газа и остаточной вязкости:

$$\eta(\rho, T) = \eta^0(T) [1 + B_\eta(T) \cdot \rho] + \Delta\eta(\rho, T) \quad (13)$$

где $\eta^0(T)$ – вязкость разреженного газа при нулевой плотности; $B_\eta(T)$ – второй вязкостный вириальный коэффициент; $\Delta\eta(\rho, T)$ – остаточная вязкость плотного флюида.

Вязкость газа при нулевой плотности $\eta^0(T)$ в мкПа·с определяется по уравнению:

$$\eta^0(T) = \frac{0,021357 \cdot (MT)^{1/2}}{\sigma^2 \cdot S_\eta^*(T^*)} \quad (14)$$

Приведенный эффективный интеграл столкновений $S_\eta^*(T^*)$ обычно аппроксимируется следующим уравнением:

$$\ln S_\eta^*(T^*) = \sum_{i=0}^4 a_i (\ln T^*)^i \quad (15)$$

Здесь $T^* = k_B T / \varepsilon$ – характеристическая температура; ε/k_B – энергетический масштабный параметр, К.

Коэффициенты a_i и масштабные параметры уравнений (14) и (15) для пропана по [13] приведены в таблице 1.

Таблица 1

Коэффициенты и масштабные параметры уравнений (14) и (15) для пропана

a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	$\sigma, \text{нм}$	$\varepsilon/k_B, \text{К}$
0,25104574	-0,47271238	0	0,060836515	0	0,49748	263,88

Второй вязкостный вириальный коэффициент $B_\eta(T)$ в л·моль⁻¹ рассчитывается по теоретически обоснованной корреляции, полученной для леннардджонсовского флюида [14]:

$$B_\eta(T) = N_A \sigma^3 B_\eta^*(T^*) \quad (16)$$

где $N_A = 6,0221415 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹ – число Авогадро.

Второй вязкостный вириальный коэффициент $B_\eta(T)$ учитывает влияние давления на вязкость умеренно плотных газов. Данный параметр отсылает нас к работам Боголюбова, связанным с вириальным разложением кинетических коэффициентов. В дальнейшем этот подход получил развитие на основе теории молекулярной ассоциации, где при повышенных давлениях мы рассматриваем газ состоящим из идеальной смеси мономеров, димеров и т.д. В рамках этой теории было установлено, что взаимодействие мономер-димер можно описать потенциалом Леннарда-Джонса. В свою очередь, вклад от взаимодействий трех мономеров описывался с учетом точных результатов для твердых сфер. То есть, параметр $B_\eta(T)$ можно рассчитать теоретически без привлечения экспериментальной информации, что было сделано в [15].

Для расчета температурной зависимости $B_\eta^*(T^*)$ в диапазоне характеристической температуры $0,5 \leq T^* \leq 100$ авторами [15] предлагается следующая корреляция:

$$B_\eta^*(T^*) = \sum_{j=0}^8 b_j (T^*)^{t_j} \quad (17)$$

Коэффициенты b_j и показатели степени t_j уравнения (17) представлены в таблице [15].

Слагаемое $\Delta\eta(\rho, T)$ для вязкости плотного вещества, представляет собой полином от двух переменных – приведенной плотности δ и приведенной температуры τ , а также слагаемое, учитывающее функцию свободного объема. В [13] получена оптимальная форма уравнения для остаточной вязкости

$$\Delta\eta_h(\delta, \tau) = \sum_{i=2}^5 \sum_{j=0}^2 e_{ij} \frac{\delta^i}{\tau^j} + f_1 \left[\frac{\delta}{\delta_0(\tau) - \delta} - \frac{\delta}{\delta_0(\tau)} \right] \quad (18)$$

В уравнении (18) функция $\delta_0(\tau)$ описывается выражением:

$$\delta_0(\tau) = g_1(1 + g_2\tau^{\frac{1}{2}}) \quad (19)$$

Значения коэффициентов e_{ij}, f_1, g_1 и g_2 уравнений (18) и (19) по [13] приведены в таблице 2.

Таблица 2

Значения коэффициентов уравнений (18) и (19) для пропана

e_{20}	35,9873030195	e_{22}	87,7124888223	e_{51}	21,0726986598
e_{30}	-105,773052525	e_{31}	205,319740877	e_{52}	-14,3971968187
e_{40}	58,9491587759	e_{32}	-129,21093261	f_1	1616,88405374
e_{50}	-9,59407868475	e_{41}	-129,740033100	g_1	2,50053938863
e_{21}	-180,512188564	e_{42}	76,6280419971	g_2	0,860516059264

2. Анализ результатов

При анализе экспериментальных данных большое внимание уделяется методу измерения вязкости. Среди наиболее распространенных методов встречаются методы падающего тела, вращения цилиндров, капиллярный, катящегося шарика, колебания диска. Большинство этих методов имеют ряд сложностей, связанных с высокой погрешностью измерения, конструктивной сложностью исполнения и, в отдельных случаях, недостаточной теоретической базой. Капиллярный метод является наиболее разработанным в методическом и теоретическом плане. При этом, для точного определения вязкости данным методом необходимо соблюдение ряда условий. Это точное измерение радиуса и длины капилляра и перепада давления по длине. Нужно создавать через капилляр постоянный расход и точно его измерять. А также нужно поддерживать точно постоянными параметры измеряемого вещества. Естественно, что экспериментальные данные, полученные данным методом имеют достоверный характер и принимаются за основу при разработке уравнений.

Результаты сравнения имеющихся экспериментальных данных о динамической вязкости этилциклогексана с рассчитанными по описанной выше модели представлены в таблице 3 и на рисунке 1. Ситуация с экспериментальными исследованиями вязкости этилциклогексана достаточно сложная. На лицо серьезный дефицит данных в широком диапазоне. Немногочисленные измерения выполнены в жидкой фазе при атмосферном давлении в диапазоне температур 273 – 373 К. Как правило, применялся капиллярный метод с выполнением измерений на стандартных вискозиметрах. Погрешность определения вязкости, как правило, составляет 1,0 – 1,5 %.

Среди отечественных авторов имеются только данные [10]. Данные о вязкости были получены оригинальным вискозиметром конструкции Голубева. И это единственные данные на линии насыщения. Точность описания этих данных предлагаемым методом соответствует точности экспериментального определения и составляет 1%. Все остальные измерения выполнены зарубежными авторами при атмосферном давлении. За основу при определении констант фактора формы принимались данные Голубева [10], а также данные [6 - 8].

Результаты сравнения экспериментальных данных о вязкости этилциклогексана с рассчитанными по уравнению (1) значениями

Год	Первый автор, источник	Число точек	Диапазон параметров		Среднее относительное отклонение
			T, K	p, MPa	$COO, \%$
1913	Уббелоде [4]	5	293-373	0,101	3,018
1938	Эванс [5]	7	278-373	0,101	3,128
2013	Ли [6]	6	298-318	0,101	0,518
2014	Джианг [7]	6	293-318	0,101	1,124
2015	Занг [8]	9	293-343	0,101	1,325
2018	Прак [9]	5	293-333	0,101	2,687
1959	Голубев [10]	5	273-313	насыщ.	1,049

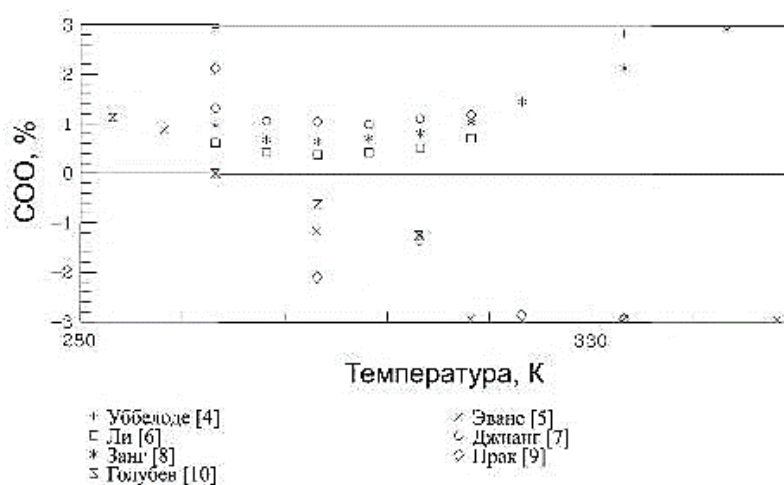


Рис. 1. Характер отклонения расчетных значений вязкости этилциклогексана от экспериментальных данных

Заключение

В докладе представлен подход к определению вязкости этилциклогексана на основе расширенного двухпараметрического принципа соответственных состояний. Данный подход успешно применим для плохо экспериментально исследованных веществ таких, как этилциклогексан. На основе ограниченного массива экспериментальных данных были определены коэффициенты фактора формы, входящего в соотношения для расчета приведенных переменных. В качестве эталонного вещества для реализации принципа соответственных состояний принят хорошо экспериментально изученный углеводородный газ - н-пропан. Коэффициенты уравнения вязкости н-пропана приняты из литературных данных и представлены в докладе.

В результате, предлагается метод для определения вязкости технически важного вещества – этилциклогексана. Диапазон применимости метода соответствует диапазону существования вещества от тройной точки до начала термической деструкции и при давлениях до 100 МПа. Погрешность расчета составляет 0,5-3,1 %. Однако, следует учитывать, что метод не обеспечивает высокой точности расчета вблизи линии насыщения при высоких температурах, вблизи тройной точки, и при давлениях, превышающих 100 МПа. В указанных областях погрешности расчета могут достигать 5% и более. Для расчета вязкости в критической области необходимо применение специальных кроссоверных функций, что также ограничивает данный метод для применения в критической области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров И.С., Герасимов А.А., Плавич А.Ю. Термодинамические свойства компонентов органических энергоносителей. Этилциклогексан // Балтийский морской форум: материалы IX Международного Балтийского морского форума 4-9 октября 2021 года [Электронный ресурс]: в 6 томах. Т. 2. «Морская техника и технологии. Безопасность морской индустрии», IX Международная научная конференция. – Электрон. дан. – Калининград: Изд-во БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ», 2021. – С. 238-245.
2. Беркова Е.А., Александров И.С., Плавич А.Ю. Термодинамические свойства компонентов органических энергоносителей: анализ экспериментальных данных для разработки уравнений состояния. Циклоалканы // Балтийский морской форум: материалы X Международного Балтийского морского форума 26 сентября – 1 октября 2022 года [Электронный ресурс]: в 7 томах. Т. 2. «Морская техника и технологии. Безопасность морской индустрии», X Национальная научная конференция с международным участием. – Электрон. дан. – Калининград: Изд-во БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ», 2022. – С. 173-178.
3. ГСССД 432-2023. Этилциклогексан. Термодинамические свойства (плотность, теплоемкость, энтальпия, энтропия, скорость звука) в диапазоне температуры от тройной точки до 700 К при давлениях до 100 МПа.
4. Ubbelohde U., Agthe S. Das Erdol, 1913, Vol. I, Pg. 285, Engler, C., Hofer, H., Eds., Verlag von S. Hirzel: Leipzig.
5. Evans E.B. The viscosity of hydrocarbons // Journal of the Institution of Petroleum Technologists. Parts IV-VI. – 1938. – Vol. 24. – P. 321.
6. Li G., Chi H., Fang W., Hu S. Excess Molar Volume along with Viscosity and Refractive Index for Binary Systems of Tricyclodecane with Five Cycloalkanes // Journal of Chemical & Engineering Data. – 2013. – Vol. 58. – P. 3078-3086.
7. Jiang X. Density, Viscosity, Refractive Index, and Freezing Point for Binary Mix-tures of 1,1-Bicyclohexyl with Alkylcyclohexane / Jiang X.; He G.; Wu X.; Guo Y.; Fang W.; Xu L. // Journal of Chemical & Engineering Data. – 2014. – Vol. 59. – P. 2499-2504.
8. Zhang C. Densities, Viscosities, Refractive Indices, and Surface Tensions of Bina-ry Mix-tures of 2,2,4-Trimethylpentane with Several Alkylated Cyclohexanes from (293.15 to 343.15) K / Zhang C.; Li G.; Yue L.; Guo Y.; Fang W. // Journal of Chemical & Engineering Data. – 2015. – Vol. 60. – P. 2541-2548.
9. Prak D. J. L.; Mungan A. L.; Cowart J. S.; Trulove P. C. Densities, Viscosities, Speeds of Sound, Bulk Moduli, Surface Tensions, and Flash Points of Binary Mixtures of Ethylcyclohexane or Methylcyclohexane with n-Dodecane or n-Hexadecane at 0.1 MPa // Journal of Chemical & Engineering Data. – 2018. – Vol. 63. – P. 1642-1656.
10. Golubev I. F. Viscosity of Gases and Gas Mixtures. – Moscow: Fizmat Press, 1959. – p. 207.
11. Ely J. F.; Hanley H. J. M. Prediction of transport properties 1. Viscosity of fluids and mixtures // Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals. – 1981. – Vol. 20. – P. 323-332.
12. Neufeld P. D.; Janzen A. R.; Aziz R. A. Empirical Equations to Calculate 16 of the Transport Collision Integrals for the Lennard-Jones (12-6) Potentia // The Journal of Chemical Physics. – 1972. – Vol. 57. – P. 1100.
13. Vogel E., Kuchenmeister C., Bich E., Laesecke A. Reference Correlation of the Viscosity of Propane // Journal of Physical and Chemical Reference Data. – 1998. – Vol. 27(5). – P. 947-970.
14. Reinwater J.C., Friend D.G. Second viscosity and thermal conductivity virial coefficients of gases: extension to low reduced temperature // Physical Review Journals. – 1987. – Vol. A36. – P. 4062–4066.
15. Голубев И.Ф., Агаев Н.А Вязкость предельных углеводородов. – Баку: Азернешр, 1964. – 161 с.

THERMAL PHYSICAL PROPERTIES OF SUBSTANCES IN ENERGY. VISCOSITY OF ETHYLCYCLOHEXANE

¹Berkova Elena Anatolyevna, Senior Lecturer

²Alexandrov Igor Stanislavovich, D.Sc., associate professor

³Gerasimov Anatoly Alekseevich, D.Sc., professor

^{1,2,3}Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,

e-mail: ²igor.aleksandrov@klgtu.ru

The report presents a method for determining the viscosity of a technically important representative of naphthenic hydrocarbons (cycloalkanes) – ethylcyclohexane. The method was developed within the framework of the extended corresponding states principle. Collection, analysis and arrangement of an array of reliable experimental data on the transport properties of the substance for the development of the method were carried out. Using a nonlinear optimization procedure, the constants of the form factor included in the relationships for determining the parameters of the reduction of the method were determined. The analysis and results of comparison with experimental data are presented.

ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТА ПЛАСТИНЧАТО-ТРУБЧАТЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ

¹Кошелев Сергей Валерьевич, канд. техн. наук,
доцент кафедры судовых энергетических установок

²Ейдеюс Альгирдас Йозапович, канд. техн. наук, доцент,
консультант-наставник кафедры судовых энергетических установок

^{1,2}Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ»,
Калининград, Россия, e-mail: kaf_xktk@bgarf.ru

Степень совершенства теплообменных аппаратов во многом зависит от их тепловой эффективности, которую можно находить путём термодинамического анализа или определения энергетического коэффициента $E_э = Q/N$, где Q – количество переданной теплоты, N – мощность, затраченная на перемещение рабочих сред. Чтобы снизить трудоёмкость расчёта и повысить чувствительность методики, применительно к аппаратам рассматриваемого типа предлагается сосредоточить внимание на эффективности наружной поверхности, где термическое сопротивление наибольшее. В этом случае для определения температуры наружной поверхности целесообразно использовать наружный коэффициент охлаждения или нагрева, который зависит от коэффициента теплоотдачи. Потребляемая мощность зависит от падения давления (ПД) воздуха (газа). Путём обобщения собранных опытных данных получены уравнения регрессии для расчёта этих показателей. Расчёты энергетического коэффициента $E_{э.н.}$ выполнены на примере шести теплообменников с разными конструктивными параметрами. Проанализировано влияние поочерёдного изменения одного из параметров на коэффициент $E_{э.н.}$.

Введение

Трубчато-пластинчатые теплообменники (ТО) находят широкое применение в холодильной технике, теплоэнергетике, химической промышленности и других отраслях техники. Наибольшее распространение для охлаждения или нагрева воздуха и других газов получили ТО с плоскими сплошными ребрами на круглых трубах. Они отличаются простотой изготовления, удобством очистки от загрязнений и сравнительно небольшим падением давления обрабатываемого воздуха или иного газа [1]. Чтобы приблизительно уравнивать удельные тепловые потоки на наружной и внутренней стороне труб ТО применяется высокая степень их оребрения. Коэффициент оребрения β , определяемый отношением площадей наружной F_n и внутренней F_v поверхности $\beta = F_n / F_v$, может достигать до 25 [2]. Зависит он от всех конструктивных параметров ТО, но в наибольшей степени влияют шаг S_p ребер, а также поперечный S_T и продольный S_l шаг труб. Чем меньше шаг S_p , тем больше коэффициент β и аэродинамическое сопротивление ТО, с ростом которого повышается мощность N_v , потребляемая вентилятором.

Существуют два основных подхода к количественной оценке тепловой эффективности теплообменных аппаратов (ТОА). Первый из них предполагает термодинамический анализ протекающих процессов и направлен на минимизацию приращения энтропии [3,4]. Теоретически он более обоснован, но практически оказывается более сложным. Второй подход предполагает получение наибольшего количества переданной теплоты Q при наименьших затратах энергии N на перемещение рабочих сред [5,6,7]. Считается целесообразным рассмотрение работы ТОА в составе нагревающей или охлаждающей установки [4,5]. Предлагается также находить эффективность ТОА по приведенным годовым затратам на работу соответствующей установки [5,8]. Зачастую, при этом вклад ТО в годовых затратах оказывается несущественным, что снижает точность оценки эффективности ТОА.

Известно, что в ТО рассматриваемого типа основное термическое сопротивление оказывается на стороне воздуха (газа). При высокой степени оребрения мощность N на перемещение газа, оказывается выше, чем на прокачку тепло-хладоносителя внутри труб. С учетом этого, для повышения чувствительности методики определения тепловой эффективности ТО предлагается ограничиться рассмотрением процессов, протекающих лишь на наружной поверхности ТО. При подготовке методики используются

уравнения регрессии для определения показателей интенсивности теплоотдачи и аэродинамического сопротивления, полученные и частично опубликованные нами при обобщении доступных экспериментальных данных, относящихся к ТО с шахматным расположением труб.

Показатели эффективности теплообменников

Тепловую эффективность ТОА принято оценивать по величине энергетического коэффициента [5,7], который равен отношению количества переданной теплоты Q к мощности N_{Σ} , затраченной на перемещение тепло- и хладоносителя: $E_{\Sigma} = Q/N_{\Sigma}$. При сравнении ТОА температурный напор должен быть одинаковым, так как тепловая нагрузка Q пропорциональна разности между температурами обменивающихся сред, а мощность N_{Σ} от нее зависит слабо. Даже при сравнении ТО рассматриваемого типа определение коэффициента E_{Σ} становится многовариантной задачей, так как внутри труб может перемещаться вода, жидкий тепло- или хладоноситель, водяной пар или какой-либо хладагент, каждый из которых имеет свои показатели интенсивности теплоотдачи и изменения давления по ходу движения. Не всегда есть возможность определить эти показатели.

Чтобы исключить влияние температурного напора на тепловую нагрузку, выражение для E_{Σ} приводится к виду [9]:

$$E_{\Sigma} = \alpha/N_0, \text{ Вт/К}, \quad (1)$$

где α - коэффициент теплоотдачи (КТО), Вт/(м² · К); $N_0 = N/F_H$, то есть потребляемая мощность, приведенная к 1м² площади теплопередачи, Вт/м².

Использование размерной величины для сопоставления и/или оптимизации ТОА создает некоторые неудобства. Несмотря на это, зарубежные исследователи эффективность ТО часто оценивают по величине отношения [4,10] $E = Q/\Delta P$, Вт/Па. В статье [11] энергетический коэффициент E_{Σ} определяется как:

$$E_{\Sigma} = c_p \cdot Q/(\Delta i_m \cdot F_H), \quad (2)$$

где c_p - удельная теплоемкость воздуха (газа), Дж/(кг · К); Δi_m - средняя логарифмическая разность энтальпий воздуха, Дж/кг.

При работе воздушных ТО в составе парокомпрессионной системы используется отношение, именуемое «cooling coefficient of performance» (COP), совпадающее с выражением холодильного коэффициента [4,10]:

$$COP = Q/(N_{кр} + N_{кд} + N_{исп}), \quad (3)$$

где $N_{кр}$, $N_{кд}$, $N_{исп}$ - мощность, потребляемая компрессором, конденсатором и испарителем.

Чтобы упростить сопоставление пластинчато-трубчатых ТО, предлагается находить эффективность наружной теплоотдачи по выражению:

$$E_{\Sigma.н.} = Q_H/N_B \quad (4)$$

где Q_H - тепловая производительность (нагрузка) наружной поверхности, Вт; N_B - мощность, потребляемая вентилятором для перемещения соответствующего количества воздуха (газа), Вт.

Количество переданной теплоты в зависимости от направления теплового потока находится по формулам:

$$Q_H = \alpha_B \cdot F_H \cdot \theta = G_B c_B (t_2 - t_1) - \text{при нагреве}; \quad (5)$$

$$Q_H = \alpha_B \cdot F_H \cdot \theta = G_B c_B (t_1 - t_2) - \text{при сухом охлаждении}, \quad (6)$$

где α_B - коэффициент теплоотдачи на стороне воздуха; F_H - площадь наружной поверхности ТО; θ - средняя логарифмическая разность температур (СЛРТ); G_B - массовый расход газа; c_B - удельная теплоемкость газа; t_1 и t_2 - температура воздуха на входе и выходе ТО.

В обоих случаях СЛРТ определяется по известной формуле [5]:

$$\theta = (\Delta_6 - \Delta_M)/(\ln(\Delta_6/\Delta_M)), \quad (7)$$

где Δ_6 – большая, а Δ_m – меньшая разность температур между воздухом и средней температурой наружной поверхности t_n .

При отсутствии воздухопроводов и специальных устройств для изменения объемного расхода воздуха V_B основным потребителем энергии является вентилятор. Его мощность [12]:

$$N_B = V_B \cdot \Delta P / \eta_B, \quad (8)$$

где ΔP – падение давления в ТО, Па; η_B – КПД вентилятора при прямой передаче.

Как известно, КПД вентилятора зависит от его типоразмера, частоты вращения рабочего колеса и производительности. По справочным данным [12] КПД центробежных вентиляторов в рабочей зоне находится в пределах 0,55 – 0,77. В дальнейшем принято среднее значение $\eta_B = 0,6$. В случае рассмотрения конкретного ТО следует уточнить значение η_B по характеристике установленного вентилятора.

При выбранной разности температур $t_2 - t_1$ или $t_1 - t_2$ значения Q_n и θ находятся по формулам (5,6) и (7), если известны значения расхода воздуха, коэффициента теплоотдачи α_B и площади наружной поверхности F_n . Для определения средней температуры охлаждающей поверхности t_n в работах А.А. Гоголина [6,13] предлагается использовать наружный коэффициент охлаждения:

$$\eta_{нх} = \frac{t_1 - t_2}{t_1 - t_n} = 1 - \exp\left(\frac{\alpha_B \cdot F_n}{G_B \cdot c_B}\right) \quad (9)$$

Отсюда по упомянутым выше данным находим:

$$t_n = t_1 - (t_1 - t_2) / \eta_{нх}. \quad (10)$$

В случае подогрева воздуха СЛРТ записывается в виде:

$$\theta_n = (t_2 - t_1) / \ln((t_n - t_1) / (t_n - t_2)) \quad (11)$$

С учетом этого путем несложных преобразований получаем наружный коэффициент подогрева:

$$\eta_{нп} = (t_2 - t_1) / (t_n - t_1) = 1 + \exp(-\alpha_B F_n / (G_B \cdot c_B)). \quad (12)$$

Отсюда средняя температура греющей поверхности ребристого ТО:

$$t_{нп} = t_1 + (t_2 - t_1) / \eta_{нп}. \quad (13)$$

Из предыдущего следует, что для определения энергетического коэффициента $E_{э.н.}$ также требуются методики расчета интенсивности теплоотдачи и гидравлического сопротивления на стороне воздуха. Тем не менее отказ от рассмотрения процессов внутри труб позволяет уделить больше внимания весьма сложным и недостаточно исследованным закономерностям, происходящим на наружной поверхности ТО. Снижается также трудоемкость сопоставления однотипных ТО с разными конструктивными и режимными параметрами. Основные результаты расчета показателей интенсивности теплоотдачи ТО с плоскими ребрами приводятся в статье [1]. Материалы по определению аэродинамического сопротивления подготовлены для публикации.

Обобщение данных об интенсивности теплоотдачи и аэродинамическом сопротивлении ТО

Основными показателями интенсивности теплоотдачи ТО на стороне воздуха или газа являются фактор Колборна j , число Нуссельта Nu и коэффициент теплоотдачи α . Между ними существует аналитическая взаимосвязь. Аналогично аэродинамическое сопротивление ТО выражают через коэффициент трения ξ , фактор Фаннинга f или падение давления (ПД) ΔP . Ввиду отсутствия теоретических моделей достоверные данные о любом из упомянутых показателей получают опытным путем. Лишь часть опытных данных попадает в открытую печать. На протяжении ряда лет нами

проводился сбор и анализ опытных данных применительно к ТО с шахматным и коридорным расположением труб. Результаты анализа показателей теплоотдачи представлены в статье [1]. Ввиду наибольшего распространения ТО с шахматным пучком труб в данной работе обобщаются опытные данные по ТО лишь этого типа. Небольшое число опытных данных по теплоотдаче и ПД в ТО с коридорным пучком труб не позволило получить хорошего совпадения расчетных и опытных данных в широком диапазоне изменения конструктивных и режимных параметров.

Для обобщения опытных данных как по теплоотдаче, так и аэродинамическому сопротивлению проводился регрессионный анализ исходной информации. Он позволил получить уравнения регрессии в виде степенных функций с разным числом независимых переменных. Предпочтение отдавалось безразмерным переменным в виде отношения размерных величин. За основу при обобщении опытных данных по теплоотдаче принято число Nu , хотя в ряде обрабатываемых источников представлены фактор j или КТО α . Приведем соотношения между ними:

$$Nu_d = \alpha \cdot d_T / \lambda_B = j \cdot (Re_d \cdot Pr)^{1/3}; \alpha = j \cdot w_{ж} \cdot \rho \cdot c_p / Pr^{(2/3)} \quad (14)$$

где: Nu_d - число Нуссельта, характерным размером в котором является наружный диаметр труб d_T ; λ_B - коэффициент теплопроводности воздуха; Pr - число Прандтля для воздуха (газа). ρ - плотность воздуха, c_p - удельная теплоемкость воздуха; $w_{ж}$ - скорость потока в живом (суженом) сечении ТО. Размерность всех величин в системе СИ.

В качестве основного показателя аэродинамического сопротивления ТО выбрано падение давления воздуха ΔP , хотя в большинстве из 17 источников результаты опытов представлены в виде фактора Фаннинга f , а в остальных – приводятся значения коэффициента трения ξ или ПД. При обработке опытных данных рекомендуется формула [14]:

$$f = \frac{F_{ж} \cdot \rho_c}{F_H \cdot \rho_1} \left[\frac{2 \rho_1 \cdot \Delta P}{(w_{ж} \cdot \rho_c)^2} + (1 + \sigma^2) \cdot \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} - 1 \right) \right], \quad (15)$$

где $F_{ж}$ - площадь живого (стесненного) сечения ТО; F_H - площадь теплопередающей (наружной) поверхности ТО; ρ_1, ρ_2 - плотность воздуха (газа) на входе и выходе ТО; ρ_c - средняя плотность воздуха; $w_{ж}$ - скорость потока в живом сечении; $\sigma = F_{ж} / F_L$ - степень сжатия потока.

ПД в ТО на основе формулы (15) определяется как:

$$\Delta P = (\rho_1 \cdot w_{ж}^2 / [2 \cdot (1 + \sigma^2) \cdot (\rho_1 / \rho_2 - 1) + f \cdot F_H \cdot \rho_1 / (F_{ж} \rho_1 / (F_H \cdot \rho_c))]). \quad (16)$$

В инженерных расчетах параметры воздуха на выходе из ТО еще не известны, поэтому часто применяется формула [15]:

$$\Delta P = [(w_{ж} \cdot \rho_1)^2 / (2 \cdot \rho_1)] \cdot (f \cdot (F_H / F_{ж})). \quad (17)$$

Проверка на конкретных примерах показала, что по приближенной формуле результат завышается на величину не более 1,5%.

Регрессионный анализ проводился с использованием статистической функции ЛИНЕЙН, входящей в состав MS Excel. Основное время при ее использовании затрачивается на поиск наиболее подходящего числа и состава варьируемых переменных. Опробованы уравнения с числом независимых переменных от четырех до восьми. Удачными считаются уравнения регрессии, которые обеспечивают высокий коэффициент детерминации r^2 (R^2) и малую погрешность результата se_y . Дополнительно определялись другие показатели степени совпадения расчетных и опытных данных. При использовании степенной функции и наличии четырех независимых переменных x_i уравнение регрессии записывается в виде:

$$y = 10^{n_0} \cdot x_1^{n_1} \cdot x_2^{n_2} \cdot x_3^{n_3} \cdot x_4^{n_4}, \quad (18)$$

где $n_0 - n_4$ - коэффициенты (показатели) степени.

Функция ЛИНЕЙН предполагает ввод в установленном порядке известных (опытных) значений, а затем – всех варьируемых переменных из каждой строки обрабатываемого массива. Почти сразу после этого выводятся значения показателей степени $n_1, n_2 \dots$, а также некоторые результаты статистического оценивания. Опытные данные для обобщения значений как числа Нуссельта, так и падения давления найдены в опубликованных в разное время работах 17 авторов. Основные сведения об исследованных ТО приводятся в таблице 1. По итогам поиска для обобщения чисел Nu нами получены два уравнения (19b1) и (7a1) с неодинаковыми сочетаниями независимых переменных, по которым для массива из 254 точек средние показатели точности различаются незначительно. Тем не менее, при некоторых сочетаниях конструктивных параметров ТО появляются заметные расхождения. Чтобы сгладить их, при анализе тепловой эффективности ТО используется среднее значение чисел Nu , полученных по обоим уравнениям.

Таблица 1

Конструктивные параметры исследованных ТО

Автор	источник	d_t , мм	B , мм	H , мм	S_t , мм	S_l , мм	δ_p , мм	S_p , мм	L , мм	Nr	N_t
Kang	16	10,55	300	250	25	21,65	0,2	2 - 3,2	64,95	3	30
W96	17	10,23	700	550	25,4	22	0,13-0,2	1,77-3,21	44-132	2-6	-
W97	18	10,23	700	550	25,4	22	0,13	2,23 -3	88	4	87
W98	19	7,5 - 10,2	700	550	20,04-20,1	12,7-16,7	0,26-0,35	1,22-1,71	25,4-33,4	2	52-54
Kim	20	7,59	600	420	25,4-38,1	12,7	0,115	1,104	25,4-38,1	2-3	40-60
Yan	21	10,3	500	381	25,4	19,05	0,13	1,4	18,05-76,2	1-4	15-60
Taylor	22	9,525	457,2	457,2	25,4	19,558	0,127	1,21-2,12	39,12-78,23	2-4	36-72
Rich	22	13,34	-	127	31,75	27,51	0,152	1,97-8,7	-	4	-
Rich	22	12,23	-	31,8-190,5	31,75	27,51	-	1751	-	1-6	-
Gray	22	9,9-19,8	-	-	20,3-50,8	17,5-46	0,13-0,2	1,1-8,48	-	1-4	-
Quiston	13	12,7	850	636	31,8	27,5	0,152	1,75	110	4	80
Barbosa	23	7,9	340	118	23	22	0,127	11,3-22	88-220	4-10	21-51
Xie	24	18,6	300	420	42	34	0,2	3	68-238	2-7	20-70
Liu	25	16,68	600	457,2	38,1	33	0,12	3,13-3,17	66-264	2-8	24-96
W13	26	18,6	700	630	42	34	0,3	3,1	408	12	180
Frass	27	38	1000	800	85	75	1	6,67	600	8	75
W15	28	7,5	500	315	21	18,2	0,11	1,6 - 2	18,2 - 72,8	1-4	15 - 60

Применительно к расчету ПД для массива из 272 точек получены три уравнения (DM7,EL6,GM7), средние значения показателей точности которых различаются слабо, несмотря на несовпадение числа независимых переменных. Опять же при некоторых сочетаниях конструктивных параметров обнаруживаются заметные расхождения ПД. Поэтому при определении энергетического коэффициента E_3 расчетные значения по трем уравнениям осредняются.

В целях компактности основные данные о подобранных уравнениях регрессии для расчета как Nu , так и ПД представлены в одинаковой форме. Таблица 2 с перечнем независимых переменных содержит столбец с опытными значениями Nu_3 и ΔP_3 , которые используются программой, но уже не входят в расчетные уравнения (18). Обозначения новых параметров: L – длина ТО по ходу движения воздуха; $d_h = 4 \cdot L \cdot F_{ж}/F_n$ – гидравлический диаметр ТО; S_t, S_l – поперечный и продольный шаг труб; S_p – шаг ребер; h_y – условная высота ребра; F_n, F_t – площади теплопередающей поверхности и гладких труб; Nr – число рядов труб по ходу воздуха; d_3 – эквивалентный диаметр щелевых каналов ТО; $F_l, F_{ж}$ – площади лобового и живого сечений ТО.

Перечень независимых переменных в уравнениях регрессии

19b1	Nu_{α}	Re_d	L/d_h	S_t/S_l	S_f/d_h	h_y/d_T	F_H/F_T	Nr
7a1	Nu_{α}	Re_d	S_t/S_l	L/d_{α}	F_H/F_T	Nr	S_f/d_h	$F_L/F_{ж}$
DM7	ΔP_{α}	Re_d	S_f/d_{α}	S_l/d_T	S_t/d_T	F_H/F_T	Nr	$F_L/F_{ж}$
EL6	ΔP_{α}	Re_d	$Nr \cdot S_f/d_T$	S_l/S_t	F_H/F_T	$F_L/F_{ж}$	L/d_T	
GM7	ΔP_{α}	Re_d	S_f/d_h	S_l/S_t	F_H/F_T	Nr	$F_L/F_{ж}$	L/d_T

Таблица 3

Коэффициенты (показатели степени) уравнений регрессии

Уравнение	a0	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7
19b1	3,516725	4,171755	-4,06009	4,033974	-2,25492	-3,65182	0,495871	-1,55076
7a1	-3,53211	0,601028	-3,2679	-2,54807	3,117476	0,418085	0,50258	1,214357
DM7	-7,25407	1,393864	-0,97867	1,283824	4,321126	0,279848	0,862532	3,961243
EL6	-5,9289	1,393242	2,290195	-0,33103	3,121224	2,872803	-1,45419	
GM7	-6,85383	1,392918	-0,36412	-3,64727	0,505361	-3,88993	3,328354	4,747233

Таблица 4

Показатели степени совпадения результатов расчёта с опытными данными

Уравнение	Nu_c	СКО	$Nu_c/Nu_{\alpha,c}$	\bar{Nu}_i	размах	r^2	se_y	$Nu_{\alpha,c}$
19b1	30,135	22,13	0,9560	1,0313	1,134	0,802952	0,112418	31,48784
7a1	30,149	21,34	0,9575	1,0308	1,107	0,80426	0,112044	31,48784
Уравнение	ΔP_c	СКО	$\Delta P_c/\Delta P_{\alpha,c}$	$\bar{\Delta P}_i$	размах	r^2	se_y	$\Delta P_{\alpha,c}$
DM7	84,030	170,23	0,9616	1,0710	2,046	0,929993	0,168739	87,38926
EL6	85,292	180,69	0,9760	1,0741	1,926	0,927498	0,171395	-
GM7	84,695	173,92	0,9692	1,0711	2,024	0,929545	0,169278	-

В таблице 3 коэффициенты обозначены одинаковыми буквами «а» для уравнений регрессии как теплоотдачи, так и ПД. Они могут иметь разные обозначения, важно лишь учитывать порядковый номер в уравнении (18) с конкретным числом независимых переменных.

Таблица 4 разделена на две части. Верхняя из них относится к расчету чисел Nu , а нижняя – к расчету ПД. Обе они содержат результаты расчета средних значений Nu_c и ΔP_c по выбранным уравнениям регрессии для массивов с числом точек 254 и 272, соответственно. Показатели статистического оценивания r^2 (R^2) и se_y индивидуальны для каждого уравнения и массива исходных данных. По приведенным в использованных источниках опытным данным получены также средние значения $Nu_{\alpha,c}$ и $\Delta P_{\alpha,c}$. Как видим, приведенные в третьем столбце таблицы отношения $Nu_c/Nu_{\alpha,c}$ превышают 0,9559, а отношения $\Delta P_c/\Delta P_{\alpha,c}$ – выше 0,9615. По всем расчетным величинам определялись средние квадратичные отклонения (СКО). Для компактности в табл. 3 приведены СКО лишь для основных расчетных величин: Nu и ΔP . По каждой точке своего массива определялись относительные значения $\bar{Nu}_i = Nu_i/Nu_{\alpha,i}$ и $\bar{\Delta P}_i = \Delta P_i/\Delta P_{\alpha,i}$. В табл. 3 они осреднены. Как видим средние значения $\bar{Nu}_i > 1,03$, а $\bar{\Delta P}_i > 1,07$, хотя отношения абсолютных их значений меньше 1,0. По данным \bar{Nu}_i и $\bar{\Delta P}_i$ построены графики их изменения в зависимости от номера точки в массиве исходных данных. Они наглядно показывают разброс сравниваемых значений. Разность между наибольшим и наименьшим их значением показывает размах этих величин. Нетрудно заметить, что он больше для $\bar{\Delta P}_i$, чем для \bar{Nu}_i . По упомянутым графикам легко выявляются наиболее выпадающие точки. Заметим, что СКО для $\bar{Nu}_i = 0,2614 \div 0,2777$, а для $\bar{\Delta P}_i = 0,3832 \div 0,3947$, то есть средние показатели различаются не так существенно.

Приведенные в таблицах 2, 3, 4 сведения могут быть использованы на практике для расчета КТО и ПД пластинчато-трубчатых ТО. Они получены путем обобщения опытных данных, собранных в доступных источниках. В каждом из них содержатся результаты испытаний небольшого числа ТО со своими конструктивными параметрами, изменяющимися в узких пределах. Приведем лишь краткие значения размерных величин в мм для массива ТО: $d_T = 7,5 - 38$; $s_t = 20 - 85$; $S_l =$

12,7 – 75; $S_p = 1,1 – 6,67$. Число рядов труб по ходу воздуха $Nr = 1 – 12$; значения чисел $Re_d = 226 – 12290$. Понятно, что при использовании уравнений регрессии параметры конкретного ТО не должны выходить за заданные здесь пределы. Число членов уравнения (18) вытекает из таблицы 2.

Перед началом расчетов КТО и ПД по полученным уравнениям необходимо найти численные показатели переменных, которые входят в выбранное уравнение. Если диаметр труб d_t , поперечный S_t и продольный S_l шаг труб, шаг ребер S_p и число рядов Nr нетрудно измерить, то для определения площадей $F_n, F_t, F_l, F_{ж}$ следует использовать формулы, приведенные в технической литературе [2,5,8]. Отнесенные к наружному диаметру труб числа Re_d зависят от скорости воздуха в живом сечении $w_{ж}$ аппарата. Она по данным некоторых источников в процессе испытаний доходила до 30 м/с. Для воздухоохладителей рекомендуется скорость $w_{ж} = 3 – 5$ м/с [5]. При обработке результатов испытания таких аппаратов используют массовую скорость воздуха $w_{ж} \cdot \rho$, которая доходит до 10 кг/(м² · с) [2]. Можно задавать скорость воздуха в лобовом сечении w_l , откуда $w_{ж} = w_l \cdot F_l / F_{ж}$. Для сравнения ТО с разной степенью оребрения целесообразно задавать скорость $w_l = 0,5 – 6$ м/с.

Расчёт энергетического коэффициента выбранных ТО

На основе составленной в MS Excel программы подготовлены ее модификации для определения энергетического коэффициента $E_{э.н.}$ и ряда других показателей, используемых для сопоставления ТО. Расчеты выполнены на примере шести ТО, конструктивные и режимные параметры, а также опытные данные о теплоотдаче и аэродинамическом сопротивлении которых приводятся в источниках [28,21,14,25,24,27]. Выбранным аппаратам присвоены номера ТО1, ТО2, ТО3, ТО4, ТО5, ТО6. Основные конструктивные их параметры, частично взятые из указанных источников, а недостающие – найденные расчетным путем, приводятся в таблице 1.

Коэффициенты $E_{э.н.}$ определялись для случаев подогрева и сухого охлаждения воздуха. В целях единообразия и удобства сопоставления для всех ТО задавались одинаковые температуры $t_1 = 21^\circ\text{C}$, $t_2 = 25^\circ\text{C}$ при нагреве и $t_1 = 25^\circ\text{C}$, $t_2 = 21^\circ\text{C}$ при охлаждении воздуха. Выполнены две группы расчетов, различающиеся способом задания объемного расхода воздуха V_B : а) с использованием чисел Re_d , приведенных в источниках с опытными данными; б) с использованием одинаковой скорости в лобовом сечении w_l каждого ТО, изменяющейся от 0,5 до 3,5 м/с. При отладке программы расчета сравнивались значения коэффициента $E_{э.н.}$, найденные при поочередном использовании двух уравнений (19б1 и 7а1) для чисел Nu и трех уравнений (DM7,EL6,GM7) для ПД. Наименьший разброс сравниваемых значений $E_{э.н.}$ при разных исходных данных оказался при использовании среднего по двум уравнениям значения числа Nu и среднего по трем уравнениям значения ПД.

По результатам расчетов строились графики изменения $E_{э.н.}$ от Re_d и от w_l . Данные о влиянии Re_d на $E_{э.н.}$ получаются неудобными для сравнения. Дело в том, что для каждого ТО задан свой диапазон изменения чисел Re_d , а их коэффициенты $E_{э.н.}$ существенно различаются. Задание общего диапазона Re_d для всех ТО некорректно, так как каждый из них имеет свой диаметр труб d_t . Отметим, что для всех ТО с ростом чисел Re_d коэффициенты понижаются с убывающей скоростью. Задание лобовой скорости w_l с последующим определением $w_{ж}$ и Re_d для сопоставления ТО более оправдано. Оно встречается в ряде источников [19,22,26]. Более четкие данные о значениях $E_{э.н.}$ при $w_l = 1 – 3,5$ м/с для шести ТО приводятся в табл. 5. Из нее следует, что значения $E_{э.н.}$ для ТО2 и ТО6 при одинаковых скоростях различаются в 32,1 раза. Шрифтом выделены результаты расчета при $w_l = 2,5$ м/с, которые используются при дальнейшем анализе.

Таблица 5

Значения коэффициента $E_{э.н.}$ при w_l от 1 до 3,5 м/с

w_l	ТО1	ТО2	ТО3	ТО4	ТО5	ТО6
1	247,78	436,10	103,03	131,9	107,42	13,578
1,5	140,89	247,97	58,59	75,0	61,08	7,721
2	94,38	166,12	39,25	50,2	40,92	5,173
2,5	69,17	121,76	28,77	36,8	29,99	3,791
3	53,66	94,46	22,32	28,6	23,27	2,941
3,5	43,30	76,21	18,01	23,1	18,77	2,373

Практический интерес представляет влияние конструктивных параметров на тепловую эффективность ТО. С этой целью для выбранных ТО определялись значения коэффициента $E_{э.н.}$ и ряда других показателей при поочередном уменьшении на 20% значений d_T , S_t , S_l , S_p и увеличении числа рядов труб на 1,0 при скорости $w_d = 2,5$ м/с. Из-за многочисленности независимых и искомым переменных в таблице 6 приводятся лишь наиболее важные параметры. Исходные значения конструктивных параметров и коэффициента $E_{э.н.}$ указаны в табл. 4 и 5. Уменьшенные на 20% значения параметров в табл. 6 выделены шрифтом, а в других строках сохранены исходные их значения. К искомым переменным отнесены скорость $w_{ж.}$, а также полученные по уравнениям регрессии осредненные значения - α_c , ΔP_c , $E_{э.н.с.}$ и зависящие от них значения $t_{нп.}$, Q_n .

Таблица 6

Влияние поочередного изменения конструктивных параметров на показатели работы выбранных ТО при $w_d = 2,5$ м/с

№	d_T	S_t	S_l	S_f	Nr	$w_{ж.}$	α_c	ΔP_c	$E_{э.н.с.}$	$t_{нп.}$	Q_n
ТО1	0,006	0,021	0,0182	0,002	4	3,704	50,73	61,76	47,184	19,235	1912,3
	0,0075	0,0168	0,0182	0,002	4	4,779	87,28	32,51	89,635	20,331	1529,84
	0,0075	0,021	0,01456	0,002	4	4,115	66,66	29,41	99,086	19,245	1912,3
	0,0075	0,021	0,0182	0,0016	4	4,176	70,32	50,21	58,037	20,345	1912,3
ТО2	0,00824	0,0254	0,01905	0,002	2	3,958	62,76	32,25	90,368	17,353	2312,97
	0,0103	0,02032	0,01905	0,002	2	5,422	111,66	21,47	135,699	19,299	1850,38
	0,0103	0,0254	0,01524	0,0014	2	4,636	97,10	22,32	130,579	19,192	2312,97
	0,0103	0,0254	0,01905	0,0016	2	4,577	89,60	28,92	100,776	19,355	2312,97
ТО3	0,01016	0,0318	0,0275	0,00175	4	4,023	57,65	136,96	21,276	20,521	6563,73
	0,0127	0,0254	0,0275	0,00175	4	5,476	94,09	89,27	32,642	20,857	3932,05
	0,0127	0,0318	0,022	0,00175	4	4,558	75,64	69,48	41,938	20,482	6563,73
	0,0127	0,0318	0,0275	0,0014	4	4,669	81,55	127,04	22,937	20,902	6563,73
ТО4	0,013344	0,0381	0,033	0,00313	4	4,001	48,87	98,73	29,514	19,449	3330,68
	0,01668	0,03048	0,033	0,00313	4	5,742	84,97	80,68	36,116	20,398	2664,54
	0,01668	0,0381	0,0264	0,00313	4	4,624	67,44	54,18	53,781	19,483	3330,68
	0,01668	0,0381	0,033	0,002504	4	4,671	68,62	92,51	31,499	20,434	3330,68
ТО5	0,01488	0,042	0,034	0,003	4	4,148	50,22	121,06	24,070	19,666	1529,84
	0,0186	0,0336	0,034	0,003	4	6,000	87,08	100,54	28,985	20,484	1223,87
	0,0186	0,042	0,031	0,003	4	4,808	67,41	82,93	35,139	19,947	1529,84
	0,0186	0,042	0,034	0,0024	4	4,895	71,68	118,05	24,683	20,548	1529,84
ТО6	0,0304	0,085	0,075	0,00667	8	4,578	32,91	945,04	3,083	20,218	10320,3
	0,038	0,068	0,075	0,00667	8	6,666	55,65	812,80	3,585	20,737	8256,27
	0,038	0,085	0,064	0,00667	8	5,319	44,34	586,93	4,965	20,309	10320,3
	0,038	0,085	0,075	0,005336	8	5,564	47,19	1049,61	2,776	20,794	10320,3

Результаты расчета при увеличении числа рядов труб Nr на 1,0 не включены в таблицу 6 из-за экономии места. Они показывают, что для всех ТО при этом заметно повышается ΔP_c и понижается $E_{э.н.с.}$ Остальные показатели изменяются незначительно. Понятно, что сказывается относительное изменение Nr . Если для ТО2 с исходным $Nr = 2$ коэффициент $E_{э.н.}$ понижается от 121,8 до 86,4, то есть в 1,41 раза, то для ТО6 с исходным $Nr = 8$ он понижается от 3,791 до 3,431, то есть в 1,105 раза.

Сравнение выделенных в таблицах 5 и 6 данных показывает, что коэффициент $E_{э.н.с.}$ для всех ТО понижается при поочередном уменьшении диаметра труб d_T и шага ребер S_p . Он повышается при уменьшении продольного шага труб S_l . Влияние поперечного шага труб S_t противоположное: при его уменьшении на 20% коэффициент $E_{э.н.с.}$ повысился для ТО1, ТО2, ТО3, а для ТО4, ТО5, ТО6 он понизился. По-видимому, это обусловлено тем, что в первых трех ТО изменяемая величина приближается к оптимальному значению $S_{t,о}$, а в последующих трех ТО она удаляется от оптимального для каждого ТО значения.

Поиск оптимального значения каждой из четырех величин проводился по той же программе путем последовательного изменения выбранной величины. Оптимальной считается величина, при которой фиксируется наибольшее значение коэффициента $E_{э.н.с.}$. Оказалось, что только диаметр d_T и поперечный шаг труб S_t могут иметь оптимальное значение. Коэффициент $E_{э.н.с.}$ непрерывно повышается в случае уменьшения шага труб S_l . То же происходит при увеличении шага ребер S_p . При значительном уменьшении шага труб S_l обнаружилось, что известная формула для определения площади живого сечения $F_{ж}$ [2] никак не учитывает минимального расстояния между трубами по диагонали. Чтобы избежать получения нереальных значений, в программу был включен расчет зазора «z» между трубами:

$$z = ((0,5 \cdot s_t)^2 + s_t^2)^{0,5} - d_T . \quad (19)$$

Когда этот зазор стремится к нулю, фиксируется $F_{ж} = 0$, и расчеты прекращаются из-за деления на нуль в нескольких местах.

Полученные нами результаты о влиянии шага ребер S_p не согласуются с данными источников [29,30]. Рассмотрим причины. Статья [29] направлена на получение наибольшего количества переданной теплоты Q за счет равномерного, пропорционального и параболического распределения потока воздуха по высоте двухрядного ТО, имеющего по 30 труб по высоте. Падение давления воздуха не учитывалось. Исследовано влияние шага с $S_p = 1,02 - 2,54$ мм. Показано, что при равномерном распределении воздуха за счет шага ребер производительность Q не изменяется. При пропорциональном и параболическом распределении потока можно добиться повышения Q до 2% за счет изменения шага S_p .

Статья [30] посвящена расчетному исследованию ТО с круглыми и шестигранными ребрами, шаг которых изменяется от 1,69 до 8,47 мм. Получен экспоненциальный рост производительности Q при уменьшении шага S_p . Падение давления ΔP в диапазоне $S_p = 2,12 - 5,08$ практически не изменялось. Лишь при $S_p > 5,1$ мм наблюдался линейный рост ΔP . Отношение $Q/\Delta P$ имело слабо выраженный максимум при $S_p = 5,08$ мм. Причина несовпадения обусловлена преимущественно тем, что в статье [30] рассматривается влияние шага S_p на отношение $Q/\Delta P$ при переменной тепловой нагрузке Q , а в нашей работе оценивается влияние шага S_p на коэффициент $E_{э.н.с.}$ при постоянной нагрузке Q . Добавим, что в книге [8] также отмечается отсутствие оптимального шага ребер S_p в пластинчато-трубчатых ТО.

Заключение

По итогам поиска и обобщения опытных данных об интенсивности теплоотдачи и аэродинамическом сопротивлении ТО, получены два уравнения (19b1) и (7a1) с неодинаковыми сочетаниями независимых переменных, по которым для массива из 254 точек средние показатели точности различаются незначительно. При анализе тепловой эффективности ТО используется среднее значение чисел Nu , полученных по обоим уравнениям. Применительно к расчету ПД для массива из 272 точек получены три уравнения (DM7, EL6, GM7), средние значения показателей точности которых различаются слабо, несмотря на несовпадение числа независимых переменных. При определении энергетического коэффициента $E_э$ расчетные значения по трем уравнениям усредняются.

Разработана методика определения эффективности наружной теплоотдачи ТОА, учитывающая тепловую производительность наружной поверхности и мощность, потребляемую вентилятором. На основе методики для удобства расчетов энергетического коэффициента $E_{э.н.}$ составлена

программа расчета в пакете Microsoft Excel. Расчёты энергетического коэффициента $E_{э.н.}$ выполнены на примере шести теплообменников с разными конструктивными параметрами.

Данные таблиц 5 и 6 показывают, что для всех ТО уменьшение диаметра труб d_T приводит к заметному снижению коэффициента $E_{э.н.с.}$ при неизменных значениях скорости w_L и нагрузки Q . Если понижение числа Nu_c и КТО α_c вполне ожидаемо из-за снижения скорости $w_{ж.}$, то повышение ПД ΔP_c не очевидно. Подробный анализ показывает, что с уменьшением d_T понижаются площадь труб F_T и лобового сечения $F_{ж.}$. Соответственно, изменяются зависящие от них отношения, которые входят в состав безразмерных переменных уравнений DM7, EL6, GM7 (таблица 2). Пропорционально возрастают переменные, знаменатель которых содержит диаметр $d_T, d_h, d_э.$ Упомянутые переменные в каждом из трех уравнений по-своему учитывают местные сопротивления по ходу движения воздуха. Достаточно близкие к 1,0 значения $r_2, \Delta P_c / \Delta P_{э.с.}$ и $\overline{\Delta P}_{i.c.}$ показывают, что в среднем по трем уравнениям регрессии расчетные значения ΔP_i получаются близкими к опытным данным $\Delta P_{э.i.}$. Отсюда следует, что несмотря на уменьшение скорости $w_{ж.}$ и Re_d , уменьшение d_T приводит к росту ПД за счет изменения местных сопротивлений, которые в явном виде не участвуют в расчетах ПД и коэффициента $E_{э.н.}$.

Приведенные сведения могут быть использованы на практике для расчета КТО и ПД пластинчато-трубчатых ТО. На основе составленной в MS Excel программы подготовлены ее модификации для определения энергетического коэффициента $E_{э.н.}$ и ряда других показателей, используемых для сопоставления ТО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кошелев С.В., Ейдеюс А.И. Анализ данных об интенсивности теплоотдачи в теплообменниках с пластинчатыми ребрами // Вестник Международной академии холода. 2024. № 1. С. 13-20.
2. Теплообменные аппараты, приборы автоматизации и испытания холодильных машин / Под ред. А.В. Быкова. - М.: Легкая и пищ. пром-сть, 1984. - 248с.
3. Awad M.M., Muzychka. Thermodynamic Optimization, Heat Exchangers – Basic Design Application, Dr. Joran Mitrovic (Ed), 2012. ISBN: 978-953-51-0278-6. InTech. www.intehopen.com
4. Stewart S.W. Enhanced finned-tube condenser design and optimization. USA. Georgia Institute of Technology. 2008. 201p.
5. Теплообменные аппараты холодильных установок / Под ред. Г.Н. Даниловой.- Л.: Машиностроение, 1986. - 303 с.
6. Гоголин А.А. Кондиционирование воздуха в мясной промышленности. –М.: Пищевая промышленность. 1966. - 240с.
7. Кирпичев М.В. О наивыгоднейшей форме поверхности нагрева. –Известия ЭНИИ им. Кржижановского. 1944. Т.12.
8. Интенсификация теплообмена в испарителях холодильных машин. Под ред. А.А. Гоголина - М.: Лёгкая и пищевая промышленность. 1982. - 224с.
9. Антуфьев В.М. Эффективность различных форм конвективных поверхностей нагрева. М.-Л. Энергия. 1966.
10. Wright M.F. Plate fin-and-tube condenser performance and design for refrigerant R-410A air-conditioner. USA. Georgia Institute of Technology. 2008. - 201p.
11. Dong-quan Deng, Lie Xu, Shi-qiong Xu. Experimental investigation on the performance of air cooler under frosting conditions. Applied Thermal Engineering 23 (2003) 905-912.
12. Справочник проектировщика. Часть II. Вентиляция и кондиционирование воздуха. Под ред. И.Г. Старовойта. М.: Стройиздат. М.1977. - 502с.
13. Осушение воздуха холодильными машинами. / А.А. Гоголин. ГлавНИИ при ГосЭкономСовете СССР, ВНИИХолодПром. М.: Государственное издательство торговой литературы, 1962 г. - 101 с.
14. Thome, J. R. The Heat Transfer Engineering Data book III / J. C. Chen // PP Publico. –2016. – 628 p.
15. McQuiston, Faye C. Heating, ventilating, and air conditioning: analysis and design / Faye C. McQuiston, Jerald D. Parker, Jeffrey D. Spitler. – 6th ed. 623p.
16. Kang H.J. et al. Experimental study on heat transfer and pressure drop characteristics of four types. // J. of Thermal Science. 1994. Vol.3. №.1. P. 34-42.
17. Wang C.-C. et al. Sensible heat and friction characteristics of plate fin-and-tube heat exchangers having plane fins // Int J. Refrig. 1996. Vol. 19, No. 4, P. 223-230.

18. Wang C.-C. et al. Performance of plate finned tube heat exchangers under dehumidifying conditions. // Journal of Heat Transfer. 1997. Vol. 11. P. 109-117.
19. Wang C.-C., Chang C.-T. Heat and mass transfer for plate fin-and-tube heat exchangers, with and without hydrophilic coating // Int. J. Heat Mass Transfer 1998. №41. P. 3109-3120.
20. Kim N.H. et al. Air-side heat transfer and friction correlations for plain fin-and-tube heat exchangers with staggered tube arrangements. // Journal of Heat Transfer. 1999. Vol. 121. P. 662-667.
21. Yan W.-M., Sheen P.-J. Heat transfer and friction characteristics of fin-and-tube heat exchangers // Int. J. Heat Mass Transfer. 2000. №43. P. 1651-1659.
22. Taylor C. Measurement of finned-tube heat exchanger performance. A thesis presented to the academic faculty. Georgia Institute of Technology December 2004. 124p.
23. J.R. Barbosa et al. A study of the air-side heat transfer and pressure drop characteristics of tube-fin 'no-frost' evaporators // Applied Energy. 2009. №86. P. 1484–1491.
24. Xie G. et al. Parametric study and multiple correlations on air-side heat transfer and friction characteristics of fin-and-tube heat exchangers with large number of large-diameter tube rows. // Applied Thermal Engineering. 2009. №29. P. 1–16.
25. Liu Y.-C. et al. Airside performance of fin-and-tube heat exchangers in dehumidifying conditions – Data with larger diameter // Int. J. Heat Mass Transfer. 2010. №53.P. 1603–1608.
26. Wang L.B., Zeng M. et al. Air-side heat transfer and friction characteristics of fin-and-tube heat exchangers with various fin types. // WIT Transactions on State of the Art in Science and Engineering. 2013. Vol. 63. P. 1755-8336.
27. Frass F. Principles of Finned-Tube Heat Exchanger Design for Enhanced Heat Transfer - 2nd ed. Institute for Thermodynamics and Energy Conversion, Vienna University of Technology. Vienna, Austria. 152p.
28. Wang C.-C. et al. An experimental study of the air-side performance of fin-and-tube heat exchangers having plain, louver, and semi-dimple vortex generator configuration. // Int. J. Heat Mass Transfer 2015. №80. P. 281-287.
29. Qiao Hongtao, Singh Varun, Aute Vikrant, Rademarcher Reinhard. Optimization of fin density for air cooled heat exchanger. 2010. International Refrigeration and Air Conditioning Conference. Paper 1089.
30. Falarand A.J., Ghafouri A. Optimization of fin type and fin per inch on heat transfer and pressure drop of an air cooler. International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering. Vol.9, №9. 2015.

EVALUATION OF THE ENERGY COEFFICIENT OF PLATE-TUBE HEAT EXCHANGERS

¹Koshelev Sergey Valerjevich, Ph.D., Head of LRCRS

²Eideyus Algirdas Iozapovich, Ph.D., Mentor consultant

^{1,2}Baltic Fishing Fleet State Academy FSBEI HE "KSTU",
Kaliningrad, Russia, e-mail: kaf_xktk@bgarf.ru

The degree of perfection of heat exchangers largely depends on their thermal efficiency, which can be found by thermodynamic analysis or determination of the energy coefficient $E_{\text{э}} = Q/N$, where Q is the amount of heat transferred, N is the power spent on moving working media. In order to reduce the complexity of the calculation and increase the sensitivity of the technique, in relation to devices of this type, it is proposed to focus on the effectiveness of the outer surface, where the thermal resistance is highest. In this case, it is advisable to use an external cooling or heating coefficient to determine the temperature of the outer surface, which depends on the heat transfer coefficient. The power consumption depends on the pressure drop (PD) of the air (gas). By generalizing the collected experimental data, regression equations for calculating these indicators are obtained. Calculations of the energy coefficient $E_{\text{э,н}}$ are performed using the example of six heat exchangers with different design parameters. The effect of alternating changes in one of the parameters on the coefficient $E_{\text{э,н}}$ is analyzed.

ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ РЕГЕНЕРАТОРА ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Кункевич Сергей Владимирович, канд. тех. наук, доцент кафедры энергетики

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

Рассмотрена конструкция и тепловой расчет регенератора газовой турбины малой мощности. Построена параметрическая модель газо-воздушного теплообменника с газовым каналом без турбулизаторов и с перекрестно-противоточным движением воздуха с направляющими. Рассчитан вариант конструкции воздушных каналов, обеспечивающих минимальное аэродинамическое сопротивление.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из показателей совершенства газотурбинной установки (ГТУ) является эффективный коэффициент полезного действия (КПД) установки, являющийся отношением полученной в установке энергии к энергии топлива, использованного в камере сгорания. Повысить эффективность цикла ГТУ можно путем увеличения степени сжатия в компрессоре, а также за счет увеличения температуры газов перед турбиной. При исчерпании возможностей повышения КПД ГТУ за счет приведенных мероприятий, дальнейшего повышения эффективности ГТУ можно добиться путем усложнения тепловой схемы, а именно – включением в нее дополнительных теплообменников.

В настоящее время наиболее распространенной является схема ГТУ с регенератором. При работе по простому циклу температура уходящих газов превышает 500°C и бесполезно теряется большое количество теплоты. В тепловой схеме с регенерацией часть теплоты на выходе газовой турбины возвращается в цикл путем ее передачи от выхлопных газов воздуху, сжатому в компрессоре. Введение в цикл регенерации позволяет повысить КПД установки без роста начальной температуры перед турбиной и снизить расход топлива [1, 2].

1. Устройство регенератора

Регенератор набирается из отдельных секций, общее количество которых равно 72. На рис. 1 представлен общий вид регенератора. Продукты сгорания из выходного диффузора газовой турбины направляются аксиально в клинообразные каналы регенератора. Каналы являются гладкими (без турбулизаторов) для обеспечения минимального аэродинамического сопротивления. Воздушный тракт каждой секции состоит из основного канала высотой, равной высоте газового канала, а также дополнительного канала, установленного в рассечку газового канала, высотой в половину высоты основного канала, рис. 2. Вход и выход воздуха в/из регенератора осуществляется радиально через входной и выходной коллекторы, объединяющие секции. Движение воздуха относительно газового потока организовано как перекрестно-противоточное. Перекрестное течение обеспечивается использованием рассекателей-направляющих.

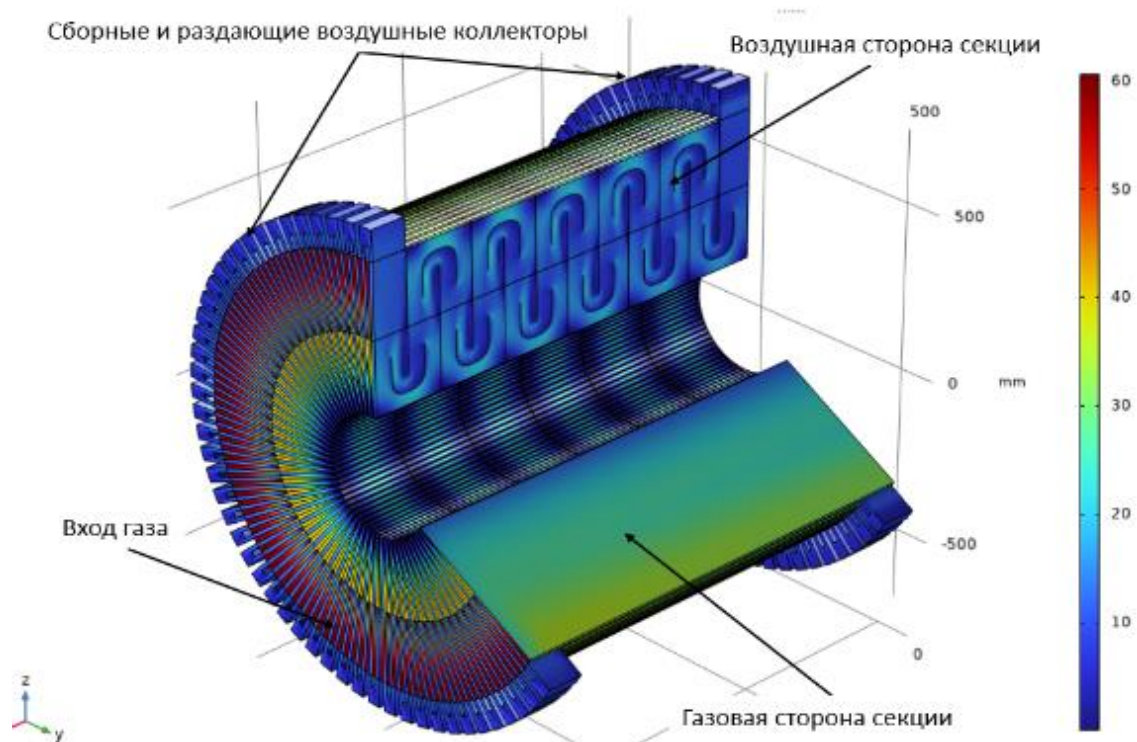


Рис. 1. Общий вид регенератора.
Цветом обозначены скорости теплоносителей, м/с (газа и воздуха).

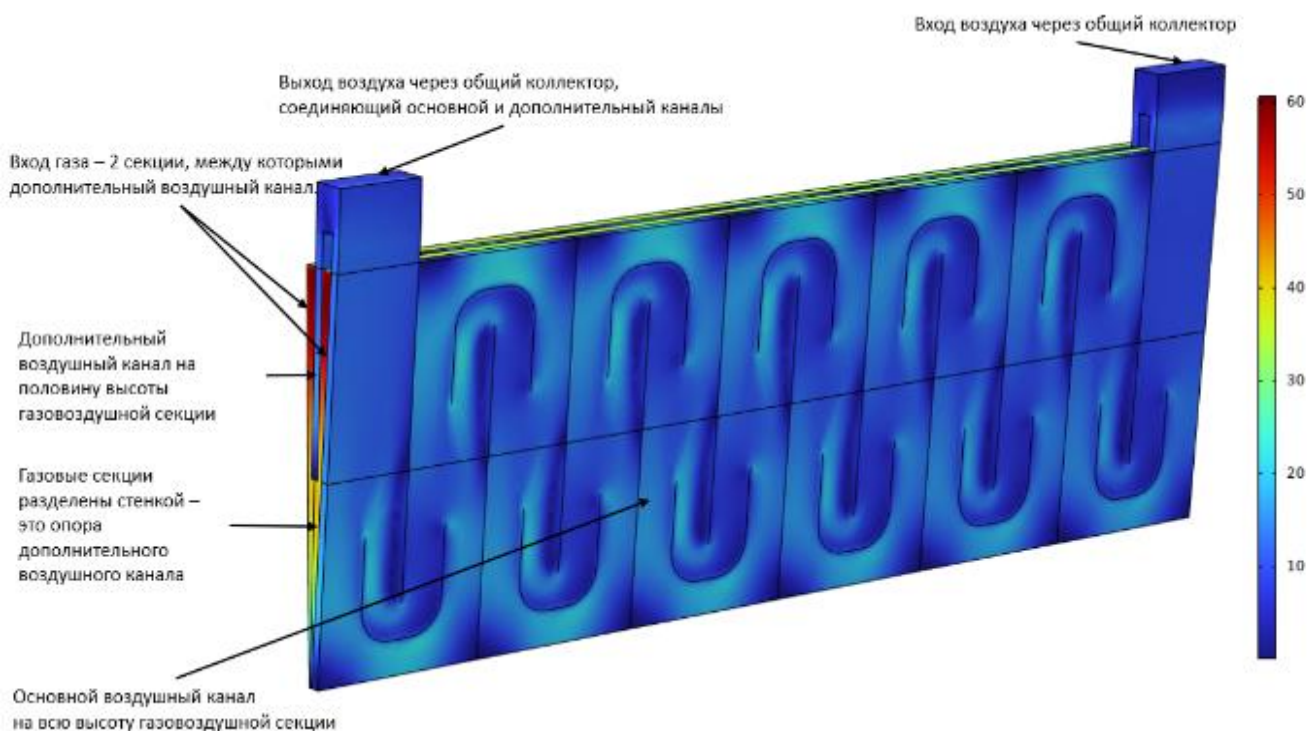


Рис. 2. Вид секции регенератора.
Цветом обозначены скорости теплоносителей, м/с (газа и воздуха).

2. Исходные данные для расчета регенератора

Расчет свойств теплоносителей, а также собственно расчет теплообмена в регенераторе ГТУ осуществлялся в САЕ системе Comsol Multiphysics 6.2 [3, 4]. Свойства воздуха взяты из стандартной базы материалов Comsol. Свойства продуктов сгорания рассчитывались в термодинамической системе как смесь газов, учитывая мольные доли составляющих компонентов, таблица 1. При расчете за основу приняты уравнения состояния Пенга-Робинсона.

Состав воздуха и продуктов сгорания

№№	Компоненты газовой смеси		Сухой воздух среднего состава, %	Продукты сгорания газовой турбины, %
1	Азот	N ₂	78,084	74,802376
2	Кислород	O ₂	20,948	13,801293
3	Аргон	Ar	0,934	0,90769
4	Углекислый газ	CO ₂	0,031	3,188246
5	Водяные пары	H ₂ O	-	7,300392
6	Прочие		0,003	-
			100	100

Основные геометрические параметры рассчитываемого регенератора представлены в таблице 2. Ограничение по длине, а также величина внешнего и внутреннего радиусов секций, определялись габаритами модульной конструкции ГТУ. Ширина воздушного канала секций и количество перекрестных ходов определялись вариантными расчетами исходя из допустимого сопротивления по воздушной стороне.

Таблица 2

Основные геометрические параметры регенератора

№№	Наименование	Величина
1	Длина регенератора	1300 мм
2	Внешний радиус сектора	625 мм
3	Внутренний радиус сектора	175 мм
4	Количество секторов	72
5	Ширина воздушного канала	108 мм
6	Высота основного воздушного канала	450 мм
7	Высота дополнительного воздушного канала	225 мм

Основные режимные параметры выбраны для номинального режима работы ГТУ и представлены в таблице 2. Поскольку все секции регенератора имеют одинаковый конструктив, тепловой расчет проводился по одной секции, с учетом массового расхода воздуха и газов через одну секцию.

Таблица 3

Основные режимные параметры регенератора

№№	Наименование	Величина
1	Давление воздуха на входе (абс)	817 кПа
2	Давление воздуха на выходе (абс)	812 кПа
3	Температура воздуха на входе	296°C
4	Общий расход воздуха на регенератор	11,0 кг/с
5	Давление газа на входе (абс)	106,4 кПа
6	Давление газа на выходе (абс)	101,3 кПа
7	Температура газа на входе	536°C
8	Общий расход газа на регенератор	11,145 кг/с

3. Расчет регенератора

Для теплового расчета регенератора ГТУ в системе CAE Comsol Multiphysics 6.2 была сформирована параметрическая модель, установлены начальные и граничные условия в соответствии с параметрами ГТУ и получены выходные расчетные данные. При вариантных расчетах изменяемым параметром была ширина входного воздушного канала, от величины которого рассчитывались остальные каналы при неизменной общей длине регенератора. При расчете теплообмена устанавливалось периодическое граничное условие передачи теплоты от газовой стенки секции к воздушной стенке, учитывая циклическую симметрию секций регенератора.

Поскольку на длину регенератора введено ограничение в 1300 мм, произведен вариантный расчет регенератора с различной шириной входного канала по воздуху 90 мм, 95 мм, 100 мм и 108 мм. Т.е. выбирается ширина 1-го канала, а ширина последующих каналов находится как произведение предыдущего на масштабирующий множитель 1.03314, 1.0236, 1.01445 или 1.0 соответственно. Таким образом, в первых 3-х вариантах воздушные направляющие идут с разрядкой (ширина каналов увеличивается по ходу воздуха для уменьшения аэродинамического сопротивления при нагреве и ускорении воздушного потока), а в последнем варианте ширина всех каналов одинакова (множитель 1.0). Во всех вариантах суммарная длина всех каналов равна 1300 мм. На рис. 3 представлено сечение по 12-ти ходам канала, где вычислялись усредненные значения скорости и давления воздушного потока.

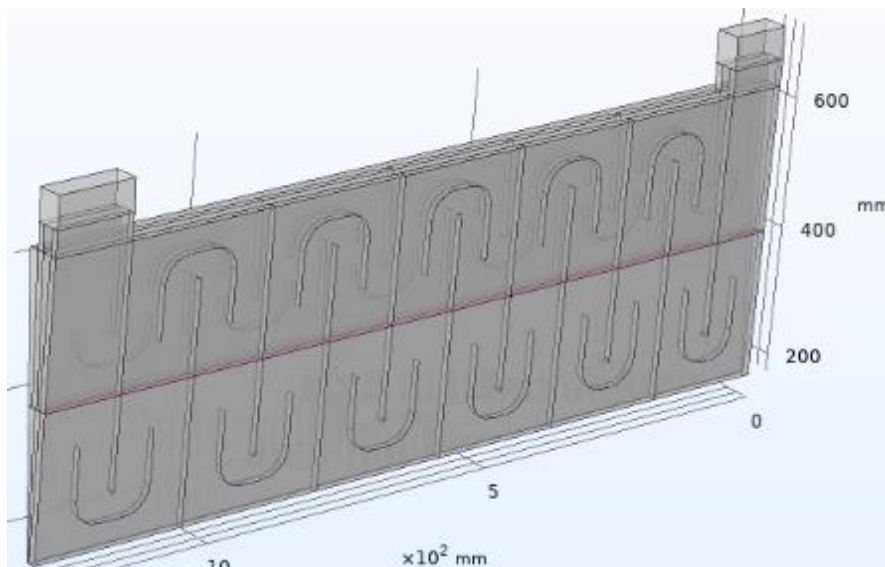


Рис. 3. Сечение по 12 ходам воздушного канала, по которым вычислялись усредненные значения скорости и давления воздушного потока.

На рис. 4 представлены средние скорости в сечениях канала на промежуточном режиме, в зависимости от начальной ширины 1-го (входного) канала. Из диаграммы видно, что оптимальная ширина входа по воздуху находится в районе 100 мм, когда скорости по ходам выровнены, а ширины каналов (ходов), следующих за входным, следуют с разрядкой.

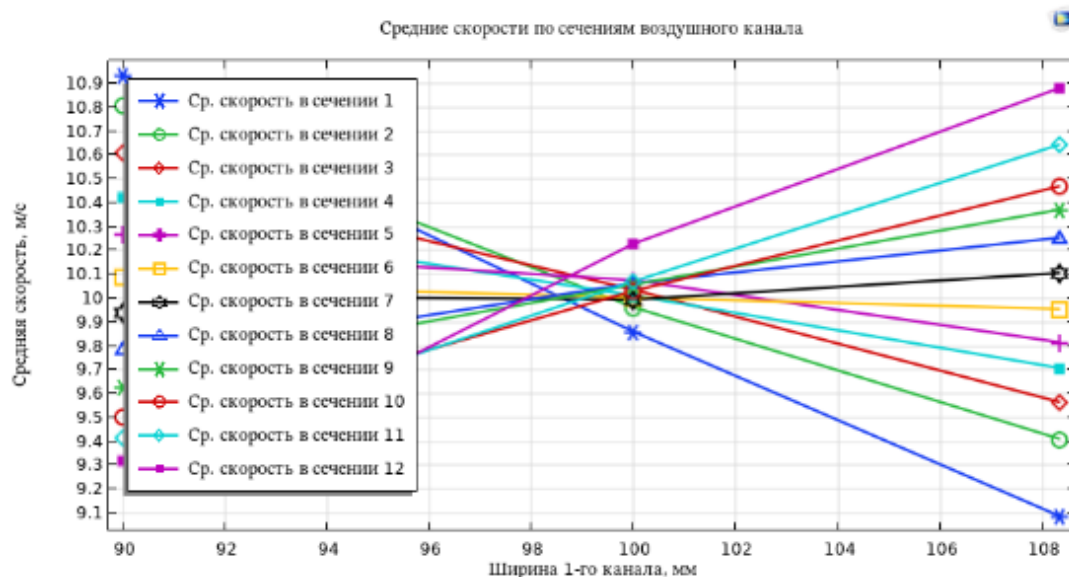


Рис. 4. Зависимость средней скорости в сечениях воздушного канала от ширины входного канала

Для обеспечения многоходовости по воздуху в радиальном направлении предусмотрены направляющие, которые формируют 12 ходов, рис. 3. При переходе между ходами поток меняет направление на 180°, при этом наблюдалось резко неравномерное поле скоростей и давлений, что приводило к появлению повышенных локальных сопротивлений и застойных зон с вихревым круговым течением. Для устранения этого явления были запроектированы U-образные рассекатели, которые разделяют набегающий поток в канале на два потока в зоне умеренных скоростей воздуха с плавным разворотом на 180°. В средней части каналов происходит перемешивание потоков для формирования более равномерных полей температур и скоростей, рис. 5. Кроме этого, произведено скругление кромок направляющих в зоне разворота воздушного потока, что привело к некоторому снижению местных сопротивлений.

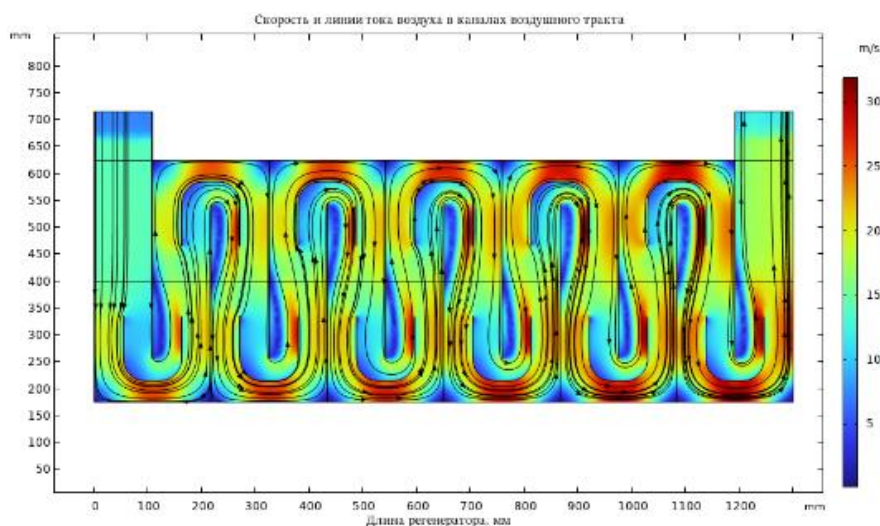


Рис. 5. Скорость и линии тока в воздушных каналах секции регенератора

Основные результаты расчета регенератора представлены в таблице 3. Падение давления по газовому тракту составляет менее 1%, по воздушному – около 1,4%. Столь малое сопротивление газоздушного тракта практически не приведет к заметному снижению мощности ГТУ. Сравнительно небольшая величина нагрева воздуха 105°С вызвана недостаточной площадью теплообмена, являющейся следствием ограничений по габаритам теплообменника из-за модульной конструкции ГТУ.

Таблица 3

Основные результаты расчета по давлениям и температуре

№№	Параметр	Значение
Давление		
1	Среднее давление газа на входе	101,96 кПа
2	Среднее давление газов на выходе	101,33 кПа
3	Перепад давления по газам	0,633 кПа
4	Среднее давление воздуха на входе	822,9 кПа
5	Среднее давление воздуха на выходе	812,0 кПа
6	Перепад давления по воздуху	10,96 кПа
Температура		
1	Средняя температура газов на входе	535,02°С
2	Средняя температура газов на выходе	434,02°С
3	Средняя температура воздуха на входе	296,0°С
4	Средняя температура воздуха на выходе	401,68°С

Произведены вариантные расчеты регенератора при изменении относительной нагрузки ГТУ от 0,1 до 1,0. Рассчитаны средние скорости газов, а также усредненные характеристики теплофизических свойств продуктов сгорания (теплоемкость, теплопроводность, динамическая вязкость

и др.), эквивалентный диаметр газового канала. На основании этих данных построена зависимость безразмерного коэффициента теплоотдачи Nu от критерия Re по газовой стороне, рис. 6.



Рис. 6. Зависимость безразмерного коэффициента теплоотдачи Nu от Re по газовой стороне

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана конструкция регенератора газовой турбины малой мощности. На основе построенной параметрической модели найдено оптимальное соотношение расстояния между направляющими воздушного канала, что обеспечивает минимальное аэродинамическое сопротивление.

2. Установка раскателей-направляющих в воздушном канале позволило сделать более равномерным поле скорости воздуха, что позволило улучшить тепловые и аэродинамические характеристики регенератора.

3. По усредненным характеристикам получена зависимость безразмерного коэффициента теплоотдачи Nu по газовой стороне от числа Re в диапазоне относительных нагрузок ГТУ от 0,1 до 1,0.

Список литературы

1. Тихонов А.М. Регенерация тепла в авиационных ГТД. – М., «Машиностроение», 1977, 108 с.
2. Жукаускас А.А. Конвективный перенос в теплообменниках. – М.: Наука, 1982. 472 с.
3. Comsol Multiphysics 6.2. Liquid & Gas Properties Module. User's Guide., p. 118.
4. Comsol Multiphysics 6.2. Heat Transfer Module. User's Guide., p. 976.

THERMAL CALCULATION OF A LOW-POWER GAS TURBINE REGENERATOR

Kunkevich Sergey Vladimirovich, Cand. Technical Sciences,
Associate Professor of the Department of Power Engineering

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

This paper examines the design and thermal calculation of a low-power gas turbine regenerator. A parametric model of a gas-air heat exchanger with a gas channel without turbulators and with cross-counterflow air movement with guides is constructed. Design options for air channels that provide minimal aerodynamic resistance are calculated.

К РАСЧЕТУ ТЕПЛООБМЕНА В РЕГЕНЕРАТОРАХ ГАЗОВЫХ ТУРБИН

¹Кункевич Сергей Владимирович, канд. тех. наук, доцент кафедры энергетики

²Даровских Григорий Алексеевич, инженер

¹ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,
Калининград, Россия, e-mail: skunkevich@mail.ru

²МП «Калининградтеплосеть», Калининград, Россия, e-mail: grishka2000@list.ru

Рассмотрены свойства продуктов сгорания газовых турбин, получаемых при сжигании метана, при использовании различных термодинамических моделей. Произведено сравнение свойств продуктов сгорания (газовых смесей) со свойствами сухого воздуха. На примере регенератора газовой турбины произведено сравнение результатов расчета теплообмена при использовании в качестве свойств продуктов сгорания свойств сухого воздуха и свойств газовой смеси.

ВВЕДЕНИЕ

Тепловой расчет в различных типах теплообменников базируется на отработанных методиках, использующих свойства греющих и нагреваемых сред, представленных в виде табличных данных, функциональных зависимостей от температуры и давления. И если для чистых веществ и некоторых широко используемых газовых смесей (воздух) эти зависимости широко распространены и применяются при ручных и автоматизированных расчетах, то свойства продуктов сгорания, например, газовых турбин, зависят от их состава и требуют специального расчета свойств газовых смесей.

При расчете теплообмена между продуктами сгорания (газом) и воздухом или газом и компонентами газовой турбины для упрощения часто в качестве рабочего тела вместо газа выбирают воздух, аргументируя это тем, что в дымовых газах в камере сгорания коэффициент избытка воздуха значительно больше единицы, а перед первой ступенью ГТД продукты сгорания могут специально разбавляться воздухом для обеспечения требуемого уровня температур перед первой ступенью и компоненты воздуха будут превалировать. В связи с этим возникают вопросы:

1. Насколько свойства воздуха отличаются от свойств продуктов сгорания определенного состава?

2. Как разница в свойствах повлияет на результаты расчета теплообмена?

Для ответа на эти вопросы рассмотрим состав и основные свойства сухого воздуха и свойства продуктов сгорания. При расчете продуктов сгорания в качестве исходного топлива был взят метан CH_4 , в качестве окислителя – воздух.

1. Свойства воздуха и продуктов сгорания усредненного состава

Для сопоставления основных свойств воздуха и продуктов сгорания использовался Comsol Multiphysics 6.2. Свойства воздуха взяты из стандартной базы материалов Comsol. Свойства продуктов сгорания рассчитывались в термодинамической системе как смесь газов, учитывая мольные доли составляющих компонентов, таблица 1.

Для расчета свойств воздуха и газов давление и температура воздуха и газов выбрана исходя из рабочих параметров теплоносителей регенератора газовой турбины малой мощности:

– давление принято равным среднему значению по газам и воздуху на входе в регенератор и составило $p_{cp} = 461$ кПа;

– минимальная температура соответствует температуре воздуха на входе $t_{мин} = 296^\circ\text{C}$;

– максимальная температура соответствует температуре газов на входе $t_{макс} = 536^\circ\text{C}$.

Состав воздуха и продуктов сгорания

№№	Компоненты газовой смеси		Сухой воздух	Продукты сгорания газовой
			среднего состава, %	турбины, %
1	Азот	N ₂	78,084	74,802376
2	Кислород	O ₂	20,948	13,801293
3	Аргон	Ar	0,934	0,90769
4	Углекислый газ	CO ₂	0,031	3,188246
5	Водяные пары	H ₂ O	-	7,300392
6	Прочие		0,003	-
			100	100

При расчете газовых смесей использовались различные термодинамические модели (уравнения состояния): идеального газа, Пенга-Робинсона, Соаве-Редлиха-Квонга.

Уравнение состояния идеального газа – формула, устанавливающая зависимость между давлением, молярным объемом и абсолютной температурой идеального газа. Уравнение имеет вид:

$$p = \frac{\nu RT}{V_m} \quad (1)$$

где p – давление, Па; V_m – молярный объем газа, м³/моль; ν – количество вещества в молях; R – универсальная газовая постоянная, $R \approx 8,314$ Дж/(моль·К); T – термодинамическая температура, К.

Уравнение состояния Пенга-Робинсона – модификация уравнения Ван-дер-Ваальса, связывающая основные термодинамические параметры реального газа за счёт введения дополнительного объемозависимого кубического трёхчлена, учитывающего межмолекулярные взаимодействия в реальном газе. Эта модификация уравнения применяется преимущественно для описания поведения углеводородов нормального строения и смесей. Уравнение имеет вид:

$$p = \frac{R \cdot T}{V_m - b} - \frac{a \cdot \alpha}{V_m^2 + 2 \cdot b \cdot V_m - b^2} \quad (2)$$

где α , a и b – параметры, зависящие от критических давления и температуры, а также ацентрического фактора.

Уравнение состояния Соаве-Редлиха-Квонга – это модификация двухпараметрического уравнения состояния реального газа, полученное О. Редлихом и Дж. Квонгом в 1949 году. При этом Отто Редлих в своей статье 1975 года пишет, что уравнение не опирается на теоретические обоснования, а является по сути удачной эмпирической модификацией ранее известных уравнений. Уравнение имеет вид:

$$p = \frac{R \cdot T}{V_m - b} - \frac{a \cdot \alpha}{V_m (V_m + b)} \quad (3)$$

где a и b – некоторые константы, зависящие от конкретного вещества.

На рис. 1 представлены графики плотности сухого газа и продуктов сгорания при реализации различных термодинамических моделей (уравнений состояния): идеального газа, Пенга-Робинсона, Соаве-Редлиха-Квонга. Плотность газов различается между собой незначительно, а среднее различие между газом и воздухом составляет 2,1%.

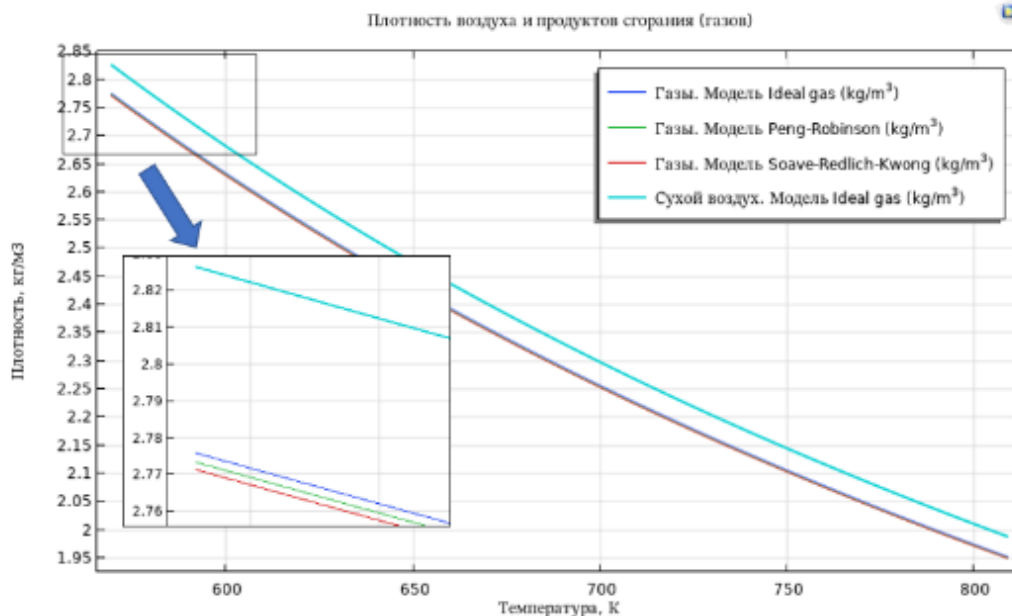


Рис. 1. Сопоставление плотности воздуха и продуктов сгорания в диапазоне температур регенератора

Сопоставление теплоемкости воздуха и продуктов сгорания представлено на рис. 2. Даже при среднем составе продуктов сгорания их теплоемкость выше, чем у воздуха, в среднем на 4,6%. Эта разница будет еще выше, если в газовой турбине будет предусмотрен ввод пара или впрыск воды для снижения NO_x .

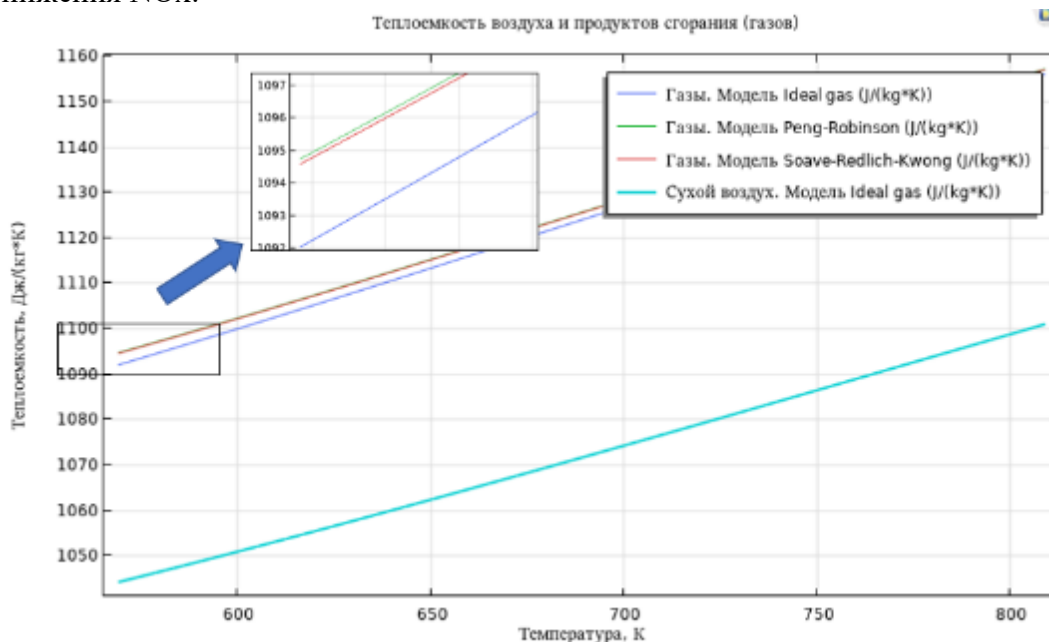


Рис. 2. Сопоставление теплоемкости воздуха и продуктов сгорания в диапазоне температур регенератора.

На рис. 3 представлены графики вязкости воздуха и продуктов сгорания, Па·с. Вязкость газов практически одинакова для различных термодинамических моделей (графики совпадают) и превышает вязкость воздуха в среднем на 34%. Столь существенное различие в показателе может сильно повлиять на результаты расчета при использовании воздуха в качестве замены продуктам сгорания.

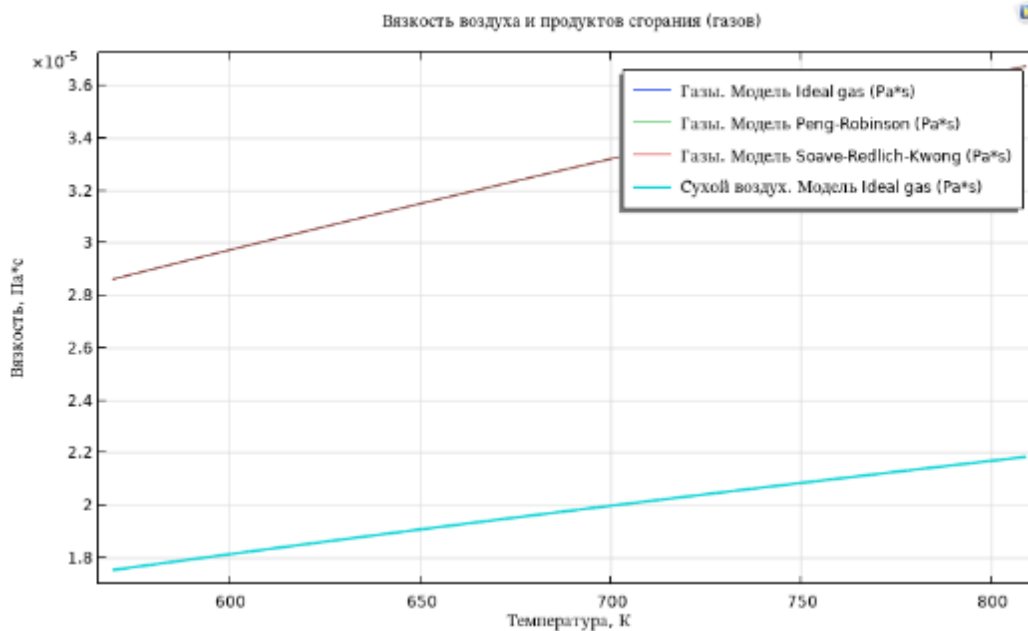


Рис. 3. Сопоставление вязкости воздуха и продуктов сгорания в диапазоне температур регенератора.

На рис. 4 демонстрируется различие теплопроводности продуктов сгорания и воздуха, Вт/(м·К). При температуре 300°C различие составляет около 3,4%, при повышении температуры разница уменьшается.

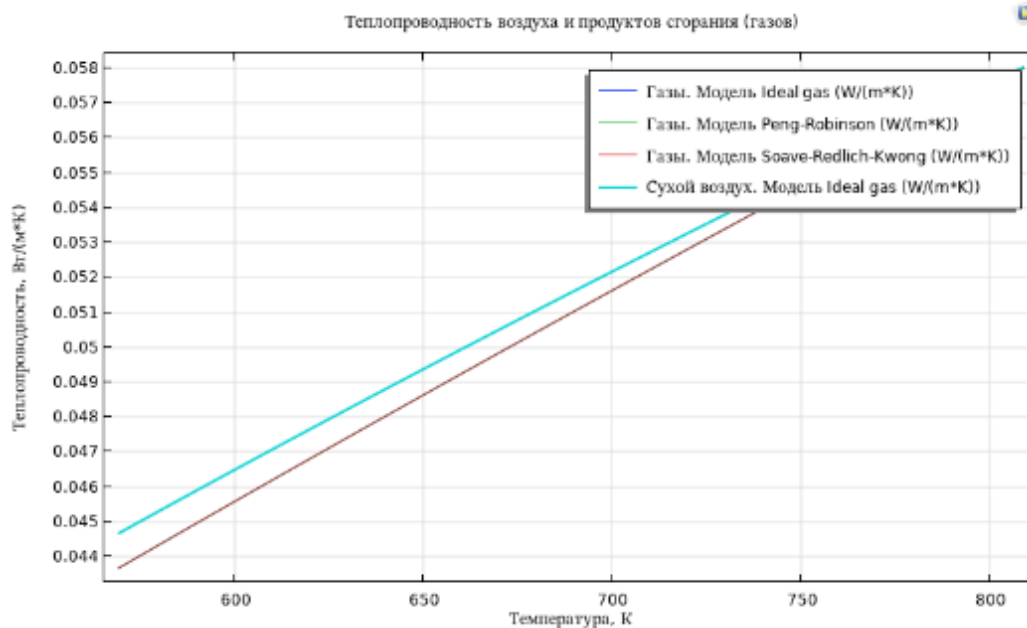


Рис. 4. Сопоставление теплопроводности воздуха и продуктов сгорания в диапазоне температур регенератора.

2. Влияние различий в свойствах воздуха и продуктов сгорания на результаты расчета теплообмена в регенераторе

Рассмотрим два варианта расчета теплообмена в регенераторе газовой турбины:

1. В качестве рабочего тела (РТ) продуктов сгорания (газов) используется воздух – теплообмен «воздух / воздух».

2. В качестве РТ продуктов сгорания (газов) используется газовая смесь в соответствии с таблицей 1 – теплообмен «газы / воздух».

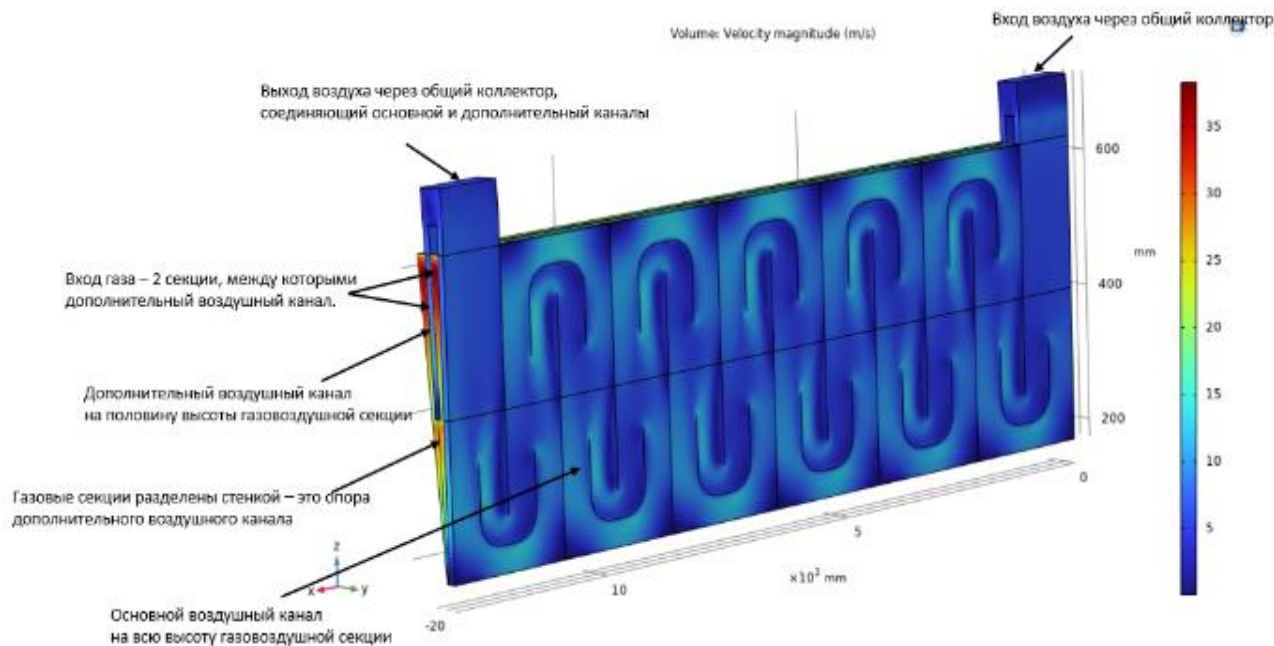


Рис. 5. Общий вид секции регенератора газовой турбины.
Цветом демонстрируется распределение полей скоростей по газам и воздуху, м/с.

Рассмотрим распределение температур газов вдоль секущей линии, проходящей через одну из газовых секций регенератора.

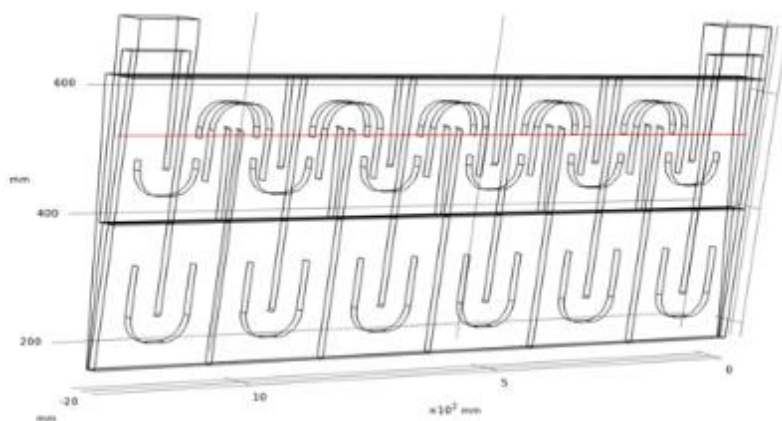


Рис. 6. Секущая линия, вдоль которой будет строиться распределение температур дымовых газов

Из рис. 7 видно, что свойства продуктов сгорания влияют на теплообмен в регенераторе. Разница между температурами дымовых газов на выходе регенератора между вариантами составляет 3 градуса (правая шкала) или 2,97% от разницы температур вход/выход. Причем, меньше охлаждаются газы в варианте 2, где в качестве РТ – продукты сгорания. Это можно объяснить повышенным содержанием трехатомных газов CO_2 и H_2O в продуктах сгорания (см. табл. 1), которые обладают повышенной теплоемкостью (см. рис. 2).

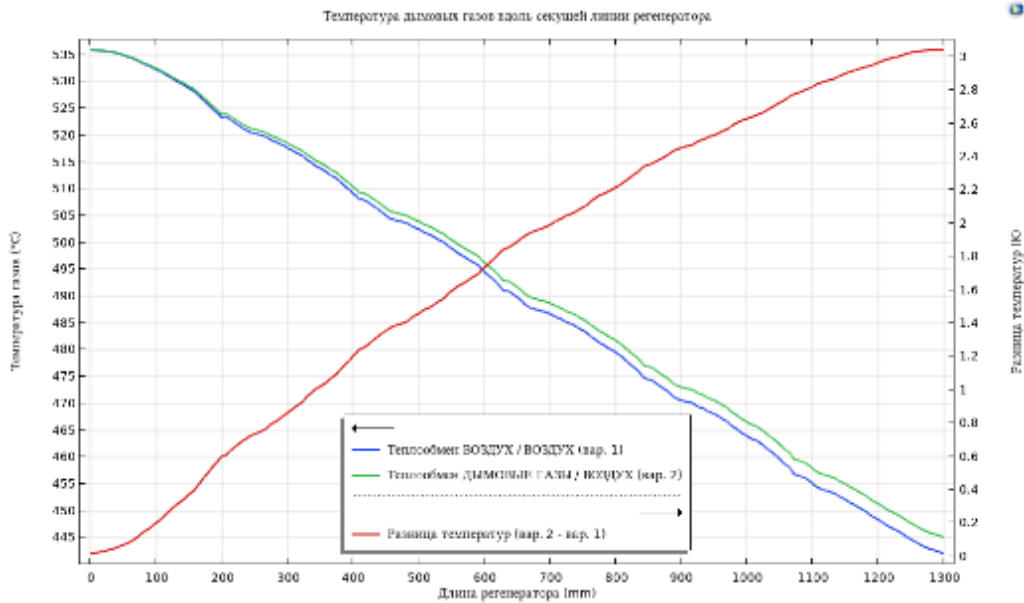


Рис. 7. Температура дымовых газов по длине регенератора в зависимости от варианта расчета (что взято в качестве рабочего тела продуктов сгорания).

На рис. 8 представлены температуры воздуха вдоль секющей линии регенератора. Резкие колебания температур вызваны неравномерностью поля скоростей воздуха при поперечно-противоточном течении воздуха в 12 каналах. Вместе со средним повышением температуры воздуха в обоих вариантах, растет разница температур между вариантами (правая шкала) и достигает 1,9 градуса или 1,8% от величины нагрева воздуха.

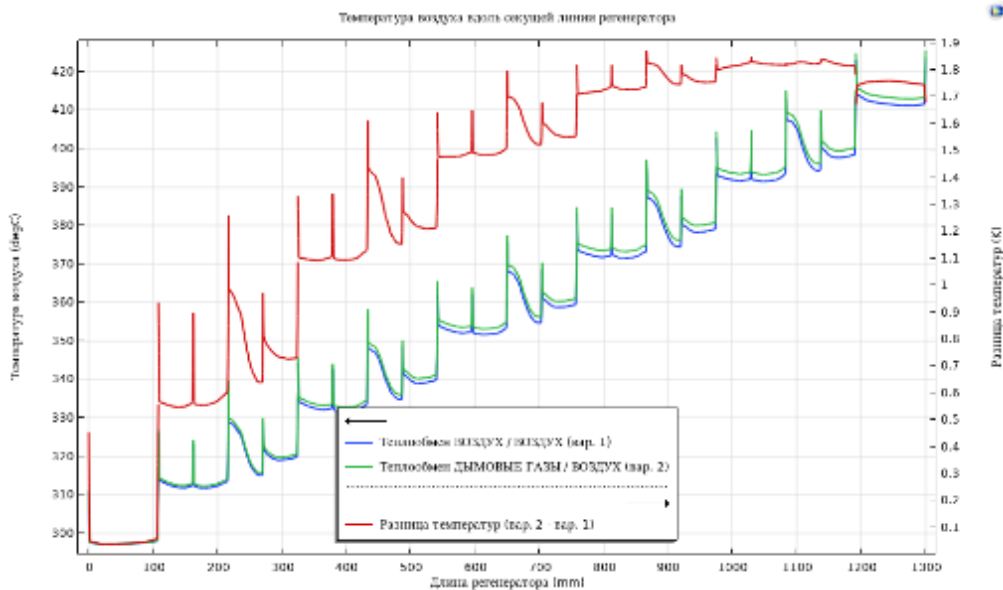


Рис. 8. Температура воздуха вдоль секющей по длине регенератора в зависимости от варианта расчета (что взято в качестве рабочего тела продуктов сгорания).

На рис. 9 представлено изменение давления газов по длине регенератора и как влияет на давление выбор РТ, в качестве дымовых газов. На длине регенератора 1300 мм давление близко к нулю, т.к. по граничному условию выхлоп сообщается с атмосферой. Из рисунка видно, что при использовании в качестве РТ продуктов сгорания, сопротивление газового тракта возрастает на 17 Па (правая шкала) или около 2,6%.

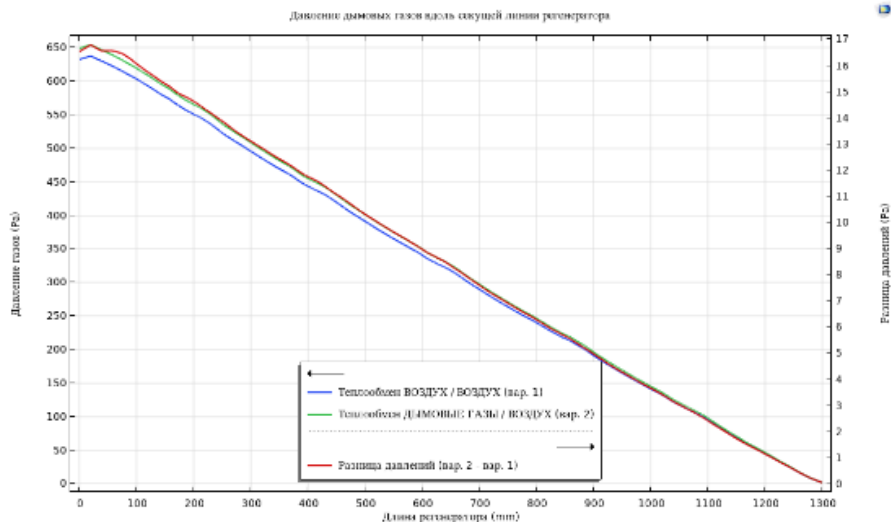


Рис. 9. Давление продуктов сгорания вдоль текущей по длине регенератора в зависимости от варианта расчета (что взято в качестве рабочего тела продуктов сгорания).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Отклонение значений теплопроводности, теплоемкости, вязкости, плотности воздуха относительно продуктов сгорания (газовой смеси среднего состава) не превышает 2–5% в рассматриваемом диапазоне температур. Использование при расчетах в качестве рабочего тела вместо продуктов сгорания – воздуха, приводит к изменению условий теплообмена, при этом наблюдается отклонение температуры газов / воздуха и сопротивления газового тракта не более 3%. Т.е. для предварительных расчетов теплообмена в газо-воздушных теплообменных аппаратах вместо газа можно использовать воздух.

2. Для получения более точных расчетов при использовании газов среднего состава, а также при расчете камер сгорания газовых турбин необходимо использовать свойства газовых смесей, учитывающих мольную долю компонентов, входящих в смесь. Особенно это касается газотурбинных установок с камерами сгорания с впрыском воды/пара для увеличения мощности и уменьшения генерации NOx, поскольку при этом значительно увеличивается доля трехатомных газов (H₂O) и, соответственно, меняются условия теплообмена.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей: Справочное пособие / Пер. с англ. под ред. Б. И. Соколова. – Л.: Химия, 1982. – 592 с.
2. Comsol Multiphysics 6.2. Liquid & Gas Properties Module. User's Guide., p. 118.
3. Тихонов А.М. Регенерация тепла в авиационных ГТД. – М., «Машиностроение», 1977, 108 с.

TO THE CALCULATION OF HEAT TRANSFER IN GAS TURBINE REGENERATORS

¹Kunkevich Sergey Vladimirovich, Ph.D. in Engineering,
Associate Professor of the Department of Power Engineering

²Darovskikh Grigory Alekseevich, Engineer

¹Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia, e-mail: skunkevich@mail.ru

²ME "Kaliningradteploset", Kaliningrad, Russia, e-mail: grishka2000@list.ru

This paper examines the properties of combustion products of gas turbines obtained by burning methane using various thermodynamic models. A comparison of the combustion products properties (gas mixtures) with dry air is made. Using the example of a gas turbine regenerator, a comparison is made of the results of heat exchange calculations using the properties of dry air and the properties of a gas mixture as combustion products.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА И КОНСТРУКТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕНТРОБЕЖНОЙ КОМПРЕССОРНОЙ СТУПЕНИ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК КГТ-2.0

¹Несмачных Никита Андреевич, студент

²Юрков Сергей Валерьевич, доцент кафедры энергетики

^{1,2}ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,
Калининград, Россия, e-mail: ¹n.nesmachnykh@mail.ru; ²sergej.yurkov@klgtu.ru

Представлена методика оптимизации параметров рабочего процесса и конструктивных характеристик компрессора ГТУ на примере расчета центробежной ступени КГТ-2.0. В процессе расчета было проанализировано более 25 вариантов комбинаций переменных исходных данных, параметры оптимизировались для достижения наибольшей эффективности ступени с наименьшей погрешностью вычислений. Получен результат в виде выполненного термогазодинамического расчета с точностью сходимости <2 % по степени сжатия и КПД.

Введение

В настоящее время при создании современных газотурбинных установок (ГТУ) главной задачей является достижение их наибольшей эффективности. КПД ГТУ может быть увеличен различными способами, однако, это приводит к усложнению конструкции как основных узлов, так и энергоустановки в целом.

При разработке конструкции ГТУ малой мощности КГТ-2.0, особое внимание уделялось центробежной компрессорной ступени. Возможность достижения высокой степени повышения давления при небольших массогабаритных характеристиках является преимуществом центробежного компрессора (ЦБК) перед осевым, несмотря на более низкий КПД [1]. Для достижения максимального КПД ГТУ (32% и выше) в цикле предусмотрена регенерация теплоты уходящих газов. В данной статье предложена методика оптимизации рабочего процесса ЦБК с целью повышения эффективности установки в целом.

1. Расчет параметров рабочего процесса и конструктивных характеристик ЦБК

Вопросам расчета центробежных компрессоров посвящено множество работ [1-6]. Все рассмотренные методики расчета сводятся к разделению рабочего процесса на элементарные процессы в основных узлах компрессорной ступени (рис. 1). Конструкции этих основных узлов ступени могут быть различны, но в целом, расчет производится методом последовательных приближений, от элемента к элементу, с учетом выполнения основных законов сохранения газовой динамики и термодинамики.

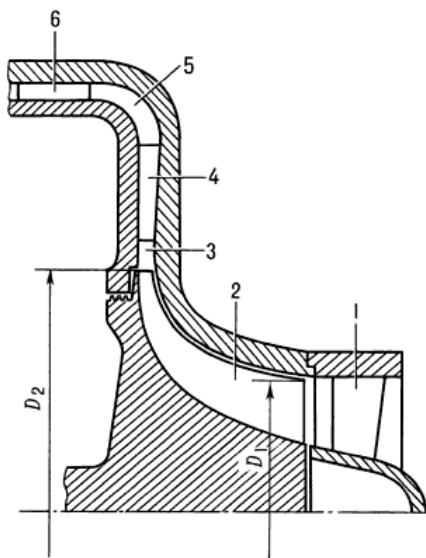


Рис. 1. Схема центробежного компрессора:

1 - входной направляющий аппарат (ВНА), 2 - рабочее колесо (РК), 3 - безлопаточный диффузор (БЛД), 4 - лопаточный диффузор (ЛД), 5 – радиально-осевой канал, 6 – спрямляющее устройство (СУ).

Перед расчетом ЦБК необходимо сначала провести термогазодинамический расчет ГТУ с целью получения неизменных параметров компрессора (табл.1). Расчет производится с последовательным уточнением исходных данных до значений, позволяющих получить удовлетворительные результирующие показатели ГТУ.

Таблица 1

Результаты термогазодинамического расчета ГТУ

№ п/п	Наименование величины	Обозначение	Единица измерения	Значение
Исходные данные				
1.	Массовый расход входящего воздуха	G	кг/с	11
2.	Давление входящего воздуха	$P_{вх}$	МПа	0,1013
3.	Температура входящего воздуха	$T_{вх}$	°С	15
4.	Степень повышения давления в компрессоре	$\pi_{к*}$	-	8
5.	КПД компрессора	η_k	%	85,6
6.	Температура воздуха на выходе из регенератора	T_5	°С	401,6
7.	Температура на входе в газовую турбину	T_3	°С	950
Результаты расчета				
8.	Расход газа через газовую турбину	G_T	кг/с	11,15
9.	Расход топлива	B_T	кг/с	0,15
10.	Мощность компрессора	N_k	МВт	3,07
11.	Мощность топливного компрессора	$N_{тк}$	МВт	0,022
12.	Мощность газовой турбины	$N_{гт}$	МВт	5,5
13.	Мощность электрогенератора ГТУ	$N_{ГТУ}$	МВт	2,37
14.	Электрический КПД ГТУ	$\eta_э$	%	32,26

Выполнение термогазодинамического расчета компрессорной ступени начинается с ввода исходных данных. Задаются две группы параметров, неизменные и переменные. К неизменным параметрам относятся:

- Расход рабочего тела на входе в ЦБК – G_B , кг/с;
- Полное давление на входе в компрессор – $p_{в*}$, Па;
- Полная температура на входе в компрессор – $T_{в*}$, К;
- Частота вращения – n , об/мин
- Потребная степень сжатия компрессора – $\pi_{к*}$;
- Ожидаемый КПД ступени компрессора – η_k , %;

К этой же группе относятся свойства рабочего тела, которые будут неизменны в ходе расчета.

К переменным параметрам относятся:

– Угол потока перед рабочим колесом – $\alpha_1 = 60 \div 90^\circ$ (при отсутствии предварительной закрутки $\alpha_1 = 90^\circ$);

– Конструктивный выходной угол лопатки – $\beta_{2л} = 50 \div 90^\circ$;

– Число лопаток радиальной части колеса – $z_{рК} = 16 \div 38$;

– Относительный диаметр втулки на входе в РК – $d^- = 0,35 \div 0,6$;

– Относительный диаметр периферии на входе в РК – $D^- = 0,45 \div 0,65$;

– Обобщенный коэффициент расхода $C_{2m0}^- = 0,22 \div 0,4$;

В ходе выполнения расчета определяется погрешность вычислений ключевых параметров: π_k^* – степень сжатия, η_k – КПД компрессорной ступени. В случае расхождения результатов более чем на 3%, производится корректировка переменных параметров с последующим перерасчетом всей ступени. В случае достижения удовлетворительного значения погрешности результатов, уточненные параметры компрессора используются в повторном термогазодинамическом расчете ГТУ. Блок-схема описанного алгоритма расчета представлена на рис. 2.

По окончании расчета заключается вывод о возможности перехода к моделированию компрессора с применением CAE систем, для получения 3Д геометрии рабочего колеса ЦБК и проведения аэродинамических и прочностных расчетов.

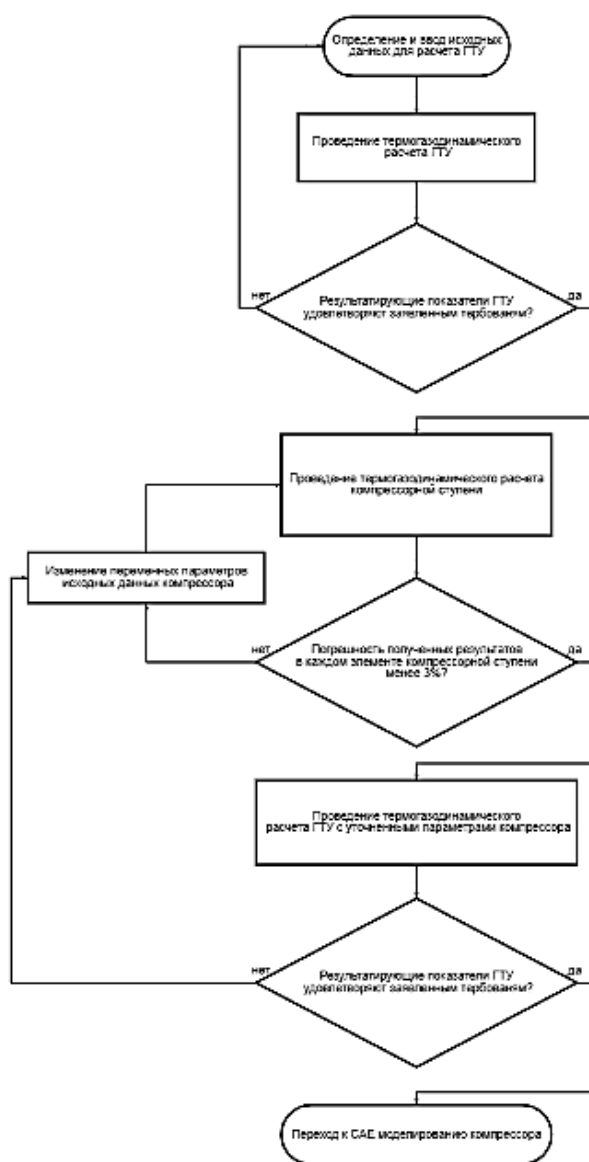


Рис. 2. Блок-схема расчета ЦБК

2. Оптимизация параметров термогазодинамического расчета ЦБК

По результатам первого термогазодинамического расчета ЦБК, погрешность вычисления степени повышения давления составила 5,58%, что превышает допустимый предел. Было принято решение оптимизировать рабочий процесс по переменным параметрам.

Оптимизация переменных значений исходных данных выполнялась в зависимости от КПД компрессорной ступени и ее степени повышения давления. Было выполнено 26 вариантов расчета, в каждом из которых, поочередно, один переменный параметр менялся.

По результатам оптимизации получены графические зависимости степени сжатия и КПД компрессора от переменных значений исходных данных (рис. 3-8). Был произведен расчет ЦБК с наиболее эффективными значениями переменных (табл.2), построена диаграмма распределения температуры, давления и абсолютной скорости по основным элементам компрессорной ступени (рис. 9).

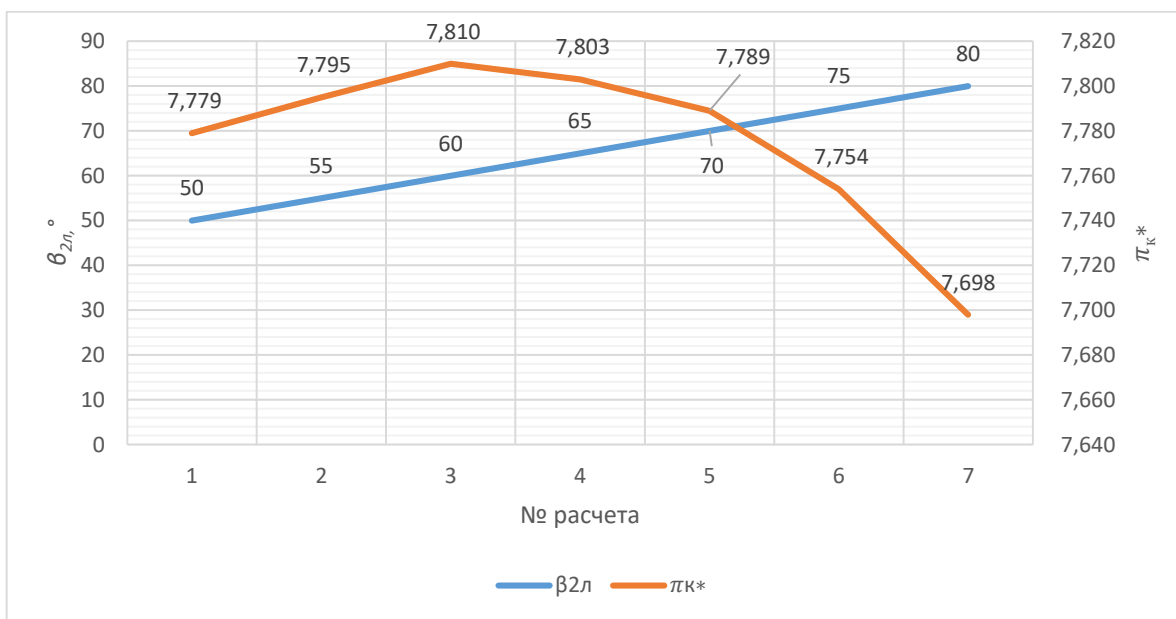


Рис. 3. Диаграмма зависимости $\pi_{к*}$ от $\beta_{2л}$

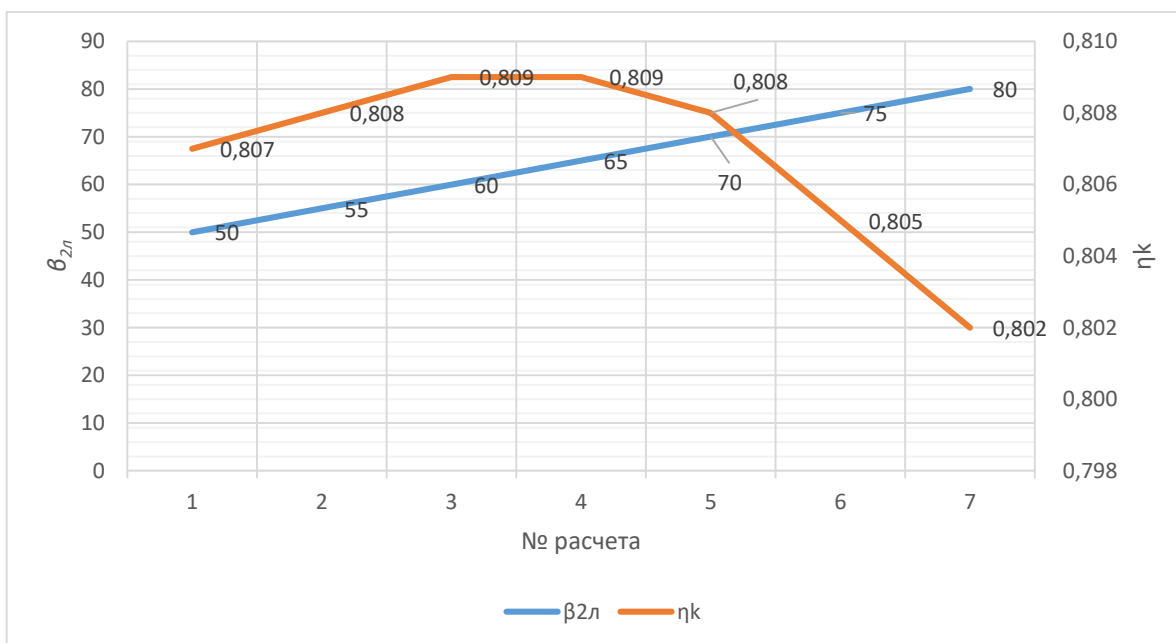


Рис. 4. Диаграмма зависимости $\eta_{к}$ от $\beta_{2л}$

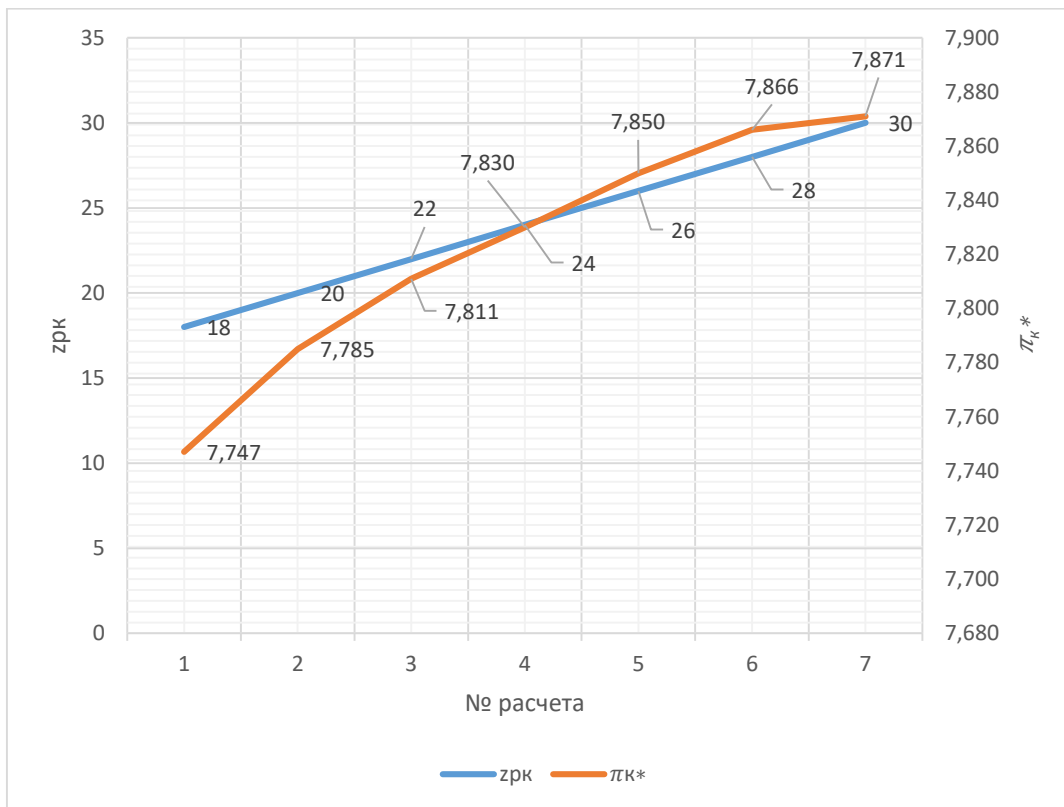


Рис. 5. Диаграмма зависимости π_k^* от $z_{рк}$

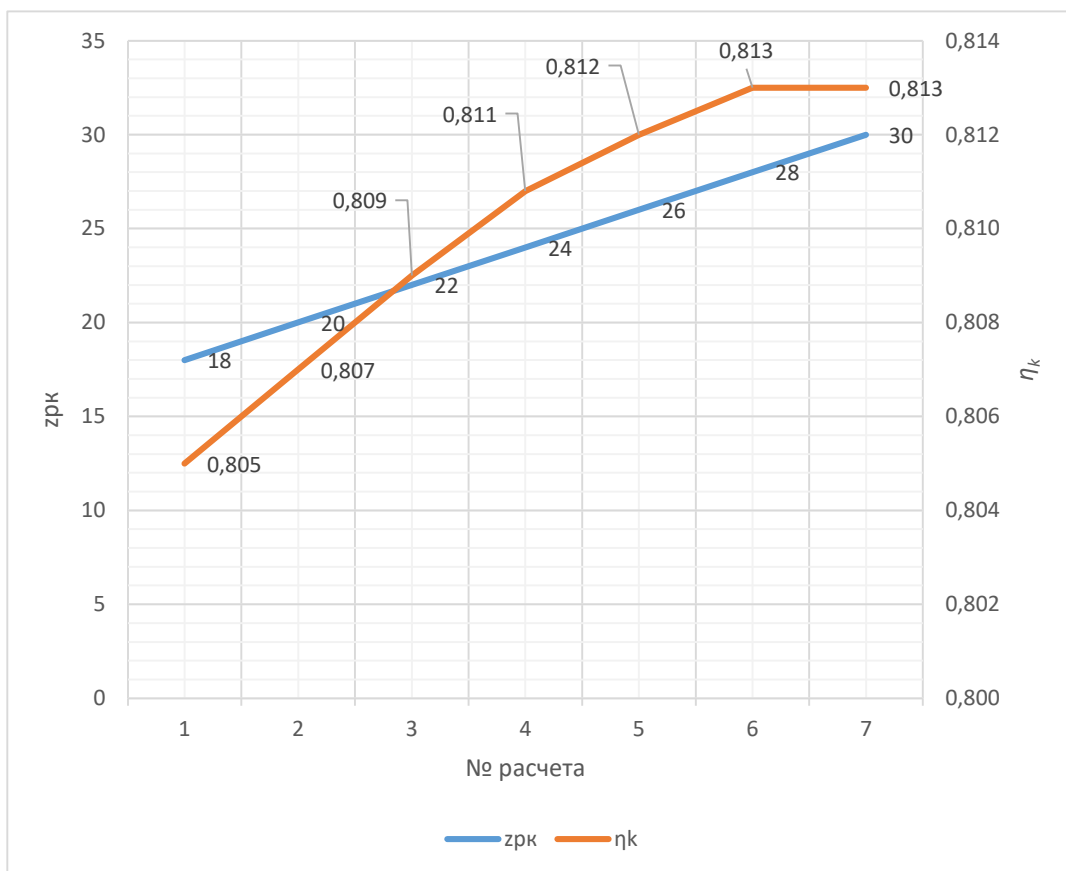


Рис. 6. Диаграмма зависимости η_k от $z_{рк}$

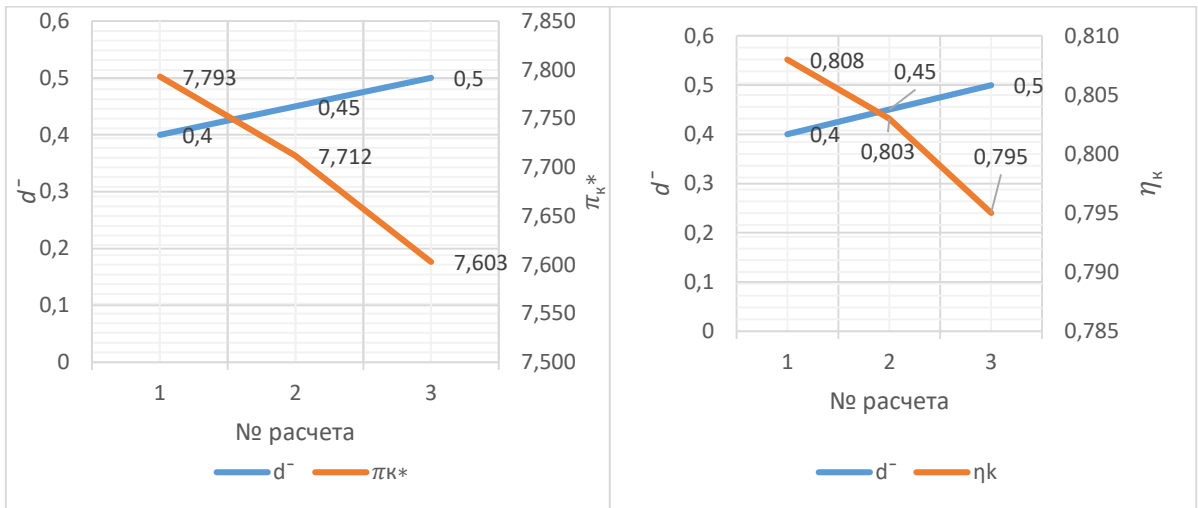


Рис. 7. Диаграммы зависимости π_k^* от d^- (слева) и η_k от d^- (справа)

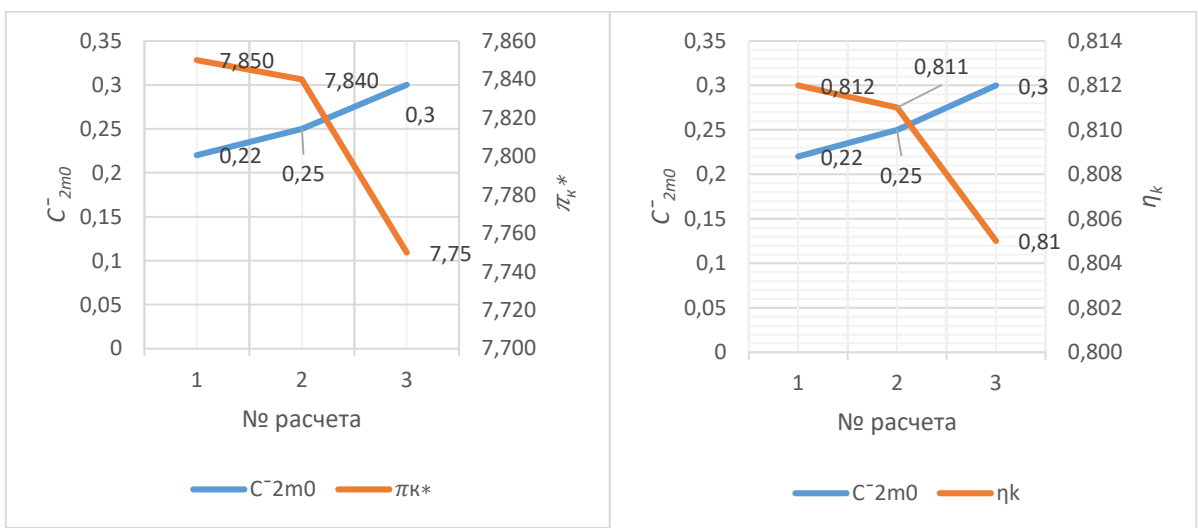
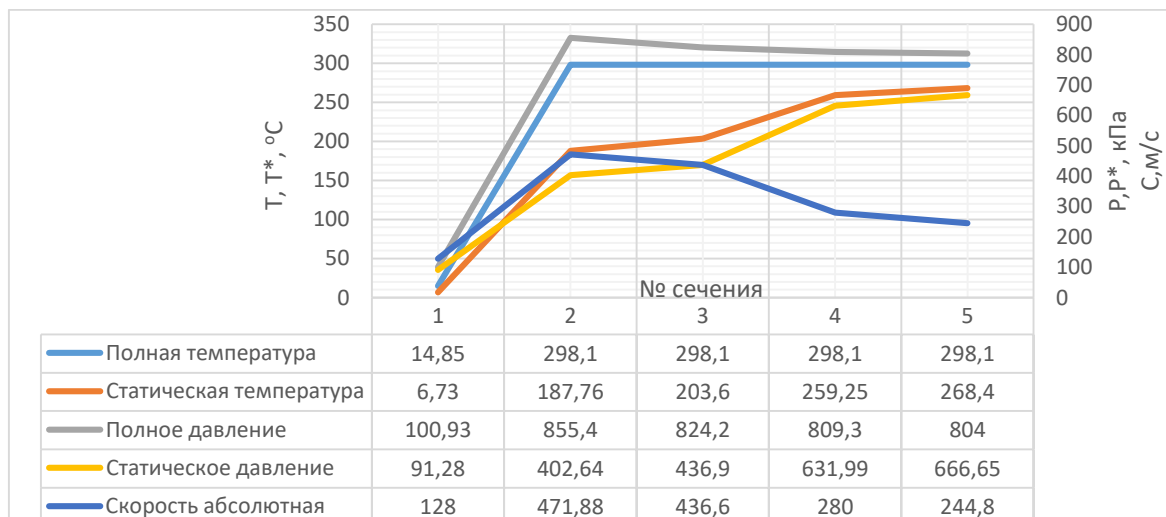


Рис. 8. Диаграммы зависимости π_k^* от C^-2m0 (слева) и η_k от C^-2m0 (справа)

Рис. 9. Диаграмма распределения абсолютной скорости, полных и статических параметров рабочего тела по сечениям основных узлов компрессора

Таблица 2

Результаты термогазодинамического расчета ЦБК



№ п/п	Наименование величины	Обозначение	Единица измерения	Значение
Неизменные исходные данные				
1.	Массовый расход входящего воздуха	G	кг/с	11
2.	Полное давление входящего воздуха	$P_{вк}$	МПа	0,1013
3.	Полная температура входящего воздуха	$T_{вк}$	°С	15
4.	Частота вращения	n	об/мин	21500
5.	Потребная степень сжатия компрессора	$\pi_{к*}$	-	8
6.	Ожидаемый КПД ступени компрессора	η_k	%	82
Переменные исходные данные				
7.	Конструктивный выходной угол лопатки	$\beta_{2л}$	°	62
8.	Число лопаток	$Z_{вк}$	шт.	26
9.	Относительный диаметр втулки на входе в РК	\bar{d}	-	0,35
10.	Относительный диаметр периферии	\bar{D}	-	0,65
11.	Обобщенный коэффициент расхода	C_{2m0}^-	-	0,24
Результаты расчета				
12.	КПД рабочего колеса	$\eta_{вк}^*$	%	86
13.	Обобщенный коэффициент производительности	Φ_0	-	0,08
14.	Коэффициент адиабатического напора	$H^{-*}ks$	-	0,68
15.	Мощность привода ступени	N'_k	МВт	3,14
16.	Степень повышения давления в ступени	$\pi_{к*}$	-	7,91
17.	КПД	η_k	-	0,82
18.	Погрешность степени сжатия компрессора	$\pi_{к*}^{\sim}$	%	1,18
19.	Погрешность КПД компрессора	η_k^{\sim}	%	1,94

Результаты показывают, что степень сжатия и КПД ЦБК имеют зависимость, зачастую линейную, от переменных исходных данных. Проанализировав ряд вариантов расчетов с различными значениями переменных, удается подобрать коэффициенты и конструктивные характеристики с требуемой точностью для получения наилучших результатов расчета.

Заключение

На примере термогазодинамического расчета центробежной компрессорной ступени ГТУ КГТ-2.0 была рассмотрена схема расчета методами последовательных приближений, а также предложен вариант оптимизации рабочего процесса и конструктивных характеристик. Получен результат в виде оптимизированного расчета ЦБК, удовлетворяющего условиям предварительного расчета ГТУ, а также требуемой точности сходимости результатов. Полученные данные будут использованы в САЕ моделировании компрессора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проектирование центробежного компрессора с применением технологии оптимизации IOSO: электрон.учеб. пособие / О. В. Батурин, Д. А. Колмакова, В. Н. Матвеев, Г. М. Попов; М-во образования и науки РФ, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). – Электрон.текстовые и граф. дан. (2,4- Мбайт). - Самара, 2013. – 1 эл. опт.диск (CD-ROM).
2. «Расчет и проектирование центробежного компрессора»: методическое указание; Бекнев В.С., Куфтов А.Ф., Тумашев Р.З.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана 1996
3. Селезнев К.П., Галеркин Ю.Б., Подобуев Ю.С., Анисимов С.А. и др. Теория и расчет турбокомпрессоров. Л.: Машиностроение, 1986. 392 с.
4. Дмитриева И.Б., Матвеев ВЛ., Окорочкова В.М. Проектный расчет центробежного компрессора агрегата наддува ДВС: Учеб, пособие / Самар, гос. аэрокосм. ун-т. Самара, 2004. 60 с.

5. Шестаков, Д.С. Газодинамический расчет турбокомпрессора для наддува двигателя внутреннего сгорания: учебно-методическое пособие / Д.С. Шестаков, Д.М. Солнцев; М-во науки и высш. образов. РФ. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2021.– 76 с.

6. Ржавин Ю. А. Осевые и центробежные компрессоры двигателей летательных аппаратов. Теория, конструкция и расчет: Учебник. – М.: Изд-во МАИ, 1995. – 344 с.: ил.

OPTIMIZATION OF WORKING PROCESS PARAMETERS AND DESIGN CHARACTERISTICS OF CENTRIFUGAL COMPRESSOR STAGE GTU KGT-2.0

¹Nesmachnykh Nikita Andreevich, student

²Yurkov Sergey Valerievich, Associate Professor
of the Department of Power Engineering

^{1,2}Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,
e-mail: ¹n.nesmachnykh@mail.ru; ²sergej.yurkov@klgtu.ru

The methodology of optimization of parameters of working process and design characteristics of GTU compressor is presented on the example of calculation of centrifugal stage KGT-2.0. In the calculation process more than 25 variants of combinations of variable initial data were analyzed, parameters were optimized to achieve the highest efficiency of the stage with the lowest calculation error. The result was obtained in the form of performed thermogas-dynamic calculation with convergence accuracy <2 % for compression ratio and efficiency.

АНАЛИЗ АВАРИИ ГЛАВНОГО ДВИГАТЕЛЯ МОРСКОГО БУКСИРА «АРТЕМИС ОФФШОР»

¹Толмачев Александр Викторович, канд. тех. наук, доцент кафедры энергетики

²Мартынова Ирина Борисовна, канд. техн. наук,
доцент кафедры теории механизмов и машин и деталей машин

^{1,2}ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,
Калининград, Россия, e-mail: ¹avtol03071952@mail.ru, ²i_martynova@mail.ru

Анализ выполнен по фрагментам деталей двигателя после аварии. Установлено, что авария главного двигателя марки YANMAR модели 8EY26W (8ЧН26/38,5) произошла вследствие выбора теплового зазора поршневого кольца при его естественном нагреве. Заклинивание поршневого кольца привело к лавинообразному разрушению деталей двигателя.

На многофункциональном судне снабжения «Артемис Оффшор» установлены два главных двигателя марки YANMAR модели 8EY26W (8ЧН26/38,5) (рис. 1,2,3). После эксплуатации 10000 час. двигатели прошли плановый текущий ремонт на судоремонтном заводе ООО «СРЗ Преголь». Завершающей процедурой ремонта является обкатка двигателей. В период обкатки без нагрузки двигатель отработал без замечаний в течение 8 часов. При нагружении двигателя примерно на 70% номинальной нагрузки через 50 мин произошло внезапное разрушение двигателя. По мнению вахтенного механика время разрушения составило 5 – 8 с. В период предшествующий аварии никаких отклонений от нормальной эксплуатации штатные приборы контроля и механики не зафиксировали. При осмотре места аварии установлено, что разрушение произошло в 5 цилиндре. Зафиксированы видимые повреждения: обрыв поршня, обрыв цилиндрической втулки, загиб стержня шатуна, замятие поршневого пальца, обрыв шатунных болтов, раскрытие нижней (мотылевой) головки шатуна, деформация вкладышей, обрыв болтов противовеса и поломка противовеса, следы ударов по поверхности коленчатого вала, вынос лючка картера и разрушение окна. Все видимые разрушения представлены на фотографиях рис. 4 - 21.

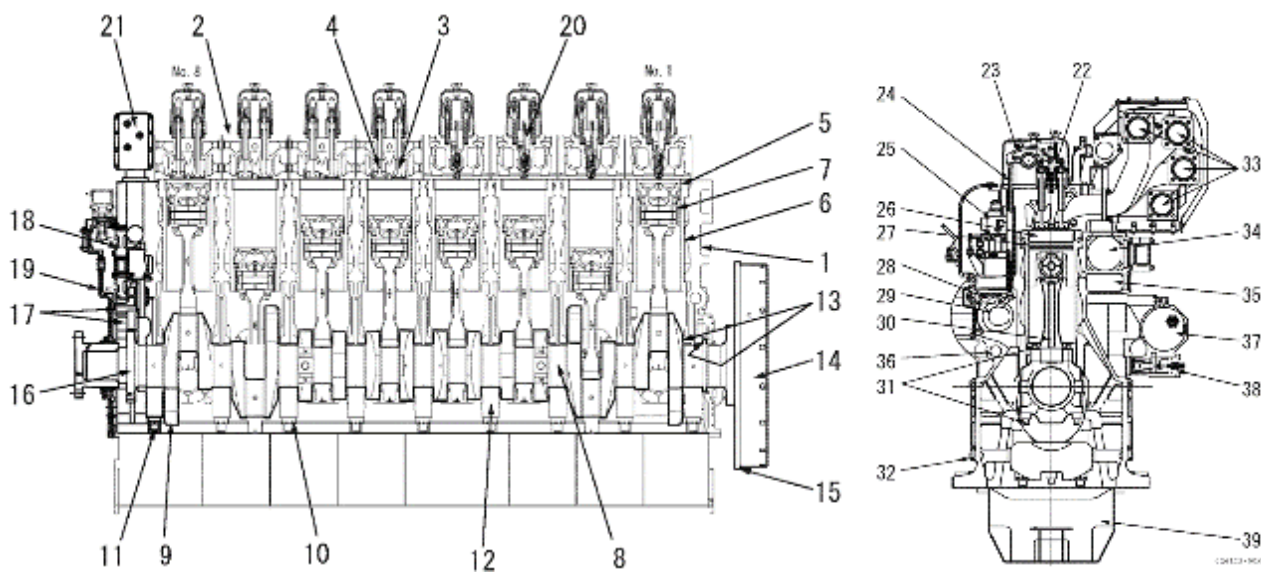


Рис. 1, 2. Продольный и поперечный разрез двигателя (из Руководства по эксплуатации)

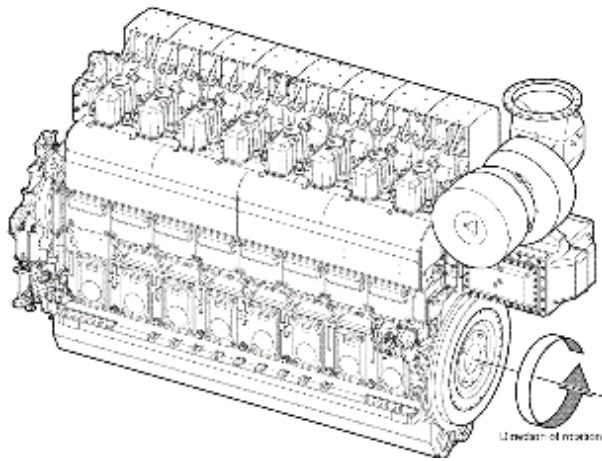


Рис. 3. Изометрия внешнего вида двигателя (из Руководства по эксплуатации)



Фото. 4. Двигатель в МО судна



Фото 5. Разрушение тронка поршня



Фото 6. Отрыв головки поршня по канавке маслосъёмного кольца



Фото. 7. Деформация стержня шатуна



Фото 8. Следы ударов по боковой поверхности стержня, вызвавшие искривление стержня шатуна



Фото. 9. Следы ударов на верхней головке и поршневом пальце



Фото 10. Пятка нижней головки



Фото 11. Шатунные болты (верхние)



Фото 12. Разрыв болтов без видимых следов усталости металла



Фото 13. Нижняя головка шатуна



Фото 14. На поверхности зубчатого разъёма нет следов наклёпа.



Фото 15. Разрыв шпильки с образованием галтели от растягивающего усилия.



Фото 16. Разрушение противовеса по оси шпильки от боковых ударов



Фото 17,18. Вкладыши нижнего подшипника со следами деформации.



На рабочей поверхности нет видимых следов термического воздействия (трения)



Фото 19. Посадочное гнездо втулки цилиндра. На нижнем центровочном поясе имеется сквозное отверстие от точечного удара и трещина.



Фото 20. Разрыв втулки цилиндра



Фото 21. Следы ударов разрушенных деталей о коленчатый вал.



Фото 22. Повреждение картера в районе вырванных лючков.

На заводе с двигателем проведен плановый ремонт после 10000 часов наработки. Одной из операций при ремонте стала замена поршневых колец. При проведении обкатки двигателя примерно через 50 минут после запуска произошла авария. На основании внешнего вида разрушенных деталей и подтверждения машинной команды – авария имела взрывной характер. Разрушение произошло в течение 5 – 10 секунд, двигатель остановился, при этом штатные приборы не зафиксировали каких-либо отклонений от нормы. Частота вращения соответствовала номинальному значению.

Внешний вид разрушенных деталей свидетельствует об отсутствии чрезмерного термического воздействия (нет деталей, окрашенных в цвета «побежалости», нет следов лакообразования), что свидетельствует об исправности маслоснабжения и охлаждения. Места разрывов крепёжных деталей не имеют характерных признаков усталостного разрушения. Следовательно, какие-либо трещины и эксплуатационные дефекты в деталях отсутствовали.

При внимательном рассмотрении поршня (фото 5, 6) видно, что разрыв произошел по канавке маслосъёмного кольца. Так как на поршень действуют сжимающие силы давления газов и силы инерции (сжимающие и растягивающие), которые при нормальной работе двигателя не могут привести к его разрыву, то причину следует искать в появлении внезапной заклинивающей силы. На фото 22 увеличен фрагмент замка компрессионного кольца, при этом видно, что поверхность кольца в районе замка имеет сколы. При температуре окружающей среды тепловой зазор, измеренный на фотографии, составляет 1,0 мм с учетом масштаба фотографии (по высоте кольца) реальный зазор равен 0,33 мм. В руководстве по эксплуатации каких-либо сведений о величине требуемого минимального зазора в замке не приводится.



Фото 23. Верхнее поршневое кольцо со сколами в районе замка. Цилиндрическая поверхность головки поршня не имеет следов деформации (натиров, задиров).

При работе двигателя, вследствие теплового нагрева, произошло удлинение кольца. При плавном выборе теплового зазора никаких проявлений не возникало и двигатель работал без признаков прихватывания поршневого поршня. Как только тепловой зазор был полностью выбран, произошло распирающее действие кольца во втулке цилиндра, усилие в замке вызвало сколы на цилиндрической поверхности в районе замка (фото 22). Повышение силы прижатия поршневого кольца усилило его трение, интенсивный нагрев и дальнейшее повышение расширения и силы трения. Овальная форма боковой поверхности кольца не вызвала образование срезов и задиров на зеркале втулки цилиндра.

На основании справочной технической литературы тепловой зазор в замке поршневого (компрессионного) кольца должен соответствовать значениям, представленным в таблице.

№	Зависимость	Величина	Источник
1	$\Delta = (0,0015 \dots 0,0040) \times D$	$\Delta = (0,0015 \dots 0,0040) \times 260 = 0,39 \dots 1,04 \text{ мм}$	[1], с.163
2	Монтажный зазор в замке кольца $\Delta = \Delta' + \pi \times D \times \alpha_k \times \Delta t_k - \alpha_{ц} \times \Delta t_{ц}$, где $\Delta' = (0,005 \div 0,001) \times \Delta$ – зазор в замке в горячем состоянии; $D = 260 \text{ мм}$ – диаметр цилиндра; $\alpha_k, \alpha_{ц}$ – коэффициенты линейного расширения кольца и втулки цилиндра; $\Delta t_k, \Delta t_{ц}$ – температуры, до которой нагреваются кольцо и втулка цилиндра.	$\Delta = 0,001 \times 260 + \pi \times 260 \times (240 - 90) \times 11 \times 10^{-6} = 1,61 \text{ мм}$ $D = 260 \text{ мм}, \alpha_k = \alpha_{ц} = 11 \times 10^{-6};$ $\Delta t_k = 260 - 20 = 240;$ $\Delta t_{ц} = 110 - 20 = 90$	[2], с.14
3	$\Delta = 0,005 \times D$	$\Delta = 0,005 \times 260 = 1,3 \text{ мм}$	[3], с.299
4	$\Delta = (0,003 \dots 0,005) \times D$	$\Delta = (0,003 \dots 0,005) \times 260 = 0,78 \dots 1,3 \text{ мм}$	[4], с.241
5	Тепловой зазор поршневого кольца $\Delta = \pi \times D \times \alpha_k \times t_k$	$\Delta = \pi \times 260 \times 11 \times 10^{-6} \times 150 = 1,8 \text{ мм}$	[5], с.281
6	$\Delta = \Delta' + \pi \times D \times \alpha_k \times \Delta t_k - \alpha_{ц} \times \Delta t_{ц}$, где $\Delta' = (0,005 \div 0,001) \times D$ – зазор в замке в горячем состоянии;	$\Delta = 0,001 \times 260 + \pi \times 260 \times (240 - 90) \times 11 \times 10^{-6} = 1,61 \text{ мм}$	[6], с.56

Общее мнение специалистов: среднее значение теплового зазора в замке компрессионного кольца для данного двигателя должно составлять: 1,0 ... 1,3 мм.

Заклинивание поршневого кольца привело к лавинообразному развитию аварии:

- разрыв поршня по компрессионному кольцу (фото 5, 6), вытяжка шатунных болтов (фото 11, 12);

- перекокс тронковой части, заклинивание остатков поршня во втулке и разрыв втулки (фото 20)

- оборванные фрагменты втулки и поршня расклепали верхний разрыв втулки и пробили посадочные гнезда втулки в картере (фото 19, 20), окончательно вытянули и оборвали шатунные болты (фото 13, 14).

- Болтающимися фрагментами поршня и втулки выбило картерные лючки (фото 22). От боковых ударов согнулся шток шатуна (фото 7, 8). Раскрылся мотылевый подшипник (фото 13,14). Вкладыши изогнуло в бесформенное изделие (фото 17, 18).

- Упавшие обломки поршня, втулки и шатуна оборвали и разломали противовес коленчатого вала (фото 15, 16).

Заключение:

На основании результатов осмотра и анализа литературы можно сделать заключение о том, что авария главного двигателя марки YANMAR модели 8EY26W (8CH26/38,5) на МФСС «Артемис Оффшор» произошла вследствие недостаточного теплового зазора верхнего компрессионного кольца.

Рекомендации: на основании анализа аварии рекомендовано провести измерение тепловых зазоров замков всех поршневых колец аварийного двигателя. Измерить тепловые зазоры замков поршневых колец цилиндров двигателя, находящегося в эксплуатации (второго главного двигателя), до замены поршневых колец. Проверить деформацию коленчатого вала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ДВС Конструирование и расчет на прочность поршневых и комбинированных двигателей. Под ред. А.С. Орлина и М.Г. Круглова. М. Машиностроение 1984 г. 384 с.

2. Н.Т. Ванькаев. Методические указания: Двигатели автотракторной техники. Расчёт прочности деталей ДВС. Санкт-Петербург, 2012 г. (электронный ресурс)

3. Дизели: Справочник под ред. Ваншейдта В.А. Л. «Красный печатник» 1964 г. 599 с.

4. Дизели: Справочник под ред. Ваншейдта В.А. Л. «Машиностроение» 1977 г. 479 с.

5. Н.В. Петровский. Судовые ДВС. М. Морской транспорт. 436 с.

6. Артамонов М.Д., Морин М.М., Скворцов Г.А. Основы теории и конструирования автотракторных двигателей. М. Высшая школа. 1978 г. 132 с.

7. Руководство по эксплуатации дизельного двигателя YANMAR модели 8EY26W (на английском языке).

MAIN ENGINE ACCIDENT ANALYSIS SEA TUG "ARTEMIS OFFSHORE"

¹Tolmachov Alexander Viktorovich, Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of the Department of "Energy"

²Martynova Irina Borisovna, Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of the Department of "Theory of mechanisms and machines and machine parts"

^{1,2}Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,
e-mail: ¹avtol03071952@mail.ru; ²i_martynova@mail.ru

The analysis was performed using fragments of engine parts after the accident. It was established that the accident of the main engine of the YANMAR brand model 8EY26W occurred due to the removal of the thermal gap of the piston ring during its natural heating. Jamming of the piston ring led to an avalanche-like destruction of engine parts.

К ВОПРОСУ О СРАВНИТЕЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЖАЛЮЗИЙНЫХ И СЕТЧАТЫХ СЕПАРАТОРОВ СУДОВЫХ И СТАЦИОНАРНЫХ ОПРЕСНИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

¹Филонов Александр Георгиевич, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры энергетики

²Щербаков Илья Игоревич, аспирант кафедры энергетики

^{1,2}ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет», Калининград, Россия, e-mail: ¹ sudfac@yandex.ru; ² konnor19992013@gmail.com

Установлено, что эффективность сетчатых сепараторов пара оценивается влажностью пара после сепаратора и критической скоростью пара в сепараторе. Показано, что влажность пара после сетчатого сепаратора может быть ниже, чем после жалюзийного сепаратора, эффективность сетки зависит от приведенной скорости пара, скорости пара в сетке, давления пара, количества слоёв сетки. Поставлены задачи проведения дальнейших исследований эффективности сетчатых сепараторов судовых и стационарных опреснителей.

Сетчатые сепараторы (демистеры) нашли широкое применение за рубежом в нефтехимической промышленности, судовых и стационарных дистилляционных опреснительных установках [1-6]. В то же время в камерах испарения отечественных опреснителей для очистки вторичного пара устанавливаются исключительно жалюзийные сепараторы.

Качество очистки вторичного пара в сепараторе судового опреснителя влияет на солесодержание дистиллята, поэтому задача сравнения эффективности сетчатых и жалюзийных сепараторов является актуальной.

Эффективность сетчатого сепаратора на практике обычно производится по тем же показателям, что и для жалюзийного сепаратора: по величине влажности пара после сепаратора ω_2 и критической скорости пара в сепараторе $W_{кр}''$.

Проведённый анализ литературных источников показывает, что на ω_2 , $W_{кр}''$ влияет большое количество режимных и конструктивных параметров, что, затрудняет математическое моделирование улавливания капель в демистерах.

Большинство исследований сеток проводились за рубежом на атмосферных воздушно-водяных стендах, и их результаты не могут быть перенесены на современные вакуумные дистилляционные опреснители [2 -6].

Основные результаты исследований эффективности сетчатых сепараторов отечественными авторами приводятся в публикации [1]. Большая часть исследований вертикальных и горизонтальных демистеров при $P = 0,101$ МПа проводилась на воздушно-водяных стендах ЦКТИ при влажности воздуха (3 ÷ 20) %. Критическая скорость воздуха в сетках оказалась несколько ниже, чем в жалюзийных сепараторах.

В опытах ЦКТИ было также установлено, что влажность воздуха после исследуемых сетчатых сепараторов оказалась практически такой же, как после жалюзийных сепараторов.

В работах КГТУ на пароводяных стендах исследовались вертикальные сетчатые сепараторы сечением 100x100 мм, которые изготавливались из сетки, применяемой на зарубежных судовых опреснителях (рис. 1) [1].

Размер ячейки сетки составлял 5x5 мм, высота гофра – 4 мм, шаг гофра – 9 мм, диаметр проволоки – 0,22 мм. Количество слоёв сетки в опытах при $P = 0,101$ МПа и 0,0199 МПа составляло $n_c = 35$ (плотность сетки - 135 кг/м³). Толщина пакета сетки - 100 мм. Слои вертикальной сетки укладывались «бутербродом». Приведенная к зеркалу испарения скорость пара W_0 была постоянная, а скорость в сепараторе W_c менялась за счет изменения проходного сечения. Методика проведения исследований подробно изложена в [1].

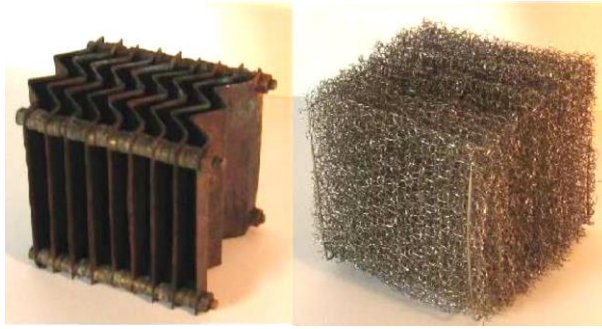


Рис.1. Исследуемые вертикальный жалюзийный и вертикальный сетчатый сепараторы

На рис. 2, 3. представлены результаты экспериментальных исследований зависимости влажности пара после вертикальных сепараторов от скорости W_C , полученные на солёной воде при давлениях $P = 0,101$ МПа и $0,0199$ МПа и постоянной приведенной скорости пара в испарителе $= 0,33$ м/с и $1,6$ м/с соответственно [1]. Там же приводятся значения влажности пара после вертикального жалюзийного сепаратора представленного на рис. 1

Значения влажности пара после вертикального сетчатого сепаратора в экспериментах при $P = 0,101$ МПа и $0,0199$ МПа оказались в (2-3) раза ниже, чем после вертикального жалюзийного сепаратора.

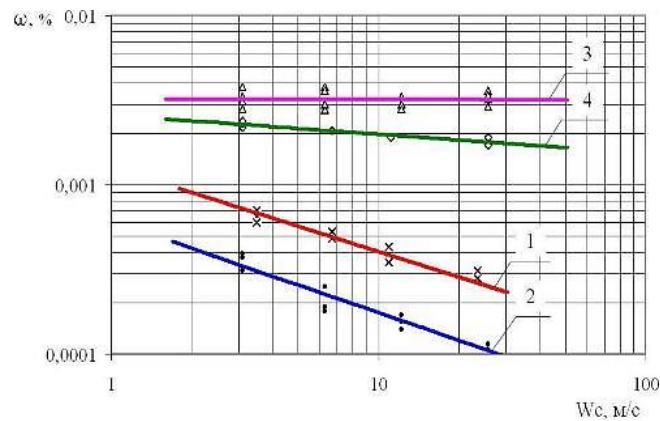


Рис. 2. Результаты исследований сепараторов при $P = 0,101$ МПа, $W_O = 0,33$ м/с: 1-вертикальный жалюзийный сепаратор, 2-вертикальная сетка, 3 – влажность пара на входе в сепаратор, 4 - влажность пара на входе в поворот

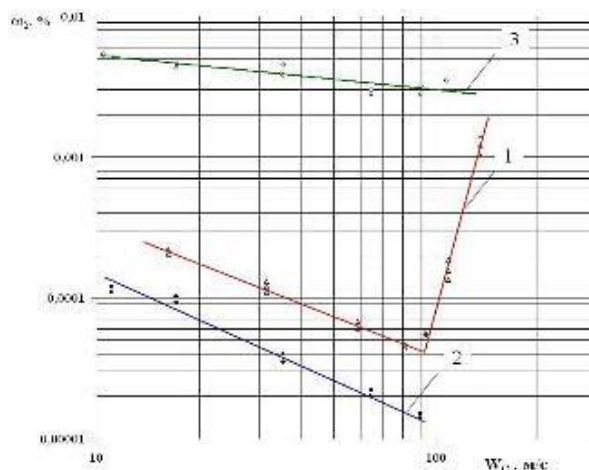


Рис. 3. Результаты исследований сепараторов при $P = 0,0199$ МПа, $W_O = 1,6$ м/с: 1- вертикальный жалюзийный сепаратор, 2-вертикальная сетка, 3 – влажность пара на входе в сепаратор

На рис. 4 приведены значения влажности пара после сепараторов, полученные при постоянной высоте парового объёма в зависимости от солесодержания концентрата в испарителе S_p при $P = 0,101$ МПа, $W_O = 0,33$ м/с, $W_C = 3,1$ м/с.

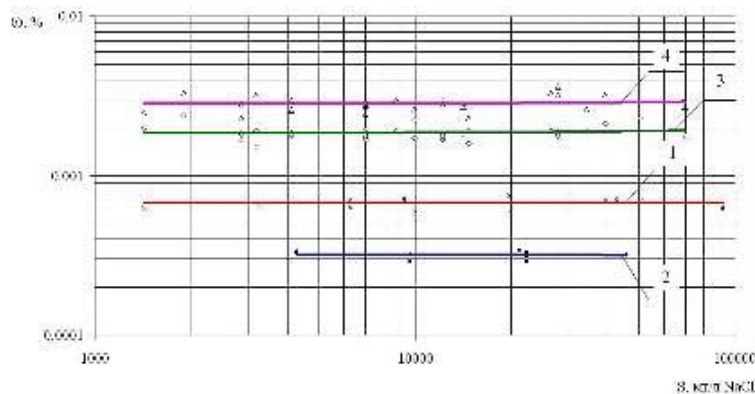


Рис. 4. Влажность пара после вертикальных сепараторов

При разном солесодержании концентрата в испарителе при $P = 0,101$ МПа, $W_o = 0,33$ м/с, $W_c = 3,1$ м/с:
 1-жалюзийный сепаратор, 2-сетка, 3 – влажность пара перед сепаратором,
 4 - влажность пара на входе в поворот

Во всем исследуемом диапазоне S_p , эффективность очистки пара сетчатым сепаратором была выше эффективности жалюзийного примерно в 2,5 раза.

Рис. 5 иллюстрирует экспериментальные данные о зависимости влажности пара после сепаратора от общего количества рядов сетки. Как видно из рисунка, с увеличением количества рядов сетки влажность после сетки ω_2 непрерывно снижалась.

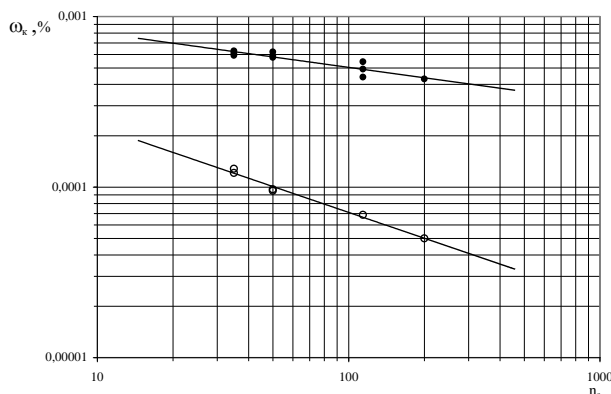


Рис.5. Влажность пара после вертикального сетчатого сепаратора в зависимости от количества рядов сетки
 Внизу: $P = 0,0199$ МПа, $W_o'' = 1,6$ м/с, $W_c'' = 9,0$ м/с, Вверху: $P = 0,101$ МПа, $W_o'' = 0,16$ м/с, $W_c'' = 1,5$ м/с;

Влажность пара после сетчатых сепараторов может быть выражена зависимостями [1]:

1. При $P < 0,1$ МПа, для $W_o'' > 1,0$ м/с:

$$\omega_2 = 0,247 \cdot (W_o'')^{-0,68} \cdot (W_c'')^{-1,0} \cdot \left(\frac{\rho''}{\rho' - \rho''} \right)^{0,35} \cdot (n_c)^{-0,503}, \quad \% \quad (1)$$

2. При $P \geq 0,1$ МПа, для $W_o'' < 0,5$ м/с :

$$\omega_2 = 6,63 \cdot 10^{-3} \cdot (W_o'')^{-0,34} \cdot (W_c'')^{-0,5} \cdot \left(\frac{\rho''}{\rho' - \rho''} \right)^{0,22} \cdot (n_c)^{-0,265}, \quad \% \quad (2)$$

Формулы (1) и (2) могут применяться для расчета ω_2 при скорости пара в сепараторе $W_c'' < W_{кр}''$.

Выводы

В большинстве опубликованных отечественных и зарубежных работ эффективность сетчатых сепараторов, оценивается на основании результатов проведения экспериментальных исследований на среде воздух-вода, или компьютерного моделирования.

Исследования эффективности вертикальных сетчатых сепараторов устанавливаемых на судовых опреснителях проводились только при $W_o'' = 1,6$ м/с, $P = 0,02$ МПа и $W_o'' = 0,16-0,32$ м/с, $P = 0,1$ МПа [1]. Формулы (1) и (2), полученные в этих исследованиях, нуждаются в уточнении для практического применения их в широком диапазоне давлений и нагрузок парового объёма, характерных для судовых и стационарных опреснителей. Влияние числа рядов сетки на её эффективность исследовалось только для вертикального сетчатого сепаратора. Отсутствуют зависимости для определения $W_{кр}''$ в сетчатых сепараторах судовых опреснителей при $P < 0,1$ МПа.

В этой связи, поставлены следующие задачи проведения дальнейших исследований эффективности сетчатых сепараторов:

1. Исследовать эффективность горизонтальных и вертикальных сетчатых сепараторов судовых и стационарных опреснителей при $P < 0,1$ МПа и скорости пара в камере испарения $W_o'' > 1,5$ м/с. Установить зависимости для определения $W_{кр}''$ и ω_2 для этих условий.

3. Исследовать эффективность горизонтальных сетчатых сепараторов с различными конструктивными характеристиками при $P < 0,1$ МПа.

4. Произвести сравнение эффективности сетчатых и жалюзийных сепараторов разной конструкции и дать рекомендации по их использованию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.

2. H. T. El-Dessouky, I. M. Alatiqi, H. M. Ettouney, N. S. Al-Deffeeri, Performance of wire mesh mist eliminator // Chem. Eng. Process. - 2000. - v. 39.- №. 2, Pp. 129–139.

3. F. Obeid, I. Janajreh, Chaouki Ghenai, Numerical Modeling of Demister in Multi Stage Flash (MSF) Desalination // 10th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics Proceedings, Florida.- 2014. - Pp. 1338-336.

4. M. Khamis Mansour, Hassan E. S. Fath, O. El-Samni, Computational Fluid Dynamics Study of MSF Flash Chambers Su-Components; i-Vapor Flow through Demister // The 15th International Water Technology Conference: Alexandria. – 2011. - Pp. 378-398.

5. I. Janajreh, A. Hasania, H. Fath, Numerical simulation of vapor flow and pressure drop across the demister of MSF desalination plant // Energy Conversion and Management. – 2013.- vol. 65, pp. 793–800.

6. H. Al-fulajj, A. Cipollina, G. Micale, D. Bogle, CFD Modelling of the Demister in the Multi Stage Flash Desalination plant // Elsevier B.V.- 2011. - v. 29.- Pp. 1618–1622.

ABOUT COMPARATIVE EFFICIENCY OF LOUVER AND MESH SEPARATORS OF MARINE AND STATIONARY DESALINATION PLANTS

¹Alexandr Georgievich Filonov, PhD, associate professor of Energy Department

²Shcherbakov Ilya Igorevich, post-graduate student of Energy Department

^{1,2}Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,
e-mail: ¹ sudfac@yandex.ru; ² konnor19992013@gmail.com

Based on analysis of domestic and foreign studies it was established that demisters efficiency is estimated by steam humidity after demister and steam critical speed in the demister. It is shown that the steam humidity after demister can be lower than after louver separator, demister efficiency depends on the steam speed in evaporation chamber, steam speed in the demister, steam pressure, number of mesh layers. The tasks of conducting further studies of mesh separators efficiency of marine and stationary desalination plants are set.

ОСОБЕННОСТИ СРЕДНЕИНТЕГРАЛЬНЫХ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУР ЦИКЛА ОТТО

¹Шевченко Сергей Николаевич, канд. техн. наук, доцент,
доцент кафедры судовых энергетических установок

²Томилко Владимир Тимофеевич, ст. преподаватель
кафедры судовых энергетических установок

^{1,2}Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ»,
Калининград, Россия, e-mail: ¹sergey.shevchenko.56@mail.ru

Представлены результаты анализа среднеинтегральных термодинамических температур процессов происходящих в теоретическом цикле Отто. Показано, что при расчете термического КПД цикла с использованием среднеинтегральных термодинамических температур, вид формулы для КПД цикла Отто совпадает с аналитическим выражением для КПД цикла Карно, но смысл среднеинтегральных температур процессов изменяется.

Известно [1, с. 47-52; 2, с. 108-109], что термический КПД любого цикла определяется по формуле

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1}, \quad (1)$$

где q_1 количество тепла, подведенное к рабочему телу, q_2 – количество теплоты, отведенное от рабочего тела. Как правило, термический КПД любого цикла стремятся приводить через параметры цикла: степень сжатия, степень повышения давления, степень предварительного расширения, степень падения давления, степень сокращения объема. Величины q_1 и q_2 в формуле (1) рассчитываются через параметры цикла. Рассмотрим определение термического КПД через температуры цикла.

Термический КПД цикла Карно, который содержит две изотермы и две адиабаты (см. рис.1) в результате несложных преобразований может быть представлен в виде

$$\eta_t = \frac{T_2 - T_1}{T_2} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{T_4}{T_3} = 1 - \frac{T_1}{T_3}. \quad (2)$$

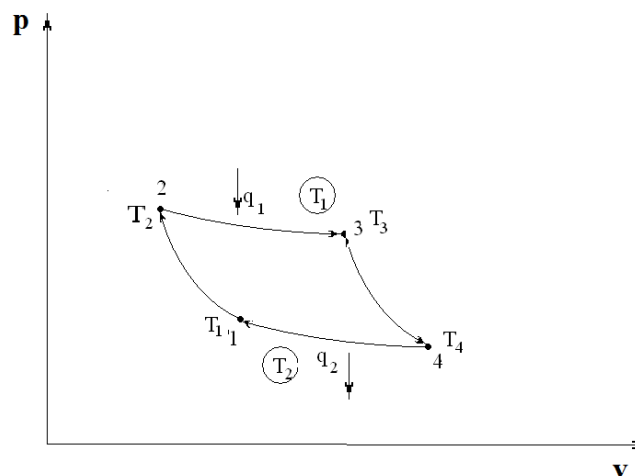


Рис.1. Цикл Карно

Причем $T_2 = T_3$ – температура нагревателя, $T_1 = T_4$ – температура холодильника. На рисунке начальная точка 1 цикла определена началом адиабатического сжатия. Таким образом, КПД цикла

определяется двумя температурами: высокой на изотерме 2 - 3 и низкой на изотерме 4 – 1. Часто они обозначаются как T_1 и T_2 [2].

С другой стороны можно утверждать, что термический КПД определяется отношением этих температур, т.е. величинами

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} = \frac{T_3}{T_1} = \frac{T_2}{T_4}$$

Для сравнения рассмотрим цикл Отто (см. рис.2) состоящий из двух адиабат и двух изохор.

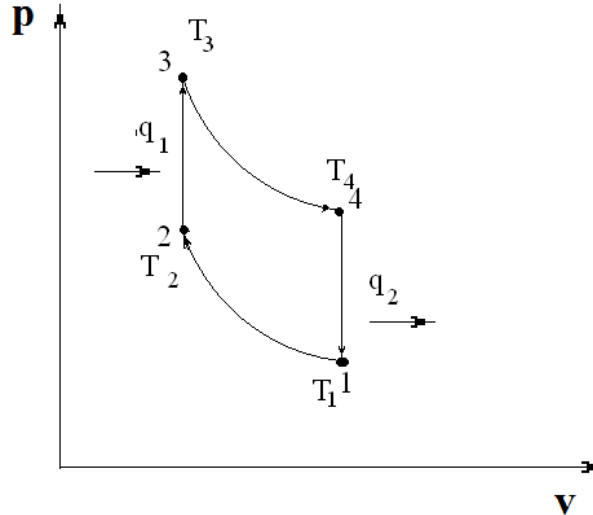


Рис.2. Цикл Отто.

За первую точку цикла принимаем, как и в предыдущем случае, точку начала адиабатического сжатия. В этом случае

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{c_v(T_4 - T_1)}{c_v(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_1} \frac{T_1}{T_2}$$

Сравнивая адиабаты 1-2 и 3-4 можно показать, что $\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2}$, и следовательно,

$$\eta_t = 1 - \frac{T_1}{T_2} = \frac{T_2 - T_1}{T_2} \tag{3}$$

Сопоставляя формулу (3) и (2) видим, что они идентичны в том плане, что в них используются температуры в начале и конце адиабатического расширения. Хотя форма записи эквивалентна и в точке 1 температура рабочего тела минимальна, но в точке 2 цикла Отто температура рабочего тела не является максимальной температурой цикла.

С другой стороны известно [3, с. 71-73; 4, с. 45-46], что термический КПД любого цикла (с адиабатическим сжатием и расширением газа) равен термическому КПД цикла Карно, взятому при соответствующих среднеинтегральных температурах. Термический КПД циклов зависит лишь от среднеинтегральных температур процессов подвода и отвода от газа теплоты.

$$\eta_t = 1 - \frac{T''_{cp}}{T'_{cp}}$$

В свою очередь среднеинтегральная температура газа в любом процессе равна отношению теплоты, сообщенной газу в процессе (или отнимаемой), к приращению (или уменьшению) его энтропии.

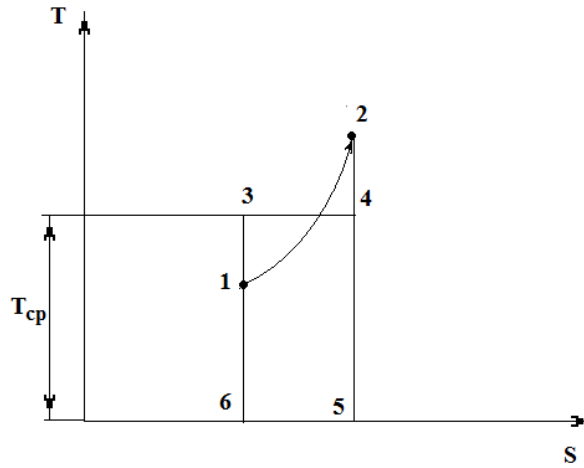


Рис.3. К определению среднеинтегральной температуры.

В Ts – диаграмме (см. рис.3.), среднеинтегральная температура изображается высотой прямоугольника 3-4-5-6-3 с площадью, равной площади фигуры

Если рассматривать политропический процесс 1-2, а в нашем случае все процессы можем рассматривать как политропические, так как действует допущение, что теплоемкость в процессах не изменяется, т.е. $c = \text{const}$, тогда

$$q = c(T_2 - T_1) = c_v \frac{n-k}{n-1} (T_2 - T_1)$$

и

$$\Delta S = \int_{T_1}^{T_2} c \frac{dT}{T} = c \ln \frac{T_2}{T_1} = c_v \frac{n-k}{n-1} \ln \frac{T_2}{T_1}$$

Следовательно,

$$T_{cp} = \frac{q}{\Delta S} = \frac{c_v \frac{n-k}{n-1} (T_2 - T_1)}{c_v \frac{n-k}{n-1} \ln \frac{T_2}{T_1}}$$

или

$$T_{cp} = \frac{(T_2 - T_1)}{\ln \frac{T_2}{T_1}} \quad (4)$$

Отсюда следует, что среднеинтегральные температуры газа в любом процессе зависят лишь от его начальной и конечной температур и что характер процесса на величину среднеинтегральной температуры не влияет. Процесс передачи тепла на изохоре цикла Отто идет по изохоре 2 – 3, следовательно, среднеинтегральная температура для изохорного процесса

$$T'_{cp} = \frac{(T_3 - T_2)}{\ln \frac{T_3}{T_2}}, \text{ а } T''_{cp} = \frac{(T_4 - T_1)}{\ln \frac{T_4}{T_1}}$$

Тогда

$$\eta_t = 1 - \frac{\frac{T_4 - T_1}{\ln \frac{T_4}{T_1}}}{\frac{T_3 - T_2}{\ln \frac{T_3}{T_2}}}$$

Так как для адиабат при одинаковом k :
$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{T_4}{T_1} \quad (5)$$

Тогда

$$\eta_t = 1 - \frac{\frac{T_4 - T_1}{\ln \frac{T_4}{T_1}}}{\frac{T_3 - T_2}{\ln \frac{T_4}{T_1}}} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}.$$

Выразим T_3 из (5)
$$T_3 = \frac{T_4 \cdot T_2}{T_1},$$

следовательно,
$$\eta_t = 1 - \frac{T_4 - T_1}{\frac{T_4 \cdot T_2}{T_1} - T_2} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{\frac{T_4 \cdot T_2 - T_2 \cdot T_1}{T_1}} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{\frac{T_2(T_4 - T_1)}{T_1}} = 1 - \frac{T_1}{T_2}. \quad (6)$$

Сравнивая (6) и (2) можно видеть, что формулы эквивалентны, т.е. что по форме записи термического КПД цикла Карно и цикла Отто, они равны. Различие заключается в том, что если в цикле Карно берутся наибольшие и наименьшие температуры в цикле, то в цикле Отто температура T_2 берется в конце адиабатного сжатия, а T_1 в начале адиабатного сжатия. В таком случае, отсюда следует на первый взгляд достаточно парадоксальный вывод о том, что среднеинтегральная термодинамическая температура изохорного нагревания (процесс от T_2 до T_3) и охлаждения (процесс от T_4 до T_1) определяется одной температурой T_2 и T_1 соответственно. Поэтому понятием среднеинтегральной термодинамической температуры следует пользоваться с достаточной осторожностью и вниманием, так как она не является среднеинтегральной температурой в математическом смысле.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

1. Техническая термодинамика: Учебник для вузов / Под ред. В.И.Крутова. - М.: Высш. школа, 1981. - 439 с.
2. Арнольд Л.В., Михайловский Г.А., Селиверстов В.М. Техническая термодинамика и теплопередача: Учебник для вузов. - М.: Высш. школа, 1979. - 446 с.
3. Мурзаков В.В. Основы технической термодинамики. - М.: «Энергия», 1973. - 304 с.
4. Селин В.В. Теплотехника на рыбообрабатывающих предприятиях и промысловых судах. - М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. - 264 с.

FEATURES OF MEAN INTEGRAL THERMODYNAMIC TEMPERATURES OF THE OTTO CYCLE

¹Shevchenko Sergey Nikolaevich, PhD in Engineering, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Marine Power Plants

¹Tomilko Vladimir Timofeevich, Senior Lecturer of the Department of Marine Power Plants

^{1,2}Baltic Fishing Fleet State Academy FSBEI HE "KSTU",
Kaliningrad, Russia, e-mail: sergey.shevchenko.56@mail.ru

The article presents the results of the analysis of the average integral thermodynamic temperatures of the processes occurring in the theoretical Otto cycle. It is shown that when calculating the thermal efficiency of the cycle using average integral thermodynamic temperatures, the form of the formula for the efficiency of the Otto cycle coincides with the analytical expression for the efficiency of the Carnot cycle, but the meaning of the average integral temperatures of the processes changes.

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ ДЛЯ РЕМОНТА МОДУЛЯ ТУРБИНЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ГТУ LM6000 ПРОИЗВОДСТВА "GENERAL ELECTRIC"

¹Юрков Сергей Валерьевич, доцент кафедры энергетики

²Пустошный Ярослав Сергеевич, студент

³Филиппова Валерия Михайловна, инженер-конструктор

^{1,2}ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,

Калининград, Россия, e-mail: ¹sergej.yurkov@klgtu.ru; ²skerdki@yandex.ru

³ООО «КТМЗ», Калининград, Россия, e-mail: ³yakubik99@yandex.ru

Рассматриваются вопросы технологии технического обслуживания и ремонта газотурбинных установок (ГТУ) зарубежного производства. Решена задача по проектированию оснастки для демонтажа модуля турбины высокого давления (ТВД) ГТУ LM6000. Представлены результаты проектирования оснастки, в том числе примеры прочностных расчетов ряда ответственных элементов, выполненные авторами в КБ ООО «БЭМ». Приведены примеры изготовленных компонентов на базе Калининградского турбомеханического завода. Описан практический результат применения оснастки в технологическом процессе ремонта.

Введение

В современном мире газотурбинные двигатели являются незаменимыми источниками энергии в различных отраслях промышленности, в частности в стационарной и транспортной энергетике. Однако, как и любая техника, газотурбинные двигатели требуют регулярного регламентного обслуживания и ремонта для поддержания эксплуатационной эффективности и надежности. Эти работы включают в себя замену изношенных деталей, регулировку и калибровку систем, а также проведение диагностики и устранение неисправностей.

За последние несколько лет ситуация в энергетическом секторе России претерпела значительные изменения, связанные с уходом иностранных компаний и оборудования с рынка и вступления в силу большого количества санкций, направленных в том числе и на энергетику страны. Это привело не только к дефициту современного технологического оборудования для технического обслуживания и ремонта, но и к утрате нормативных методик ремонта газотурбинного оборудования иностранного производства. На сегодняшний день значительное число газотурбинных установок (ГТУ), установленных на тепловых электрических станциях и промышленных объектах нефтегазовой отрасли, имеют иностранное происхождение, и, как следствие, их сервисное обслуживание затруднено в связи с отсутствием запасных частей, дефицитом технологической оснастки и недостаточно полной информационной базой по техническому обслуживанию и ремонту этих турбомашин.

Подобная ситуация ведет к необходимости активного применения современных методов повторного инжиниринга в сфере разработки высокотехнологичных инструментов, механизмов и приспособлений, включая технологическую документацию и сопутствующее оборудование для осуществления ремонтно-восстановительных работ.

Цели и задачи

Целью данного исследования является комплексное решение задачи информационно-инструментального обеспечения производственного процесса ремонта ГТУ LM6000 на базе имитационного моделирования процесса сборки и разборки ротора турбины высокого давления (ТВД) газовой турбины LM6000, включая рабочее проектирование и изготовление оснастки, необходимой для демонтажа ротора ТВД силами производственно-технического отдела ООО «БЭМ».

LM6000 – это двухвальная газовая турбина производства GE (рис. 1), разработанная на базе авиационного двигателя CF6-80C2 [1]. В процессе поузловой разборки ГТУ ключевой является задача демонтажа модуля ТВД от модуля компрессора высокого давления (КВД). Валы этих модулей удерживаются между собой в жестком зацеплении специфической внутренней втулочной контргайкой, затянутой на момент свыше 15 кН. Операция по разборке и последующей сборке этого соединения невозможна без применения специальной оснастки.

Задачей проектирования является создание комплекта проектно-конструкторской документации и технологической инструкции для оборудования, необходимого для производства и проведения требуемых работ.



Рис. 1 Газовая турбина LM6000 на объекте ООО «БЭМ»

Проектирование оснастки для демонтажа модуля ТВД.

В современных инжиниринговых технологиях ключевым этапом создания технически сложного объекта является этап разработки виртуальной модели объекта исследования. В данной работе это создание имитационной 3D модели сборки модуля ТВД и КВД с использованием САД систем, в частности КОМПАС-3D (рис. 2). Построение сборочного модели рассматриваемого узла ГТУ позволило, в рамках виртуального эксперимента по демонтажу определить оптимальный технологический процесс, не противоречащий требованиям регламента GE и воссоздать кинематическую схему передачи требуемых усилий между внешними исполнительными механизмами и внутренними элементами соединения валов роторов.

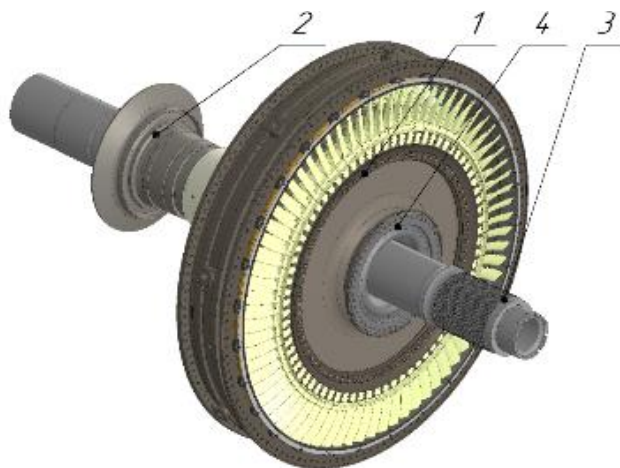


Рис. 2 Модель модуля ТВД и КВД.

– Модуль ТВД; 2 – Вал КВД; 3 – Вал низкого давления; 4 – Втулочная контргайка

Основной операцией начального этапа разборки модуля является съем контргайки 4 (нагнетательного патрубка), для чего был спроектирован динамометрический переходник, включающий трубу момента и стопорное устройство (рис. 3). Для приложения необходимого крутящего момента применялся, разработанный ранее для аналогичных операций по ротору турбины низкого давления, планетарный мультипликатор крутящего момента 3 [2].

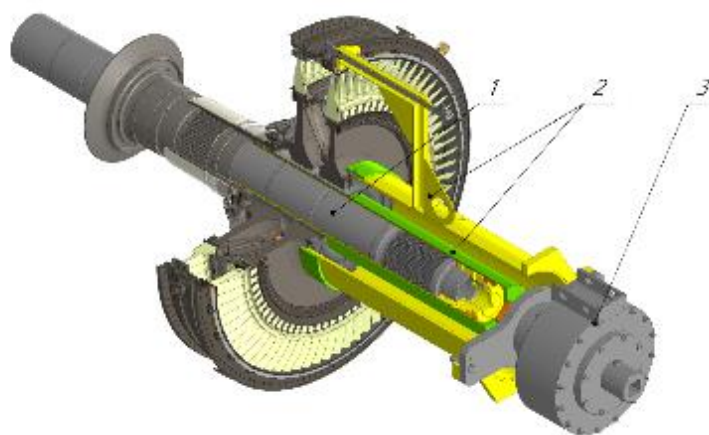


Рис. 3 Динамометрический переходник контргайки ротора ТВД.

1–Траверса; 2 –Динамометрический переходник, включающий трубу момента и стопорное устройство; 3–Мультипликатор крутящего момента [2].

В результате имитационного моделирования было установлено, что в процессе разборки необходимо передать крутящий момент на контргайку и при этом сохранять роторную часть ТВД в неподвижном состоянии. Выполнение данного условия потребовало разработки специального стопорного механизма в составе динамометрического переходника

Существенной проблемой при передаче крутящего момента во внутреннее пространство вала ротора ТВД оказалось необходимость применения тонкостенной заготовки для трубы момента. В связи с данным обстоятельством прочностным расчетам трубы момента придавалось особое значение. Для выполнения условий прочности проведено численное моделирование режимов нагружения соответствующих деталей на основе конечно-разностных моделей, реализуемых программным пакетом COMSOL Multiphysics (рис. 4).

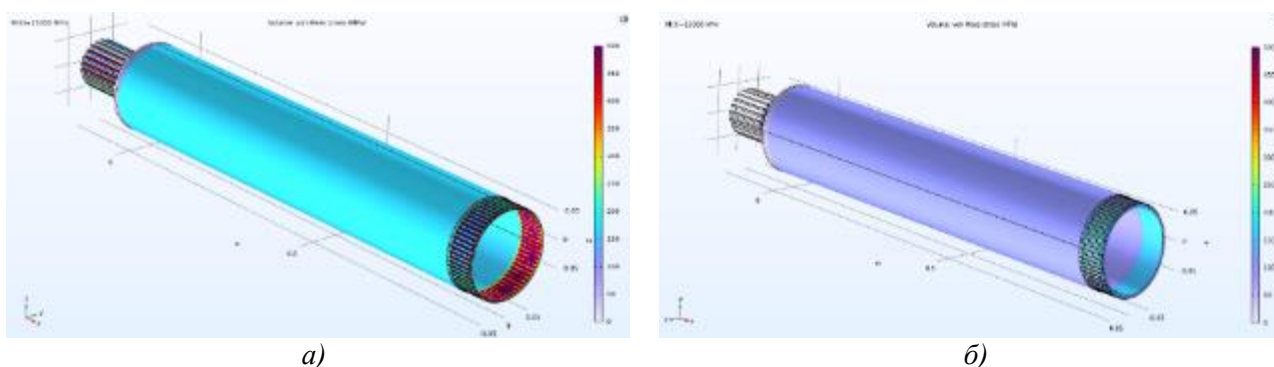


Рис. 4. Расчет на прочность трубы момента.
а). Тонкостенная труба; б). Труба с увеличенной толщиной стенки

Ключевым технологическим этапом разработки горячей части ГТУ является собственно демонтаж модуля ТВД. Для этой цели спроектировано специальное приспособление, получившее название «инструмент демонтажа модуля ТВД» (рис. 5). Функциональное назначение этого устройства - стянуть модуль ТВД со шлицевого соединения с ротором КВД. При демонтаже важно строго выдерживать все зазоры между элементами ротора, ротора и корпуса.

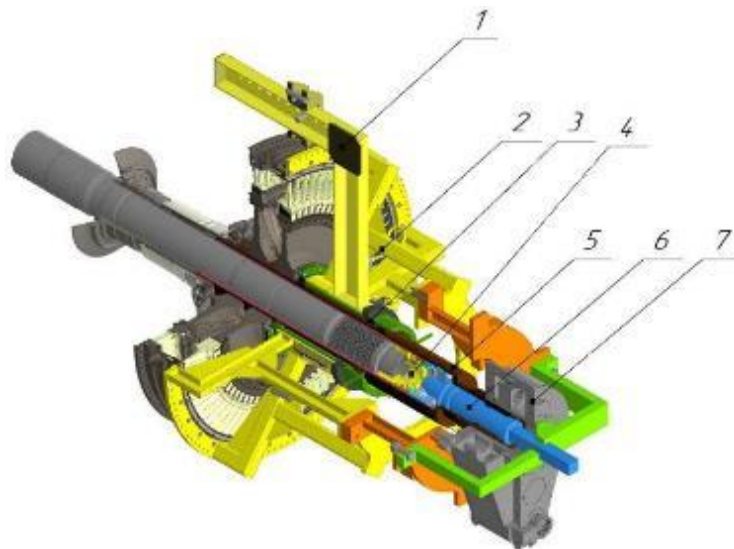


Рис. 5 Инструмент демонтажа ротора ТВД.

*1 – Траверса; 2 – Рама; 3 – Вал опорный; 4 – Устройство стопорное;
5 – Вал толкатель; 6 – Переходник подшипник; 7 – Мультипликатор крутящего момента.*

Одной из особенностей инструмента являются фторопластовые подшипники скольжения большого диаметра, что позволяет снизить силы трения при выполнении демонтажных работ и повысить плавность хода подвижных элементов.

Траверсные элементы в составе инструмента демонтажа модуля ТВД оптимизированы, по условиям прочности, с использованием программного пакета COMSOL Multiphysics (рис.6).

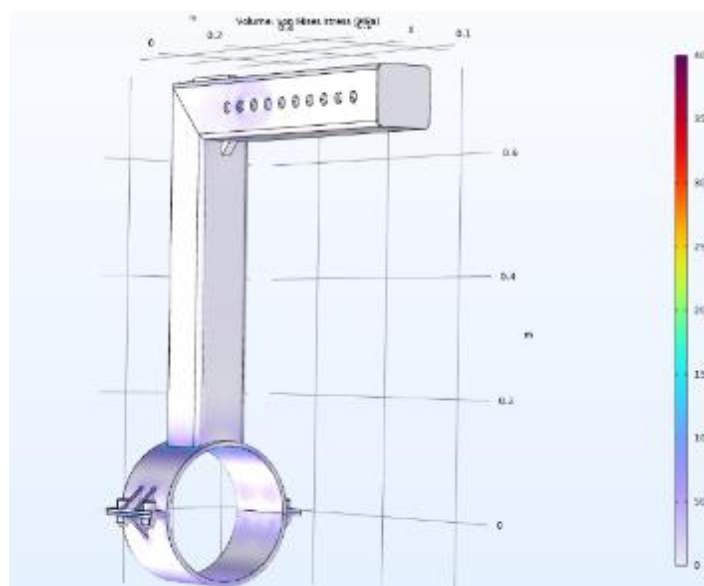
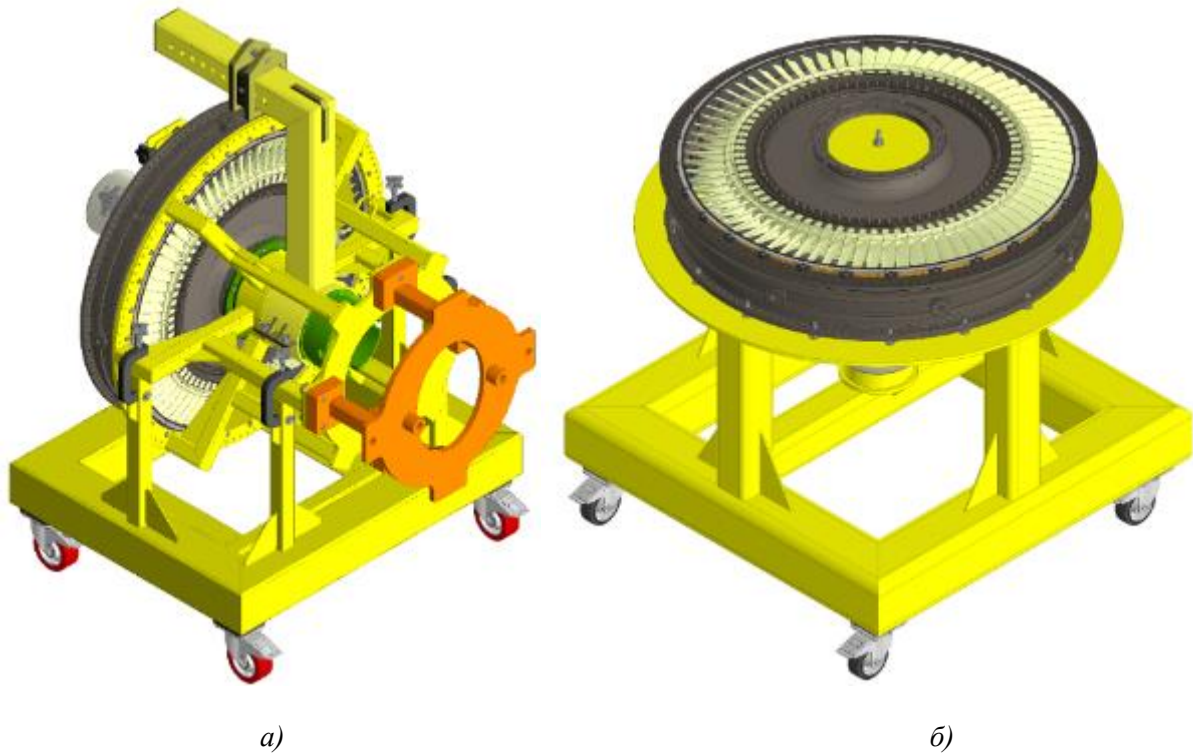


Рис. 6 Расчет на прочность траверсы.

Для хранения и транспортировки модуля ТВД после демонтажа разработано две мобильные платформы (рис.7).



а)

б)

*Рис. 7 Спроектированные платформы хранения
 а) платформа транспортировки и оперативного хранения модуля ТВД после демонтажа;
 б) платформа долгосрочного хранения модуля ТВД*

Результаты.

Основными результатами выполненной работы являются: выводы о высокой эффективности применения программных комплексов КОМПАС-3D и COMSOL Multiphysics для решения задач проектно-технологического обеспечения ремонтно-сервисных технологий теплоэнергетического оборудования. разработана проектно-конструкторская документация и изготовлена технологическая (рис. 8, 9).



Рис. 8 Элементы оснастки для демонтажа модуля ТВД



а)

б)

*Рис. 9 Изготовленные платформы хранения
а) платформа транспортировки и оперативного хранения модуля ТВД после демонтажа;
б) платформа долгосрочного хранения модуля ТВД*

Проведены работы по демонтажу модуля ТВД (рис. 10, 11).



Рис. 10 Снятая контргайка модуля ТВД



Рис. 11 Демонтированный ротор ТВД в зоне хранения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Компания General Electric. Турбины. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://www.geaerospace.com/propulsion/marine/lm6000>. (дата обращения 12.07.2024)

2. Опыт разработки мультипликатора крутящего момента для выполнения сервисных операций газотурбинной установки LM6000 / Несмачных Н.А., Ковалев Д.А., Юрков С.В. // XI Национальная научная конференция с международным участием «Морская техника и технологии. Безопасность морской индустрии», г. Калининград, 2023 – Т.2 – стр. 198-208

EXPERIENCE IN THE DEVELOPMENT OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT FOR THE REPAIR OF THE HIGH-PRESSURE TURBINE MODULE OF THE POWER GAS TURBINE UNIT LM6000 MANUFACTURED BY GENERAL ELECTRIC

¹Yurkov Sergey Valerievich, Associate Professor of the Department of Energy

²Pustoshny Yaroslav Sergeevich, student

³Filippova Valeria Mikhailovna, Design Engineer

^{1,2}Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,

e-mail: ¹sergej.yurkov@klgtu.ru; ²skerdki@yandex.ru

³LLC "Kaliningrad Turbo-Mechanical Plant", Kaliningrad, Russia,

e-mail: ³yakubik99@yandex.ru

The issues of maintenance and repair technology of gas turbine units (GTU) of foreign production are considered. The problem of designing tooling for the dismantling of the high-pressure turbine module of the GTU LM6000 has been solved. The results of tooling design are presented, including examples of strength calculations of a number of critical elements performed by the authors in the Design Bureau of BEM LLC. Examples of manufactured components on the basis of the Kaliningrad Turbomechanical Plant are given. The practical result of the use of tooling in the technological process of repair is described.

СЕКЦИЯ «ПРОМЫШЛЕННОЕ РЫБОЛОВСТВО»

SECTION "COMMERCIAL FISHERY"

УДК 626.887

АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ АКВАКУЛЬТУРЫ В УСЛОВИЯХ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

Волошин Артур Александрович, магистрант

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

Аквакультура является ключевым элементом обеспечения продовольственной безопасности, особенно для стран, зависящих от рыболовства. Рыбные запасы с каждым годом сокращаются, что свидетельствует о необходимости развивать искусственное выращивание. Для ведения марикультуры постройка хозяйств садкового типа представляется выгодной благодаря быстрому сооружению, не сложной эксплуатации и относительно низким затратам. Балтийские страны имеют огромный потенциал для развития марикультуры, учитывая доступ к морской воде и технологические возможности. Однако, ее развитие в Балтийском регионе сталкивается с рядом проблем, которые необходимо преодолеть. Экономические и экологические аспекты играют важную роль в данном процессе, требуя внимательного изучения и решения. Логистические проблемы также могут возникнуть из-за особенностей местоположения и климатических условий. Современные технологии и инновации могут значительно улучшить условия для развития аквакультуры в странах Балтии. Важно разрабатывать устойчивые методы ведения рыбоводства, которые будут основаны на соблюдении российских законов.

Развитие аквакультуры началось с давних времен и продолжается по сегодняшний день. В Европе выращивание рыб получило развитие со времен Древнего Рима, который сформировал основу для ведения такой сельскохозяйственной деятельности [1]. Рыбоводство стало широко применяться после введения контроля за нерестовыми скоплениями и с внедрением технологий по искусственному инкубированию. Аквакультура постепенно обрела внушительные масштабы, но по сравнению с выловом дикой рыбы сильно отстает. Из-за богатого видового состава и разных климатических условий были разработаны методы выращивания как для теплолюбивых, так и для холодноводных видов.

Выращивание рыбы и других морепродуктов является необходимой деятельностью по обеспечению продовольственной безопасности. Современные технологии по вылову гидробионтов широко распространились по всему миру, в связи с чем имеется нехватка рыбных ресурсов. Кроме этого, развитие аквакультуры способствует экономическому росту государств, поставляющим свою продукцию как на внутренний рынок, так и за рубеж. Также аквакультура способствует сохранению биоразнообразия и численности гидробионтов. Выращивание рыбы может использоваться как метод по производству посадочного материала в целях дальнейшего зарыбления водоемов.

Разведение морских и пресноводных гидробионтов является неотъемлемой частью экономики многих стран. Китай является лидером в данной сфере, производя миллионы тонн морской продукции (рис. 1) [2]. При этом садковая аквакультура является для него основным методом выращивания водных биологических ресурсов. Она примечательна тем, что создаются естественные условия, благоприятно сказывающиеся на выращиваемом объекте и упрощающие систему водообмена. Как итог, низкие затраты и не сложная эксплуатация.

Конструкция садка состоит из каркаса, рыболовной сети и систем по закреплению и приданию объема. Наибольшее распространение получили плавучие садки. Для их швартовки обычно применяются якоря, а для обеспечения рабочей формы дель оснащают снизу грузами, а сверху устанавливают понтоны. Под действием течений происходит удаление отходов жизнедеятельности рыб, и вода постоянно насыщается кислородом. В садках достигается высокая продуктивность, что может значительно повысить объемы производства рыбы.

WORLD AQUACULTURE PRODUCTION BY REGION AND SELECTED MAJOR PRODUCERS

Regions and selected countries	2010			2020		
	Animals	Algae	All species	Animals	Algae	All species
	(thousand tonnes, live weight)					
Africa	1 286.1	138.3	1 424.4	2 250.2	104.1	2 354.3
(percentage in world)	(2.23)	(0.69)	(1.83)	(2.57)	(0.30)	(1.92)
Egypt	919.6		919.6	1 591.9		1 591.9
(percentage in Africa)	(71.50)		(64.56)	(70.74)		(67.62)
Northern Africa, excluding Egypt	10.1		10.1	40.1	0.3	40.4
(percentage in Africa)	(0.78)		(0.71)	(1.78)	(0.27)	(1.72)
Nigeria	200.5		200.5	261.7		261.7
(percentage in Africa)	(15.59)		(14.08)	(11.63)		(11.12)
Sub-Saharan Africa, excluding Nigeria	155.9	138.3	294.2	356.5	103.8	460.3
(percentage in Africa)	(12.12)	(100.00)	(20.66)	(15.84)	(99.73)	(19.55)
Americas	2 514.6	12.9	2 527.6	4 375.2	25.3	4 400.5
(percentage in world)	(4.35)	(0.06)	(3.24)	(5.00)	(0.07)	(3.59)
Chile	701.1	12.2	713.2	1 485.9	19.6	1 505.5
(percentage in Americas)	(27.88)	(94.17)	(28.22)	(33.96)	(77.39)	(34.21)
Rest of Latin America and the Caribbean	1 154.5	0.8	1 155.3	2 270.1	5.4	2 275.5
(percentage in Americas)	(45.91)	(5.83)	(45.71)	(51.89)	(21.43)	(51.71)
North America	659.0		659.0	619.2	0.3	619.5
(percentage in Americas)	(26.21)		(26.07)	(14.15)	(1.19)	(14.08)
Asia (excluding Cyprus)	51 228.8	20 008.2	71 237.0	77 377.0	34 916.3	112 293.3
(percentage in world)	(88.70)	(99.18)	(91.41)	(88.43)	(99.54)	(91.61)
China (mainland)	35 513.4	12 273.3	47 786.7	49 620.1	20 862.9	70 483.1
(percentage in Asia)	(69.32)	(61.34)	(67.08)	(64.13)	(59.75)	(62.77)
India	3 785.8	4.2	3 790.0	8 636.0	5.3	8 641.3
(percentage in Asia)	(7.39)	(0.02)	(5.32)	(11.16)	(0.02)	(7.70)
Indonesia	2 304.8	3 915.0	6 219.8	5 226.6	9 618.4	14 845.0
(percentage in Asia)	(4.50)	(19.57)	(8.73)	(6.75)	(27.55)	(13.22)
Viet Nam	2 683.1	18.2	2 701.3	4 600.8	13.9	4 614.7
(percentage in Asia)	(5.24)	(0.09)	(3.79)	(5.95)	(0.04)	(4.11)
Bangladesh	1 308.5		1 308.5	2 583.9		2 583.9
(percentage in Asia)	(2.55)		(1.84)	(3.34)		(2.30)
Rest of Asia	5 633.1	3 797.4	9 430.5	6 709.6	4 415.8	11 125.4
(percentage in Asia)	(11.00)	(18.98)	(13.24)	(8.67)	(12.65)	(9.91)
Europe (including Cyprus)	2 537.3	2.1	2 539.4	3 270.0	21.8	3 291.7
(percentage in world)	(4.39)	(0.01)	(3.26)	(3.74)	(0.06)	(2.69)
Norway	1 019.8		1 019.8	1 490.1	0.3	1 490.4
(percentage in Europe)	(40.19)		(40.16)	(45.57)	(1.54)	(45.28)
European Union (27)	1 072.1	1.4	1 073.5	1 093.8	0.5	1 094.3
(percentage in Europe)	(42.25)	(70.17)	(42.27)	(33.45)	(2.38)	(33.24)
Rest of Europe	445.5	0.6	446.1	686.1	20.9	707.0
(percentage in Europe)	(17.56)	(29.83)	(17.57)	(20.98)	(96.08)	(21.48)
Oceania	189.7	12.8	202.5	228.5	10.1	238.6
(percentage in world)	(0.33)	(0.06)	(0.26)	(0.26)	(0.03)	(0.19)
WORLD	57 756.4	20 174.3	77 930.7	87 500.9	35 077.6	122 578.5

SOURCE: FAO.

Рис. 1. Мировое производство аквакультуры по регионам и отдельным крупным производителям

В России наибольшее практическое применение получили хозяйства бассейнового типа, при том, что их сооружать дороже и дороже, чем садковые хозяйства. Продукция, получаемая от садкового выращивания, составляет лишь несколько процентов. Однако тенденция на ее переход существует ввиду чрезмерной эксплуатации морской живности. Переход к морской аквакультуре является необходимым для укрепления продовольственной надежности. В далеком будущем марикультура станет опорой по обеспечению пропитанием миллиардов людей, как это уже происходит в азиатских странах.

В Балтийском море садковая аквакультура развивается, но не в таких масштабах, как в странах Азии. Основной причиной тому являются шторма, которые разрушают садковые конструкции. Пригодных морских участков очень мало, что тормозит развитие индустриальной аквакультуры в Балтийском море. Соединение с Северным морем является основным источником морской воды, находящимся у берегов Дании. В связи с этим Балтийское море имеет низкую соленость, что также неблагоприятно сказывается на объектах разведения. Существуют также проблемы, связанные с температурой, с экологией, с логистикой и другие. Летом температура воды сильно повышается, и если ничего не предпри-

нимать, то рыбы вымрет. Зимой температура воды может понижаться до критических отметок, при которых рыба также не может существовать, а образующийся лед не даст конструкции садка функционировать должным образом. При выращивании лососевых происходит утечка 5-25% массы корма, что негативно влияет на экологию [3]. Также из-за антибиотиков и искусственных кормов существуют риски нарушения генофонда дикой рыбы [4]. Несмотря на трудности, страны, имеющие доступ к морю, все же развивают данную отрасль. К таким странам относятся Дания, Финляндия и Швеция [5]. Основным объектом разведения является радужная форель, которая относится к лососевым видам рыб и является экономически выгодным объектом для разведения.

Финляндия производит более 16 тыс. тонн рыбы в год, используя в основном метод садкового выращивания [6]. Кроме форели, разводит также сига. Большая часть ферм находится вблизи Аландских островов, создающих барьер для сильных течений во время штормов. Аквакультура для Финляндии является ключевой частью рыбохозяйственного сектора, поэтому для ее развития принимаются систематические усилия, направленные на устойчивый рост воспроизводства. Важно отметить, что идет тенденция к увеличению размещения рыбоводных ферм в районах открытого моря. Финляндия, кроме садкового выращивания, использует установки замкнутого водоснабжения. Эти установки производят значительное количество мальков сига, судака, лосося и форели [7].

В 2022 году общий объем выращенной рыбы в Дании составил около 49 тыс. тонн и с каждым годом растет. Примерно 20% приходится на выращивание в садках и в основном удалено от берега. Страна обладает высоким уровнем механизации и автоматизации в данной отрасли, что уменьшает затраты и увеличивает производительность. Производственный цикл для садкового рыбоводства длится около 8 месяцев по причине холодной зимы. Низкие температуры негативно сказываются на усвоение кормов рыбой и на ее здоровье в целом. Также дрейфующий лед может создавать опасность для такой отрасли. Из-за относительно короткого цикла требуется посадочный материал весом приблизительно 1 кг, чтобы произвести товарный размер рыбы до 5 кг [8]. Кроме форели, страна занимается выращиванием мидий, показывая значительные результаты. Так, за 2022 год было выращено чуть больше 10 тыс. тонн этого моллюска [9].

В Швеции имеется небольшое количество крупных рыбоводческих компаний, которые работают с садками. Доминирующая часть продукции производится в пресной воде. Количество ферм по разведению радужной форели в стране сильно сократилось, но при этом увеличились масштабы производства. Кроме форели, страна занимается разведением гольца и мидий. Ежегодно в садках производятся сотни тонн рыбы. [10] Общий объем аквакультуры страны за 2021 год составил около 16 тыс. тонн [11].

Остальные Балтийские страны, такие как Эстония, Литва, Латвия, Польша, Германия и Россия, имеют крайне мало подходящих мест для марикультуры или вообще не имеют таковых. Мелководье, незащищенность от штормов и ледяные покровы зимой являются барьером для развития садковых ферм [1]. Для защиты от штормов необходимо иметь фьорды, шхеры и заливы, не позволяющие водным течениям сносить садковые конструкции. В Эстонию входит множество островов, самые крупные из которых это Хийумаа и Сааремаа. Эти острова являются отличным средством защиты от сильных течений, но из-за мелководья садковая аквакультура развита незначительно.

Россия включает в себя 26-й и 32-й подрайоны Балтийского моря (рис. 2) [12]. Они принадлежат Калининградской и Ленинградской областям соответственно. Подрайон Ленинградской области представляет собой Финский залив, который имеет благоприятные условия для садкового выращивания гидробионтов. Единственным сдерживающим фактором является высокая температура летом. Для развития садковой аквакультуры в этом районе требуется использовать погружные садки [13]. И тут возникает проблема с нахождением пригодных рыбоводных участков, обладающих достаточной глубиной для погружения садков и необходимым содержанием кислорода в нижних слоях воды. К тому же эти садки с экономической точки зрения менее выгодны. Традиционные плавучие садки получили широкое распространение, в отличие от погружных. В связи с этим необходима разработка и исследование систем по погружению и поднятию садков. Но даже после этого потребуется время на наладку поставок элементов конструкции и квалифицированный персонал, способный эксплуатировать и чинить такие системы. Как следствие, такой подход обойдется во внушительную сумму.

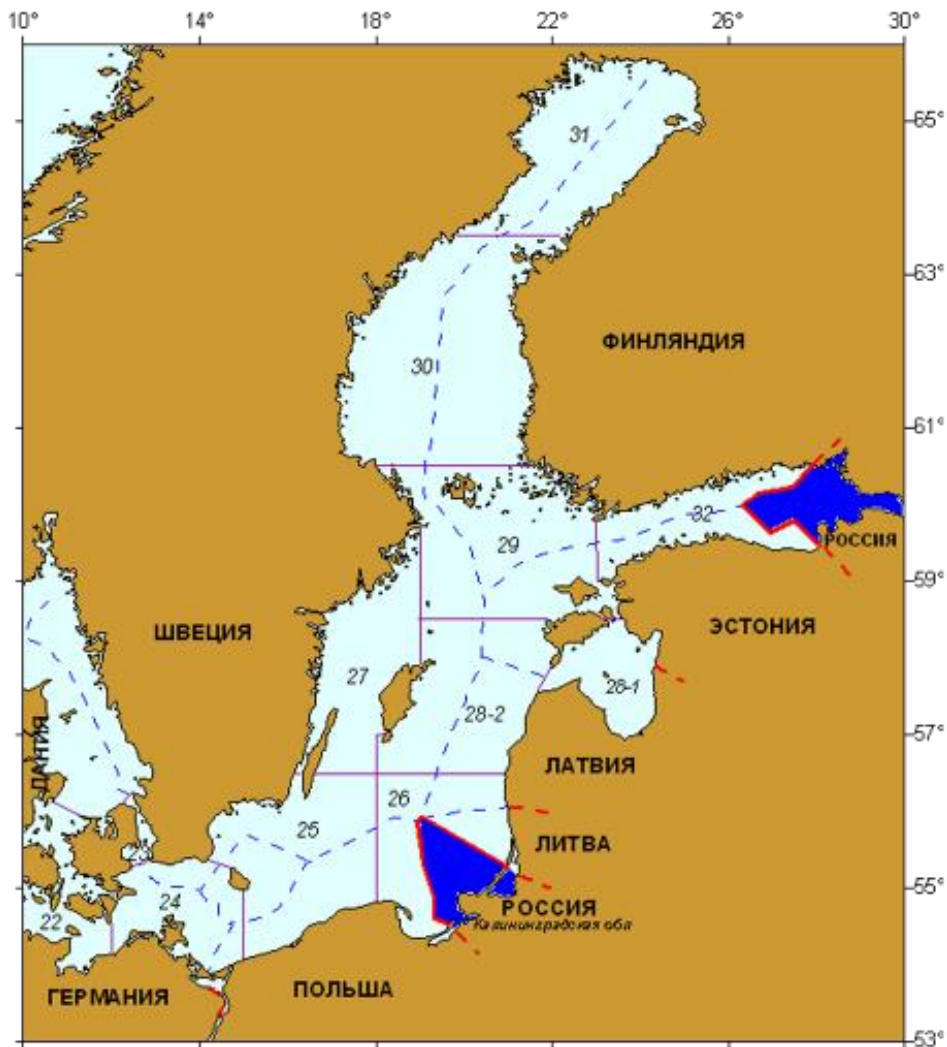


Рис. 2. Подрайоны Балтийского моря

Калининградские воды Балтийского моря обладают уникальными условиями для садкового выращивания рыбы. Море в этом районе не замерзает, а годовое теплосодержание воды составляет 3700 град./дней. Для сравнения, в Финляндии на Аландских островах теплосодержание – 3270 град./дней [13]. Норвегия, которая является лидером в садковом выращивании лососевых видов рыб, также имеет меньшие значения по этому показателю. Однако сооружение садковых ферм не получило развития в условиях Калининградской области. Причиной тому стали шторма, разрушающие конструкции садков и подвергающие риску экологическую безопасность района промысла. Традиционные садки не способны выдержать суровых условий открытого моря, поэтому здесь также необходимо использовать погружные садки. Таким образом, российские воды Балтийского моря нуждаются в использовании погружных садковых конструкций или в усовершенствовании традиционных плавучих садков.

При постройке садковых ферм не стоит забывать про юридическую составляющую аквакультуры. Для ее осуществления в России действует Федеральный закон от 2 июля 2013 г. № 148-ФЗ «Об аквакультуре (рыбоводстве) и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации». Рыба и другие водные организмы выращиваются в соответствии с правилами, утвержденными Постановлением Правительства Российской Федерации от 12 февраля 2014 г. № 99 «Об утверждении Правил организации искусственного воспроизводства водных биологических ресурсов» [14]. Искусственное выращивание гидробионтов регулирует Росрыболовство и подведомственные ему организации, заключая договора с лицами, претендующими на такую деятельность. Закон обеспечивает надлежащее управление рыбоводными участками, предотвращая конфликты интересов. Дело в том, что прибрежные воды, имеющие перспективность для аквакультуры, служат для постройки портов и причалов. В этих местах устанавливаются орудия лова, а на берегу располагаются заводы по переработке рыбы. Таким образом, отрасли по искусственному выращиванию

гидробионтов приходится бороться за прибрежные районы или рисковать, устанавливая садки на значительном расстоянии от берега, где могут быть проблемы также с логистическими маршрутами как для самих рыбоводов, так и для транспортных, туристических и рыбодобывающих компаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Regional review on aquaculture development: Central and Eastern European region – 2005 // Электрон. дан. Режим доступа URL: <https://www.fao.org/4/a1356e/a1356e00.htm> (дата обращения: 21.05.2024).
2. Aquaculture - Regional breakdown // Электрон. дан. Режим доступа URL: <https://www.iffco.com/aquaculture> (дата обращения: 21.05.2024).
3. The place of sustainable aquaculture in 'Blue growth' strategy for the Baltic sea. // Электрон. дан. Режим доступа URL: https://www.researchgate.net/publication/340488265_The_place_of_sustainable_aquaculture_in_'blue_growth'_strategy_for_the_Baltic_Sea (дата обращения: 21.05.2024).
4. Review of cage and containment tank designs for offshore fish farming // Электрон. дан. Режим доступа URL: https://www.researchgate.net/publication/338439274_Review_of_cage_and_containment_tank_designs_for_offshore_fish_farming (дата обращения: 22.05.2024).
5. Бугров, Л. Ю. Современное состояние и перспективы товарного выращивания лососевых рыб на Балтийском море / Л. Ю. Бугров, И. Л. Бугров // Водные биоресурсы, аквакультура и экология водоемов : труды III балтийского морского форума, Калининград, 26–27 мая 2015 года / главный редактор К.В.Тылик. – Калининград: ФГБОУ ВПО "Калининградский государственный технический университет", 2015. – С. 62-64.
6. Финляндия достигла 20-летнего максимума по объему производства продукции аквакультуры // Электрон. дан. Режим доступа URL: https://www.fishnet.ru/news/aquaculture_news/finlyandiya-dostigla-20-letnego-maksimuma-po-obemu-proizvodstva-produkcii-akvakultury/ (дата обращения: 24.05.2024).
7. Финляндия на пике объемов производства продукции аквакультуры // Электрон. дан. Режим доступа URL: <https://рыбоводы.рф/news/68-foreign/558-finfish> (дата обращения: 24.05.2024).
8. Садковое рыбоводство // Электрон. дан. Режим доступа URL: <https://studfile.net/preview/19739393/page/4/> (дата обращения: 25.05.2024).
9. Overview of the Danish fisheries and aquaculture sector // Электрон. дан. Режим доступа URL: <https://eurofish.dk/member-countries/denmark/> (дата обращения: 26.05.2024).
10. Overview of farming techniques for aquaculture in Sweden. // Электрон. дан. Режим доступа URL: <https://www.gu.se/sites/default/files/2020-05/Overview%20of%20farming%20techniques%20for%20aquaculture%20in%20Sweden.pdf> (дата обращения: 26.05.2024).
11. Швеция/Справочная информация // Электрон. дан. Режим доступа URL: <https://aquaculture.ec.europa.eu/country-information/sweden> (дата обращения: 26.05.2024).
12. Промысел водных биоресурсов в Балтике (российская часть) – современное состояние и перспективы // Электрон. дан. Режим доступа URL: <http://www.atlant.vniro.ru/index.php/novosti2/item/922-promysel-vodnykh-bioresursov-v-baltike-rossijskaya-chast-sovremennoe-sostoyanie-i-perspektivy> (дата обращения: 2.06.2024).
13. Влияние изменений климата на развитие морской аквакультуры Балтийского региона // Электрон. дан. Режим доступа URL: <https://luxsol.ru/news/iskusstvennoe-razvedenie-ryby/vliyanie-izmeneniy-klimata/> (дата обращения: 2.06.2024).
14. Официальный правовой сайт «КонсультантПлюс» // Электрон. дан. Режим доступа URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_148460/ (дата обращения: 5.06.2024).

ANALYSIS OF AQUACULTURE DEVELOPMENT IN THE BALTIC SEA CONDITIONS

Voloshin Arthur Alexandrovich, Master's degree student

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

Aquaculture is a key element for food security, especially for countries dependent on fisheries. Fish stocks are decreasing every year, which indicates the need to develop artificial cultivation. The construction of cage-type farms is advantageous for mariculture due to their quick construction, simple operation and relatively low costs. The Baltic countries have great potential for mariculture development, given their access to seawater and technological capabilities. However, its development in the Baltic region faces a number of challenges that need to be overcome. Economic and environmental aspects play an important role in this process, requiring careful consideration and solutions. Logistical problems may also arise due to location and climatic conditions. Modern technologies and innovations can significantly improve the conditions for aquaculture development in the Baltic countries. It is important to develop sustainable fish farming practices that will comply with Russian laws.

ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ РАСЧЕТА РАЗРЫВНОЙ ПРОЧНОСТИ И ОТНОСИТЕЛЬНОГО УДЛИНЕНИЯ КРУЧЕНЫХ РЫБОЛОВНЫХ МАТЕРИАЛОВ

¹Недоступ Александр Алексеевич, доцент, канд. техн. наук,
заведующий кафедрой промышленного рыболовства

²Насенков Павел Владимирович, ст. преподаватель
кафедры промышленного рыболовства

^{1,2}ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,
Калининград, Россия, e-mail: nedostup@klgtu.ru

Описана разработка математических зависимостей физико-механических характеристик крученых рыболовных материалов. По результатам экспериментальных исследований впервые были получены аппроксимирующие зависимости относительного удлинения и относительной разрывной нагрузки от сплошности изделия, а также от отношения поверхностного и продольного натяжений крученых рыболовных материалов, изготовленных из полиамида, полипропилена и полиэфира. Математические зависимости позволяют рассчитать относительное удлинение и разрывную нагрузку крученых рыболовных ниток и веревок, изготовленных из полиамида, полипропилена и полиэфира в пределе точности 90 %.

Сетные орудия промышленного рыболовства представляют собой сложные инженерные конструкции, состоящие из множества элементов. Каждый элемент, это нитка, веревка, шнур могут быть крученые, плетеные, изготовленные из различного материала, таких как полиамид (ПА), полипропилен (ПП), полиэфир (ПЭФ), полиэтилен (ПЭ), также могут быть смесенные между собой. Сетные орудия промышленного в процессе эксплуатации испытывают большие нагрузки. Данные нагрузки воздействуют на каждый элемент. Каждый элемент в данном случае подвержен растяжению, удлинению, в аварийных ситуациях, когда прочность уменьшается, нитки, веревки, канаты рвутся. Данные изменения в конструкциях ведут к аварийным ситуациям, к потере промыслового времени, потере улова и к неоправданным экономическим затратам, что является проблемой для предприятий рыбохозяйственного комплекса и «Росрыболовства» [1-3]. Для прогнозирования физико-механических свойств таких относительное удлинение и разрывная нагрузка рыболовных крученых материалов необходим математический аппарат. [4]. В нашем случае это математические модели, которые описывают относительное удлинение рыболовных крученых материалов и разрывную нагрузку. Они необходимы для того, чтобы избежать аварийных ситуаций, предсказать какой требуется диаметр и материал для того или иного орудия промышленного рыболовства, для тех или иных условий эксплуатации, причем запас прочности того или иного элемента можно будет задавать с учетом этих математических зависимостей. Таким образом, данные математические зависимости можно использовать не только для прогнозирования физико-механических свойств рыболовных крученых материалов, но и использовать для моделирования орудий промышленного рыболовства в процессе их эксплуатации [5-7].

Для разработки математических моделей, использовались экспериментальные данные проведенные с нитевидными рыболовными нитками и веревками ПА, ПП и ПЭФ в сухом виде (рис. 1) [8].



Рис. 1. Нитевидные рыболовные нитки и веревки

В таблице 1 представлены расчетные данные для ниток и веревок изготовленных из ПП.

Таблица 1

Расчетные данные для ПП

d , мм	L , мм	Масса нити, m 10^{-3} кг	Вес нити, $p=mg$ 10^{-3} Н	$\lambda=L/d$	$\sigma=P/S$ 10^8 Н/м ² (Па)	$\alpha=p/P$	$E=\sigma/\varepsilon$ 10^8 Н/м ² (Па)	$v=\varepsilon/\lambda$ 10^{-3}	$\chi=\sigma/\lambda$ 10^6 Н/м ² (Па)	$H=P(v^2/\varepsilon L)$ Вт/с		
1,1	100	0,05	0,49	90,1	3,16	0,0016	4,92	7,07	3,48	0,01		
	100				3,25	0,0015	4,94	7,24	3,58	0,32		
	100				3,32	0,0015	5,13	7,11	3,65	1,35		
	1,1	175	0,09	0,88	159,1	3,18	0,0029	6,82	2,92	1,99	0,01	
		175				3,20	0,0028	7,11	2,83	2,01	0,26	
		175				3,28	0,0028	7,16	2,88	2,06	1,08	
		1,1	250	0,12	1,17	227,3	3,09	0,0039	8,15	1,67	1,36	0,008
			250				3,21	0,0038	8,24	1,71	1,41	0,21
			250				3,23	0,0038	8,38	1,69	1,42	0,88
2,0	100	0,17	1,66	50	2,17	0,0024	2,51	17	4,35	0,02		
	100				2,28	0,0023	2,88	16	4,55	0,62		
	100				2,32	0,0022	3,03	15	4,64	2,64		
	2,0	175	0,29	2,84	87,5	2,21	0,0040	3,63	6,98	2,53	0,01	
		175				2,25	0,0040	3,83	6,72	2,57	0,47	
		175				2,30	0,0039	3,97	6,62	2,63	1,98	
	2,0	250	0,40	3,92	125	2,16	0,0057	4,21	4,10	1,72	0,01	
		250				2,21	0,0056	4,53	3,90	1,76	0,39	
		250				2,28	0,0054	4,78	3,81	1,82	1,67	
3,1	100	0,32	3,13	32,25	1,77	0,0023	2,15	25,54	5,50	0,04		
	100				1,86	0,0022	2,33	24,86	5,79	1,22		
	100				1,91	0,0021	2,48	23,9	5,94	5,21		
	3,1	175	0,55	5,39	56,45	1,78	0,0039	2,93	10,79	3,16	0,03	
		175				1,87	0,0038	3,28	10,08	3,31	0,98	
		175				1,88	0,0037	3,57	9,37	3,34	4,27	
	3,1	250	0,78	7,64	80,64	1,74	0,0058	3,43	6,27	2,15	0,02	
		250				1,82	0,0055	3,78	5,96	2,25	0,79	
		250				1,87	0,0054	4,15	5,59	2,32	3,48	
4,0	100	0,66	6,47	25	1,88	0,0027	1,93	38,88	7,53	0,06		
	100				1,91	0,0026	2,03	37,64	7,66	1,77		
	100				1,99	0,0025	2,12	37,64	7,98	7,40		
	4,0	175	1,10	10,78	43,75	1,89	0,0045	2,76	15,68	4,34	0,05	
		175				1,95	0,0043	2,96	15,09	4,47	1,47	
		175				1,89	0,0045	3,09	13,99	4,32	6,17	
	4,0	250	1,55	15,19	62,5	1,89	0,0063	3,46	8,76	3,03	0,05	
		250				1,90	0,0063	3,63	8,35	3,04	1,27	
		250				1,89	0,0063	3,70	8,17	3,03	5,17	

На основании данных таблицы 1 построены графики аппроксимирующих зависимостей $\varepsilon=f(\alpha)$ (рис. 2) и $\varepsilon=f(\lambda)$ (рис. 3). Аппроксимация была проведена методом наименьших квадратов.

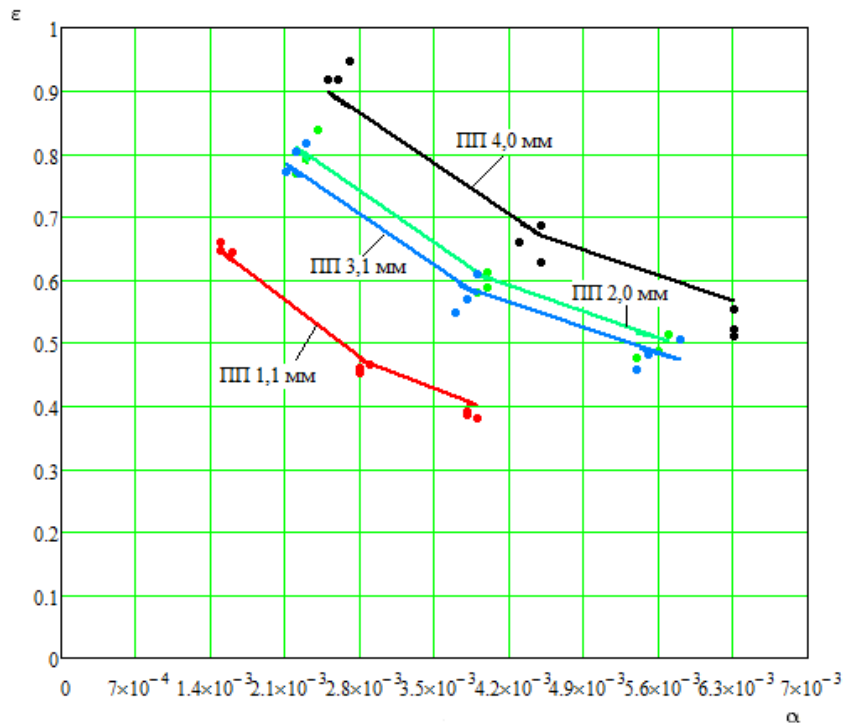


Рис. 2. График аппроксимирующей зависимости относительного удлинения от отношения веса нити к разрывной прочности (ППП)

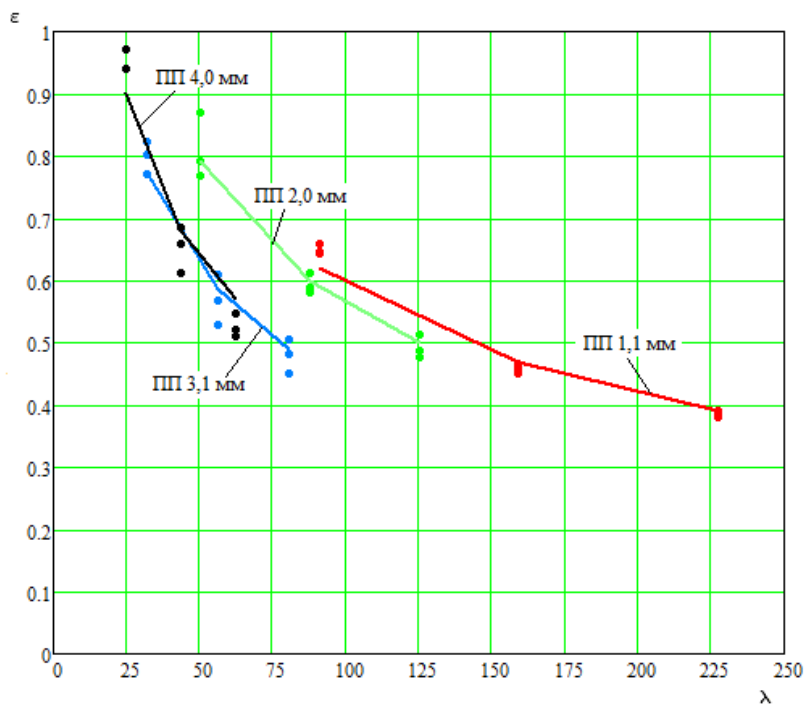


Рис. 3. График аппроксимирующей зависимости относительного удлинения от конструктивного удлинения (ППП)

Ошибка аппроксимирующих зависимостей составляет не более 7%.

Относительное удлинения можно представить расчетным значением (1) и (2):

$$\varepsilon = k_{\lambda} \left(\frac{L}{d} \right)^{-1/2} = k_{\lambda} \lambda^{-1/2}, \quad (1)$$

где ε - относительное удлинение; k_{λ} - коэффициент зависящий от вида материала, диаметра и сплошности; λ - конструктивное удлинение.

$$\varepsilon = k_{\alpha} \left(\frac{p}{P} \right)^{-1/2} = k_{\alpha} \alpha^{-1/2}, \quad (2)$$

где k_{α} - коэффициент зависящий от вида материала, диаметра и сплошности; α - отношение веса нити к разрывной прочности.

Приравняем (1) и (2)

$$k_{\lambda} \lambda^{-1/2} = k_{\alpha} \alpha^{-1/2}, \quad (3)$$

или

$$\frac{k_{\lambda}}{k_{\alpha}} = \left(\frac{\alpha}{\lambda} \right)^{-\frac{1}{2}} = \left(\frac{pd}{PL} \right)^{-\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

Умножим в скобках верхнюю и нижнюю части выражения на отношение $\pi d/4$, получим

$$\frac{pd \left(\frac{\pi d}{4} \right)}{PL \left(\frac{\pi d}{4} \right)} = \frac{pS}{PL \left(\frac{\pi d}{4} \right)},$$

при условии, что напряжение $\sigma = P/S$, длина окружности нитки $l_{окр} = \pi d$ и площадь поверхности нитки $S_{нов} = Ll_{окр}$, получим

$$\frac{pS}{PL \left(\frac{\pi d}{4} \right)} = \frac{4p}{\sigma L \pi d} = \frac{4p}{\sigma S_{нов}} = \frac{4\sigma_{нов}}{\sigma},$$

где $\sigma_{нов} = p/S_{нов}$ - напряжение поверхности нити.

Тогда выражение (4) представим в виде

$$\frac{k_{\lambda}}{k_{\alpha}} = \left(\frac{4\sigma_{нов}}{\sigma} \right)^{-\frac{1}{2}} = 0,5 \sqrt{\frac{\sigma}{\sigma_{нов}}}, \quad (5)$$

Представим коэффициенты k_{λ} и k_{α} , зависящими от сплошности нитки F_0

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{k_{\lambda}}{k_{\alpha}} = aF_0 \\ \frac{k_{\lambda}}{k_{\alpha}} = 0,5 \sqrt{\frac{\sigma}{\sigma_{нов}}} \end{array} \right., \quad (6)$$

где a - коэффициент, зависящий от материала нитки.

Приравняем отношения k_{λ}/k_{α}

$$aF_0 = 0,5 \sqrt{\frac{\sigma}{\sigma_{нов}}},$$

или

$$a^2 F_0^2 = 0,25 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{нов}} \right). \quad (7)$$

Из (7) получим

$$\sigma = 4a^2 F_0^2 \sigma_{нов}. \quad (8)$$

Введем коэффициент α_1

$$a_1 = 4a^2, \quad (9)$$

тогда выражение (8) представим в виде

$$\sigma = a_1 F_0^2 \sigma_{нов}. \quad (10)$$

Так как $\sigma=P/S$, то выражение (10) представим в виде

$$P = a_1 F_0^2 S \sigma_{нов} = a_1 F_0^2 S \frac{P}{S_{нов}} = a_1 F_0^2 p \frac{S}{S_{нов}}, \quad (11)$$

при условии, что отношение площадей

$$\frac{S}{S_{нов}} = \frac{\frac{\pi d^2}{4}}{\pi d L} = \frac{1}{4\lambda}, \quad (12)$$

получим выражение (11) в виде

$$P = a_1 F_0^2 p \frac{1}{4\lambda} = a^2 F_0^2 p \lambda^{-1}, \quad (13)$$

Обозначим величину p через выражение

$$p = bL, \quad (14)$$

где b - коэффициент, зависящий от материала нитки (вес одного метра нитки) или характеристика материала волокна нитки.

Тогда выражение (13) представим в виде

$$P = a^2 F_0^2 bL \frac{d}{L} = a^2 F_0^2 b d, \quad (15)$$

или в виде

$$P = \left(\frac{k_\lambda}{k_\alpha} \right)^2 b d. \quad (16)$$

Предложенные математические зависимости (1-16) позволяют рассчитать относительное удлинение и разрывную нагрузку крученых рыболовных ниток и веревок, изготовленных из ПА, ПП и ПЭФ в пределе точности 90%. Математическое моделирование физико-механических характеристик крученых рыболовных материалов позволит при проектировании орудий промышленного рыболовства задавать, с учетом запаса прочности, проектные характеристики рыболовных изделий, которые изготовлены из ПА, ПП и ПЭФ. Дальнейшие исследования будут направлены на определение математических зависимостей расчета относительного удлинения и разрывной нагрузки для влажных крученых рыболовных материалов.

Исследование выполнено в рамках выполнения государственного задания по теме «Разработка физических, математических и предсказательных моделей процессов эксплуатации донного и разноглубинного траловых комплексов».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розенштейн М.М. Механика орудий рыболовств. - Калининград: Изд-во КГТУ. – 2000. - 362 с.
2. Войниканис-Мирский В.Н. Рыболовные материалы, сетные и такелажные работы. - Москва: Агропромиздат. - 1985. - 183 с.
3. Перепелкин К.Е. Химические волокна: развитие производства, методы получения, свойства, перспективы. - Санкт-Петербург: РИО СПГУТД. - 2008. - 315 с.

4. Система автоматизированного проектирования орудий промышленного рыболовства. – URL [Электронный источник]: <https://digitechlab.ru/cad-fg.html>.

5. Недоступ А.А., Насенков П.В., Ражев А.О., Коновалова К.В., Федоров С.В. Обоснование правил подобия разрывной нагрузки рыболовных крученных изделий. Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. - Астрахань. АГТУ. - №1. - 2020. - С. 38–45;

6. Недоступ А.А., Коновалова К.В., Насенков П.В., Ражев А.О., Альтшуль Б.А., Федоров С.В. Относительная жесткость рыболовных крученных изделий. Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. - Астрахань. АГТУ. - №1. - 2020. - С. 46-60;

7. Недоступ А.А., Ражев А.О., Наумов В.А., Дятченко С.В., Коновалова К.В., Соколова Е.В. Расчёт прогиба композитного ваера численным методом точечных масс при компьютерном моделировании. Морские интеллектуальные технологии. - № 2. Т. 1. - 2020. - С. 210-215;

8. Насенков П.В., Недоступ А.А., Наумов В.А. Экспериментальные исследования разрывного усилия и относительного удлинения рыболовных веревочно-нитевидных изделий с различной скоростью разрыва и длиной исследуемых образцов. Известия КГТУ. - №58. - 2020. - С. 35-48.

DEPENDENCIES FOR CALCULATING THE BREAKING STRENGTH AND RELATIVE ELONGATION OF TWISTED FISHING MATERIALS

¹Nedostup Alexander Alekseevich, Associate Professor, Ph.D.,
Head of the Department of Commercial Fishing

²Nasenkov Pavel Vladimirovich, Senior Lecturer, Department of Commercial Fisheries

^{1,2}Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,
e-mail: nedostup@klgtu.ru

The article describes the development of mathematical dependencies of the physical and mechanical characteristics of twisted fishing materials. Based on the results of experimental studies, approximating dependencies of the relative elongation and relative breaking load on the continuity of the product, as well as on the ratio of the surface and longitudinal tension of twisted fishing materials made of polyamide, polypropylene and polyester were obtained for the first time. Mathematical dependencies allow calculating the relative elongation and breaking load of twisted fishing threads and ropes made of polyamide, polypropylene and polyester within the accuracy limit of 90%.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИСПЫТАНИЯ ТРАЛОВОЙ ДОСКИ

¹Недоступ Александр Алексеевич, канд. техн. наук, доцент,
заведующий кафедрой промышленного рыболовства

²Пивоваров Александр Владимирович, студент кафедры промышленного рыболовства

^{1,2}ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,
Калининград, Россия, e-mail: ¹nedostup@klgtu.ru; ²sashapivovarov77ioos@mail.ru

Описаны виды тралов и одна из их оснасток – траловые доски. Создан чертеж крыловидной траловой доски, на основе которого создана 3D модель для компьютерных испытаний в программе «Гидродинамика траловых досок». Рассмотрены результаты физических испытаний из экспериментального бассейна «Фишеринг Сервис». На основе проанализированных данных начата разработка дистанционно настраиваемой траловой доски.

В промышленном рыболовстве существует множество типов орудий рыболовства. Одним из основных типов активных орудий рыболовства являются отцеживающие. К отцеживающим орудиям рыболовства относятся: тралюемые, кошелькующиеся, притоняемые, накидки, поддоны, драги и сачки. Самым часто используемым отцеживающим орудием является трал, так как обладает высокой эффективностью и позволяет ловить большие объемы гидробионтов (рис.1).

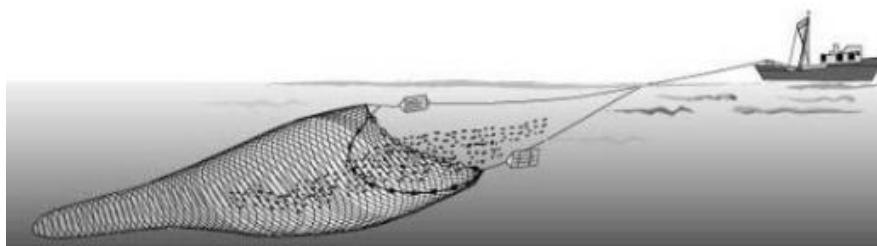


Рис.1. Трал

Трал является отцеживающим орудием лова, имеющим форму конусообразного сетного мешка с системой оснастки. Процесс траления происходит за счет буксирования по дну или в толще воды, в зависимости от вида. Траление осуществляется промысловым судном - траулером. Необходимое раскрытие сетной части осуществляется с помощью специальных распорных средств, а именно траловых досок, гидродинамических щитков, кухтылей, а также от собственного гидродинамического сопротивления (рис.2).

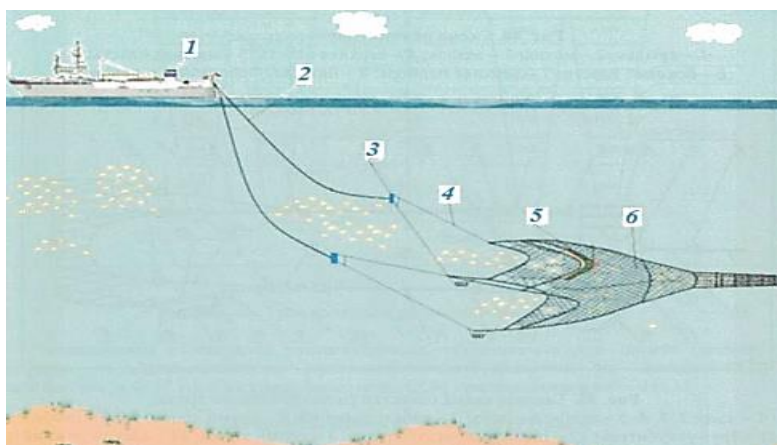


Рис. 2. Оснастка трала. 1. Траулер, 2. Ваера, 3. Траловые доски, 4. Кабели, 5. Верхняя подбора, 6. Сетная часть (трал)

По способу применения тралы подразделяются на две основные группы: донные и разноглубинные. Донные тралы имеют широкую сетку и тяжелые грузы, предназначенные для добычи гидробионтов, обитающих на дне водоема и в непосредственной близости от него, например, камбалы или трески. Разноглубинные тралы имеют более гибкую конструкцию, предназначенную для вылова в толще воды. Они часто применяются для ловли таких видов, как скумбрия и тунец.

Одним из основных элементов оснастки трала является траловая доска, которая обеспечивает горизонтальное раскрытие трала. Траловые доски также бывают как донные, так и разноглубинные и их вид зависит непосредственно от района промысла и типа трала. На каждую траловую доску есть патент, обеспечивающий уникальность каждой модели траловой доски, следовательно, траловые доски между собой отличаются. Например, донные траловые доски как правило имеют широкую и плоскую поверхность, что позволяет равномерно распределять давление и минимизировать риск застревания в неровностях, углы досок закруглены или усилены, чтобы предотвратить повреждения при контакте с дном. В свою очередь разноглубинные траловые доски имеют более вытянутую форму и менее скругленную форму, по сравнению с донными траловыми досками, чаще всего имеют прямоугольную форму.

Для примера рассматривается модель разноглубинной траловой доски крыловидной формы (рис. 3). На основе существующей модели был создан чертеж в программе российского производства «Компас 3D» (рис. 4). В последующем нам были предоставлены результаты экспериментов данной модели из экспериментального бассейна (гидролотка) «Фишеринг Сервис» (табл. 1).



Рис. 3. Модель разноглубинной траловой доски крыловидной формы

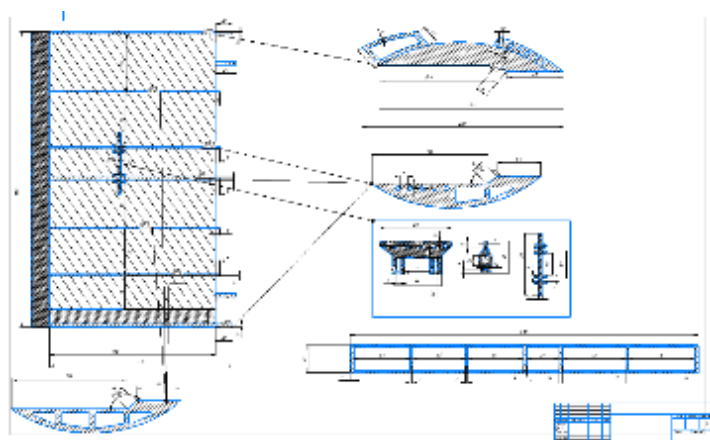


Рис. 4. Чертеж модели разноглубинной траловой доски крыловидной формы

Результаты экспериментов модели из экспериментального бассейна «Фишеринг Сервис»

Скорость потока, м/с	Угол атаки, град	Нагрузка на ваере, Н	Нагрузка на кабеле, Н	C_y
1,0	25	10,1	2,8	1,46
1,0	30	11,2	2,8	1,79
1,0	35	11,8	2,5	1,85
1,0	40	11	2,4	1,81
1,0	45	11	2,4	1,79
1,0	50	9	1,8	1,79
1,0	60	7,8	1,8	1,66

Также на основе чертежа нами была создана 3D модель крыловидной траловой доски (рис. 5). Модель создавалась с целью проведения исследования ее гидродинамических характеристик в компьютерной программе «Гидродинамика траловых досок». В программе были заданы различные параметры, которые показывают какое давление оказывается на модель (рис. 6).

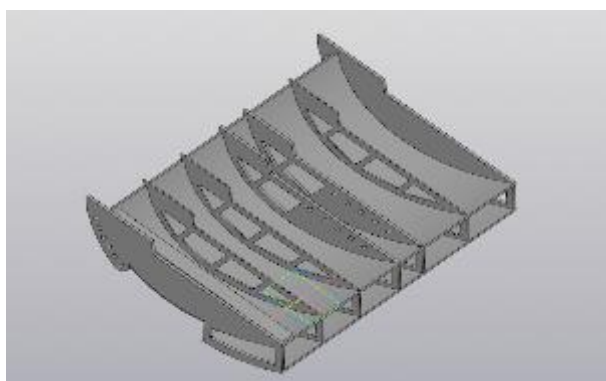


Рис. 5. 3D модель модели траловой доски крыловидной формы

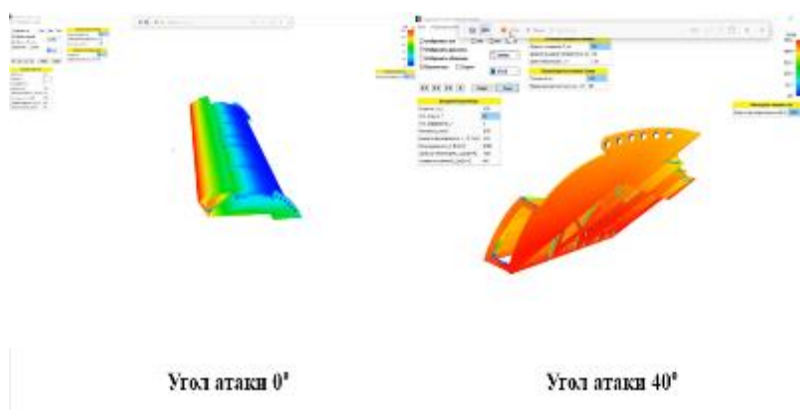


Рис. 6. Показатели давления, действующие на модель траловой доски

На основе полученных и проанализированных результатов физических и компьютерных экспериментов, было принято решение начать разработку дистанционно настраиваемую траловую доску, так как во время промысла могут меняться условия промысла, такие как течения и давление, что может отрицательно отразиться на промысле. При неправильном давлении, оказываемом на траловые доски, они не будут обеспечивать правильное и достаточное раскрытие тралового мешка, что приведет к уменьшению добычи. Для перенастройки положения траловых досок приходится доставать трал обратно на судно. В свою очередь, дистанционно настраиваемая траловая доска позволяет настроить нужный угол атаки, а, следовательно, и нужное горизонтальное раскрытие тралового мешка на судне, не прибегая к доставанию его на палубу.

Основное преимущество дистанционно настраиваемой траловой доски по отношению к привычной траловой доске в том, что траллмастер может дистанционно контролировать горизонтальное раскрытие трала, а также при необходимости позволяет оперативно изменять настройки в зависимости от условий ловли, что повышает эффективность. Данная траловая доска позволит сэкономить время на промысле, а также возможность корректировать раскрытие трала приводит к более высокому улову и, как результат, к увеличению прибыли. Применение дистанционно настраиваемой траловой доски увеличивает эффективность работы и позволяет достигать лучших результатов на промысле.

Исследование выполнено в рамках выполнения государственного задания по теме «Разработка физических, математических и предсказательных моделей процессов эксплуатации донного и разноглубинного траловых комплексов».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Недоступ А. А., Ражев А. О. Программное обеспечение для исследования гидродинамики распорных траловых досок // Морские интеллектуальные технологии. 2017. Т. 1, № 3(37). 168–173 с.
2. Недоступ А.А., Ражев А.О. Программное обеспечение для исследования гидродинамики распорных траловых досок. Морские интеллектуальные технологии. №3(37) Т.1. 2017. - 168-173 с.
3. Орудие рыболовства: научная классификация - URL [Электронный источник]: https://www.magazine.fish/publikatsii/promyslovoe-rybolovstvo/nauchnaya_klassifikatsiya_orudiy_rybolovstva/
4. Орудия промышленного лова: тралы - URL [Электронный источник]: https://www.magazine.fish/publikatsii/promyslovoe-rybolovstvo/orudiya_promyshlennogo_lova_traly/
5. Фридман А.Л. Теория и проектирование орудий промышленного рыболовства. - М: Легкая и пищевая промышленность, 1981а. - 327 с.

TRAWL DOOR DESIGN AND TESTING

¹Nedostup Alexander Alekseevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Commercial Fisheries

²Pivovarov Alexander Vladimirovich, student of the Department of Commercial Fishing

^{1,2}Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,
e-mail: nedostup@klgtu.ru; sashapivovarov77ioos@mail.ru

The article describes the types of trawls and one of their equipment - trawl doors. A drawing of a wing-shaped trawl door was created, on the basis of which a 3D model was created for computer testing in the "Hydrodynamics of trawl doors" program. The results of physical tests of the experimental pool "Fishing Service" are considered. Based on the analyzed data, a remotely adjustable trawl door was developed and began to be developed.

АНАЛИЗ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ УЗЛОВЫХ ДЕЛЕЙ

¹Недоступ Александр Алексеевич, доцент, канд. техн. наук

²Ражев Алексей Олегович, ведущий научный сотрудник, канд. техн. наук

³Коновалова Карина Витальевна, аспирант

⁴Сергеев Егор Ильич, аспирант

^{1,2,3,4}ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,

Калининград, Россия, e-mail: ¹nedostup@klgtu.ru; ²aleksej.razhev@klgtu.ru;

³karina.konovalova4382@mail.ru; ⁴pyrojaeger@gmail.com

Рассмотрено использование численного метода для определения гидродинамических свойств делей с различным поворотом ячеи: Т0 (стандартное расположение ячеи), Т90 и Т45 (Т0 развернутая на 90° и 45° соответственно). Для разработки математической модели на основе уравнений Навье-Стокса была проведена схематизация полотна. Расчет выполнялся на регулярной расчетной сетке по неявной конечно-разностной схеме с использованием методов покоординатного расщепления, линеаризации нелинейных уравнений с последующей коррекцией нелинейных коэффициентов. Приводятся результаты численных экспериментов в виде визуализации давления на поверхности различных сетчатых конструкций при различных углах атаки.

Введение

Наибольшее распространение в сфере промышленного рыболовства получили, дели с ромбической формой и зеркальной: Т0 (стандартное расположение ячеи), Т90 и Т45 (Т0 развернутая на 90° и 45° соответственно).

Т45 – это дель, у которой нитки располагаются вдоль и поперек полотна, образуя квадратные ячейки. В промышленном рыболовстве они применяются довольно редко и получаются из Т0 путем специальной кройки по косой ячее.

Т90 изготавливается из ромбовидной сетки, повернутой на 90° так, чтобы основное направление движения сетки было параллельно направлению буксировки, что приводит к улучшению раскрытия ячеи по сравнению с ромбовидной. В результате применения Т90 может улучшить избирательность по размерам при траловом промысле многих видов рыбной ловли: исследование тралового промысла трески на Балтике [1] и пикши в Баренцевом море [2].

Стоит отметить, что во время промысла на сетные орудия действуют гидродинамические силы, вследствие чего возникает натяжение в конструкции и в ячеи в стандартном положении - Т0 начинают затягиваться и закрываться, в отличие от Т90, Т45 - все это влияет на селективные качества орудий лова.

Вследствие этого становится очевидным важность изучения таких гидродинамических характеристик, как поля давлений и скоростей. С этой целью следует применять метод физического эксперимента [3, 4] и метод численного эксперимента [5-7].

Постановка задачи

Для реализации такого эксперимента требуется использование специализированного компьютерного программного обеспечения, которое обеспечивает моделирование всех возможных взаимодействий между сетчатым полотном и жидкой средой. Разработка подобного программного комплекса требует высоких математических компетенций в сочетании с навыками программирования. Применяемые алгоритмы численного эксперимента и имитационного моделирования основаны на решении уравнений Навье-Стокса и уравнения неразрывности [8].

На рисунках 1-3 представлены 3D модели участков узловых делей с различным положением ячеи и разной посадкой.

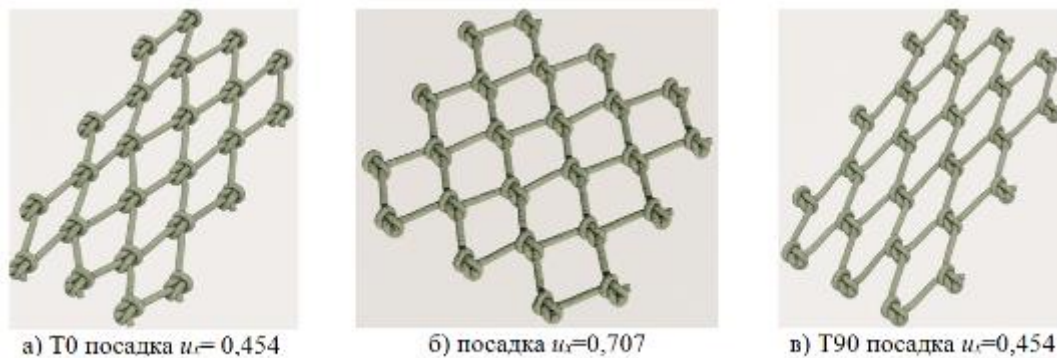


Рис. 1. Участок узловой дели $d/a=0,13$



Рис. 2. Участок узловой дели $d/a=0,10$



Рис. 3. Участок узловой дели $d/a=0,08$

Для проведения расчетов и анализа гидродинамического поведения узловых делей, с акцентом на расчет сетных конструкций была использована программа для ЭВМ «Гидродинамика плетеной узловой дели», разработанная авторами статьи. Данная программа позволяет провести исследование влияния параметров среды, скорости и углов атаки, крена и дифферента узловой дели на поля скоростей и давлений воды. В программе имеется поддержка стерео-вывода трехмерной графики.

Основные этапы алгоритма расчета полей скоростей и давлений, примененного при разработке программы для ЭВМ, приведены на рисунке 4.

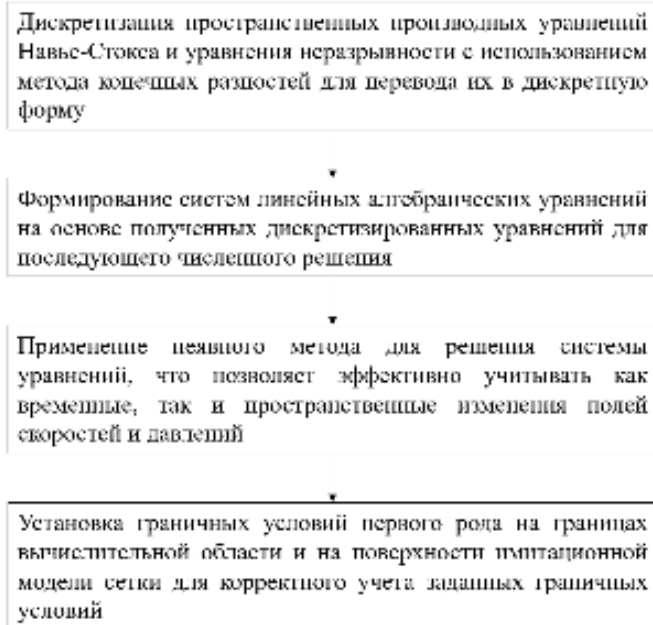


Рис. 4. Алгоритм расчета гидродинамики узловой дели

Алгоритм расчета гидродинамики узловой дели является универсальным, его можно применять в различных инженерных и научных областях, требующих анализа гидродинамических процессов.

Алгоритм представляет собой комплексный подход к численному решению уравнений Навье-Стокса и уравнения неразрывности в гидродинамике. Использование дискретизации и линейной алгебры обеспечивает численную стабильность и эффективность решения. Применение неявного метода решения системы уравнений позволяет эффективно учитывать, как временные, так и пространственные изменения полей. Установка граничных условий обеспечивает корректное моделирование реальных условий задачи.

В табл. 1 приводятся характеристики плетеных узловых делей, изготовленных из полиамида (ПА).

Таблица 1

Характеристики плетеных узловых делей ПА

Вид элемента	Модуль упругости, E , ГПа	Диаметр, d , мм	Шаг ячеи, a , мм	Отношение, d/a
Плетеный шнур ПА	2,0	6,3	48,0	0,13
Плетеный шнур ПА			63,0	0,10
Плетеный шнур ПА			77,0	0,08

Характеристики потока приведены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики потока

Жидкость	Плотность, ρ , кг/м ³	Коэффициент кинематической вязкости, ν , м ² /с	Скорость потока по оси ОХ, v , м/с	Температура, T , °С
вода	1000	$1,3 \cdot 10^{-6}$	1,0	18

Для определения полей скоростей и давлений при обтекании узловой дели потоком воды с постоянной скоростью авторами статьи были взяты три образца дели из полиамида с шагом ячеи $a=48$ мм и диаметром шнура 6,3 мм. Численный эксперимент проводился при различной посадке u_x , ориентации узлов T0 и T90, и углах атаки α .

Расчет проводился при условиях, указанных в таблице 2. При проведении численного эксперимента поток воды был направлен параллельно плоскости дели (сверху вниз по рисунку). При этом красный цвет соответствует областям высокого давления, синий – низкого.

На рисунке 5 показаны поля скоростей и давлений при обтекании узловой дели, состоящей из 9 ромбических ячеек с коэффициентом посадки $u_x=0,707$.

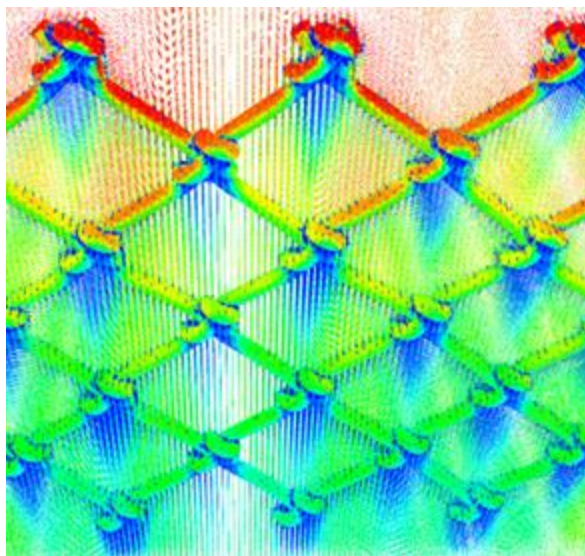


Рис. 5. Поля скоростей и давлений при обтекании узловой дели ($u_x=0,707$; $\alpha=0^\circ$)

Для анализа полей скоростей и давлений в рыболовном трале были проведены численные эксперименты на образцах узловых делей с посадкой $u_x=0,454$ при угле атаки $\alpha=20^\circ$ в сопоставлении с углом атаки $\alpha=0^\circ$. На рисунке 6 отображены результаты расчета полей скоростей и давлений при ориентации узлов T0.

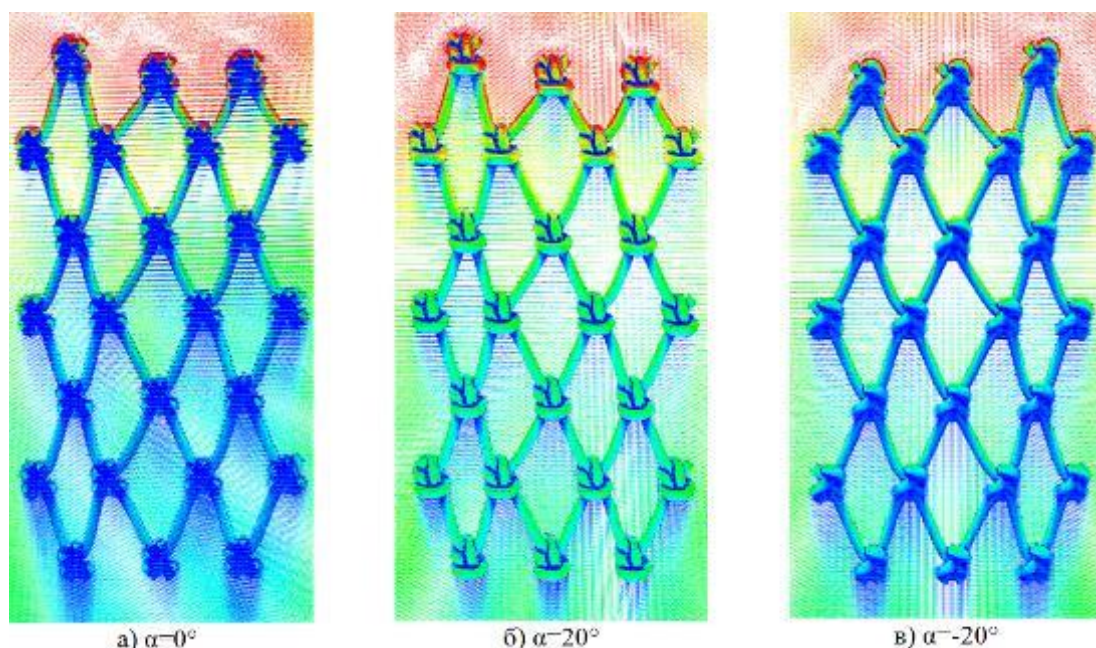


Рис. 6. Поля скоростей и давлений при обтекании узловой дели (T0; $u_x=0,454$)

Результат, показанный на рисунке 6а, получен при направлении потока воды параллельно плоскости дели аналогично предыдущему эксперименту (см. рис. 5). На рисунках 6б и 6в поток воды направлен под углом $\alpha=20^\circ$ к плоскости дели. При этом если считать, что дель является сетной частью рыболовного трала, то на рис. 6б изображена ее внутренняя сторона, а на рис. 6в – внешняя.

На рисунке 7 отображены результаты эксперимента, поставленного аналогично предыдущему (показанному на рис. 7), но при ориентации узлов T90.

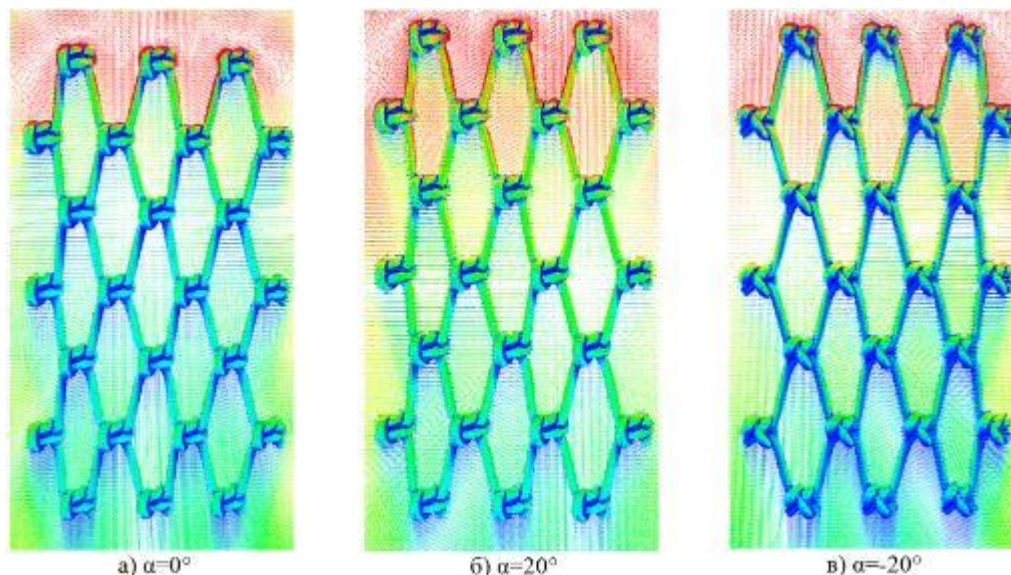


Рис. 7. Поля скоростей и давлений при обтекании узловой дели (T90; $\mu_x=0,454$)

Заключение

Результаты проведенных экспериментальных исследований сопоставимы с эмпирическими данными, полученными учеными из разных стран. Насколько численная модель соответствует физической, главным образом зависит от корректности разработанной программы. Она должна учитывать все факторы взаимодействия окружающей среды с сетчатой конструкцией [9, 10].

Исследование выполнено в рамках выполнения государственного задания по теме «Разработка физических, математических и предсказательных моделей процессов эксплуатации донного и разноглубинного траловых комплексов».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Herrmann, B., Stepputtis, D., Nilsson, H.C., Wienbeck, H., Einarsson, H. et al. 2011. Report of the Study Group on Turned 90° Codend Selectivity, focusing on Baltic Cod Selectivity (SGTCOD). International Council for the Exploration of the Sea, No. SSGESST:08, 40 pp.
2. Digre, H., Hansen, U.J. & Erikson, U. Effect of trawling with traditional and 'T90' trawl codends on fish size and on different quality parameters of cod *Gadus morhua* and haddock *Melanogrammus aeglefinus*. *Fish Sci* 76, 549–559 (2010). <https://doi.org/10.1007/s12562-010-0254-2>
3. Недоступ А.А. Экспериментальная гидромеханика орудий рыболовства. М.: Моркнига, 2014. - 363 с.
4. Белов В.А. Гидродинамика нитей, сетей и сетных орудий лова. Калининград: Изд. ОАО МариНПО и Калининградского технического университета. 2000. -202 с.
5. Недоступ, А.А. Численные эксперименты в гидродинамике сетчатых конструкций / А.А. Недоступ, А.О. Ражев, Е.И. Сергеев // Седьмая международная научно-практическая конференция «Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем» (ИКМ МТМТС-2023). Труды конференции (ISBN 978-5-6050031-8-2). – СПб.: ИПК «НП-Принт», 2023. – С.155-162.
6. Недоступ, А.А. Математическая модель взаимодействия распорной траловой доски с водной средой / А.А. Недоступ, А.О. Ражев // Морские интеллектуальные технологии. - 2017. - Т.1., №3 (37). - С. 154–157.
7. Zhou, C. Hydrodynamic characteristics of knotless nylon netting normal to free stream and effect of inclination / C. Zhou, L. Xu, F. Hu, X. Qu // *Ocean Eng.* 2015. 110, P. 89–97.

8. Деги, Д.В. Численное решение уравнений Навье - Стокса на компьютерах с параллельной архитектурой / Д.В. Деги, А.В. Старченко // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. - 2012. - № 2. - С. 88-98.

9. Zou, B. Flow field and drag characteristics of netting of cruciform structures with various sizes of knot structure using CFD models. / B. Zou, N.N.B. Thierry, H.Tang, L.Xu, C. Zhou, X. Wang, S. Dong, F. Hu // Appl. Ocean Res. - 2021. - 106, 102466.

10. You, X. Resistance performance and uidow investigation of trawl plane netting at small angles of attack / X. You, F. Hu, Y. Takahashi, D. Shiode, S. Dong // Ocean Eng. - 2021. - 236, 109525.

ANALYSIS OF HYDRODYNAMIC BEHAVIOR OF KNOTTING NETTING

¹Nedostup Aleksandr Alekseevich, associate professor, PhD in Technical Sciences

²Razhev Alexey Olegovich, leading researcher, Candidate of Technical Sciences

³Konovalova Karina Vitalyevna, graduate student

⁴Sergeev Egor Ilch, graduate student

^{1,2,3,4}Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,

e-mail: ¹nedostup@klgtu.ru; ²aleksej.razhev@klgtu.ru; ³karina.konovalova4382@mail.ru;

⁴pyrojaeger@gmail.com

The paper considers the use of numerical method to determine the hydrodynamic properties of knotting netting with different mesh rotation: T0 (standard mesh arrangement), T90 and T45 (T0 deployed by 90° and 45°, respectively). In order to develop a mathematical model based on Navier-Stokes equations, the web was schematized. The calculation was performed on a regular computational grid by implicit finite-difference scheme using methods of coordinate splitting, linearization of nonlinear equations with subsequent correction of nonlinear coefficients. The paper presents the results of numerical experiments in the form of visualization of pressure on the surface of various mesh structures at different angles of attack.

ПРИБЛИЖЕННОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЯГИ НА ШВАРТОВЫХ МАЛОМЕРНОГО РЫБОЛОВНОГО СУДНА

¹Недоступ Александр Алексеевич, доцент, канд. техн. наук,
заведующий кафедрой промышленного рыболовства

²Сергеев Егор Ильич, аспирант кафедры промышленного рыболовства

³Насенков Павел Владимирович, ст. преподаватель кафедры промышленного
рыболовства

⁴Коновалова Карина Витальевна, аспирантка кафедры промышленного рыболовства

⁵Волошин Артур Александрович, магистрант кафедры промышленного рыболовства

^{1,2,3,4,5}ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,
Калининград, Россия, e-mail: ¹ nedostup@klgtu.ru

Рассматривается методика приближенного обоснования тяги на швартовых маломерного рыболовного судна. Для маломерного флота актуальна информация о тяге на швартовых рыболовных судов, а также для транспортных судов, которые задействованы для буксировки рыболовных лодок в прибрежной зоне, а также во внутренних водоемах Российской Федерации. Современное состояние маломерного рыболовного флота представляет собой устаревшие суда, которые требуют постоянного ремонта. Президент РФ Владимир Путин поддержал предложение о необходимости обновления маломерного флота для Балтийского, Каспийского, Азово-Черноморского бассейнов. С такой инициативой обратился руководитель рыболовецкого колхоза Калининградской области на встрече президента с представителями агропромышленного комплекса 5 марта. Одной из важных характеристик рыболовного судна является его тяга на швартовых. Не всегда возможно по математическим зависимостям определить тягу на швартовых маломерного судна, так как в математические модели входят эмпирические коэффициенты, которые получены не для всего диапазона характеристик типов рыболовных судов, их двигателей и типов винтов. Это ограничивает использование математического аппарата для обоснования тяги на швартовых рыболовного маломерного судна. Приводятся приближенные зависимости тяги на швартовых рыболовного маломерного судна.

Располагаемая тяга рыболовного судна P_p является важной характеристикой для обоснования выбора рыболовного трала или другого активного орудия рыболовства, а также для выбора транспортного судна [4]. На рис. 1 приводится схема прямолинейного движения рыболовного (а) и транспортного (б) судна.

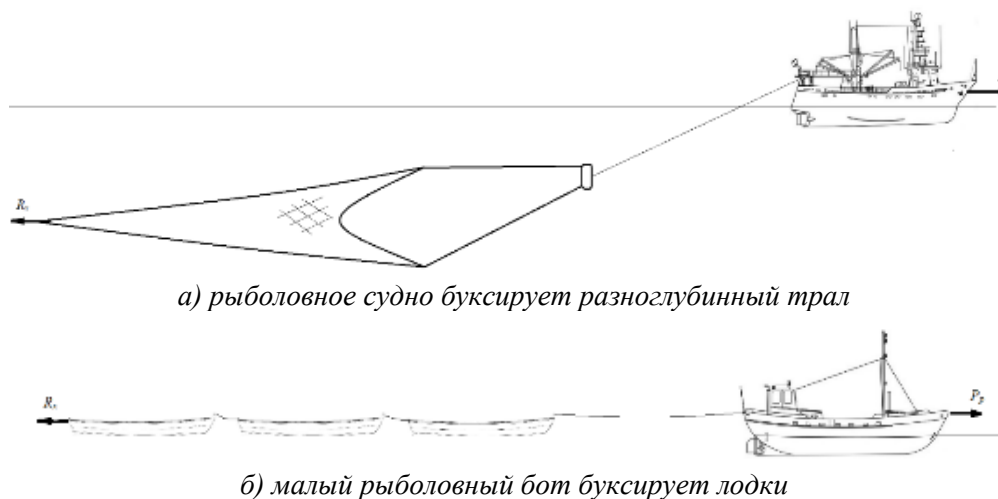


Рис. 1. Схематизация выражения $P_p \geq R_x$

На рис. 1 изображена схематизация выражения

$$P_p \geq R_x, \quad (1)$$

- для варианта (а) судно буксировщик, в данном случае малый рыболовный траулер, должен буксировать трал с заданной скоростью v , который создает агрегатное сопротивление R_x ;

- для варианта (б) судно буксировщик, в данном случае малый рыболовный бот, должен буксировать лодки с определенной скоростью v , которая позволяет перевозить улов с минимальными затратами на топливо и безопасностью перевозок, при этом создает сопротивление лодок R_x .

Выражение (1) запишем в виде

$$P_p(v) \geq R_x(v), \quad (2)$$

так как и P_p и R_x зависят от скорости буксировки v для одних и тех же тралов и лодок, при условии постоянного раскрытия устья трала и постоянной осадки лодок.

Для маломерного флота актуальна информация о располагаемой тяге рыболовных судов, а также для транспортных судов, которые задействованы для буксировки рыболовных лодок в прибрежной зоне, а также во внутренних водоемах Российской Федерации. Современное состояние маломерного рыболовного флота представляет собой устаревшие суда, которые требуют постоянного ремонта. Президент РФ Владимир Путин поддержал предложение о необходимости обновления маломерного флота для Балтийского, Каспийского, Азово-Черноморского бассейнов. С такой инициативой обратился руководитель рыболовецкого колхоза Калининградской области на встрече президента с представителями агропромышленного комплекса 5 марта 2024 г. Одной из важных характеристик рыболовного судна является его располагаемая тяга. Не всегда возможно по математическим зависимостям определить располагаемую тягу маломерного судна, так как в матмодели входят эмпирические коэффициенты, которые получены не для всего диапазона характеристик типов рыболовных судов, их двигателей и типов винтов. Это ограничивает использование матаппарата для обоснования располагаемой тяги рыболовного маломерного судна.

Для определения методики приближенного обоснования располагаемой тяги маломерного рыболовного судна и транспортного судна воспользуемся рядом экспериментальных данных, полученных на основе проведенных опытов с моделями рыболовных судов [1], плавучих якорей [3] и разноглубинных тралов [3].

Проведение эксперимента по определению тяги на швартовых маломерного рыболовного судна представлены на 1 и 2 рис.



Рис. 1. Проведение эксперимента с катамараном



Рис. 2. Проведение эксперимента с катамараном

Для сопоставления тяги на швартовых с номинальной мощностью на валу электромотора необходимо рассчитать относительный шаг винта при максимальной скорости движения модели судна.




$$h = \frac{v_{\max}}{nD}, \quad (1)$$

где v_{\max} - максимальная скорость судна; n - частота оборотов вала винта; D - диаметр винта.

Рассмотрим тягу на швартовых молей судов (см. табл. 1).

Таблица 1

Тяга на швартовых молей судов

Модель судна	Тип винта, диаметр винта D , количество лопастей, $n_с$	Номинальная мощность, потребляемая электродвигателем, N Вт	Номинальная мощность на валу электродвигателя, $N_с$ Вт	Частота оборотов электродвигателя при номинальной мощности, n , Гц	Количество моторов n_m	Тяга на швартовых, Z_0 Н	Максимальная скорость, v_{\max} м/с	Относительный шаг винта h
Модель катера Syma Q1 Speedboat RTR 2.4G SYMA-Q1	 Скоростной, $D=34$ мм, $n_с=2$	43,2	23,4	480	1	6,0	1,06	0,065
Модель катамарана, состоящего из двух моделей катеров Syma Q1 Speedboat RTR 2.4G SYMA-Q1					2	12,0	1,1	0,067
Модель катера Syma Q1 Speedboat RTR 2.4G SYMA-Q1	 Скоростной, $D=28$ мм, $n_с=3$				1	5,0	0,78	0,058
Модель катамарана, состоящего из двух моделей катеров Syma Q1 Speedboat RTR 2.4G SYMA-Q1					2	10,0	0,83	0,061
Модель лодки «Wyatboat - 430»				280	1	1,0	0,38	0,020
					2	2,0	0,48	0,025
					3	3,0	0,53	0,028
					2	2,0	0,35	0,018
					4	4,0	0,5	0,027

Модель судна	Тип винта, диаметр винта D , количество лопастей, n_e	Номинальная мощность, потребляемая электродвигателем, N Вт	Номинальная мощность на валу электродвигателя, N_e Вт	Частота оборотов электродвигателя при номинальной мощности, n , Гц	Количество моторов n_m	Тяга на швартовых, Z_0 Н	Максимальная скорость, v_{max} м/с	Относительный шаг винта h
Модель катамарана, состоящего из двух моделей лодок «Wyatboat - 430»	Скоростной, $D=39$ мм, $n_e=3$				6	6,0	0,55	0,029

На основании данных табл. 1 и данных, приведенных в [2] построим приближенные графики зависимости.

$$Z_0 = f(N_e, h, n_e). \quad (2)$$

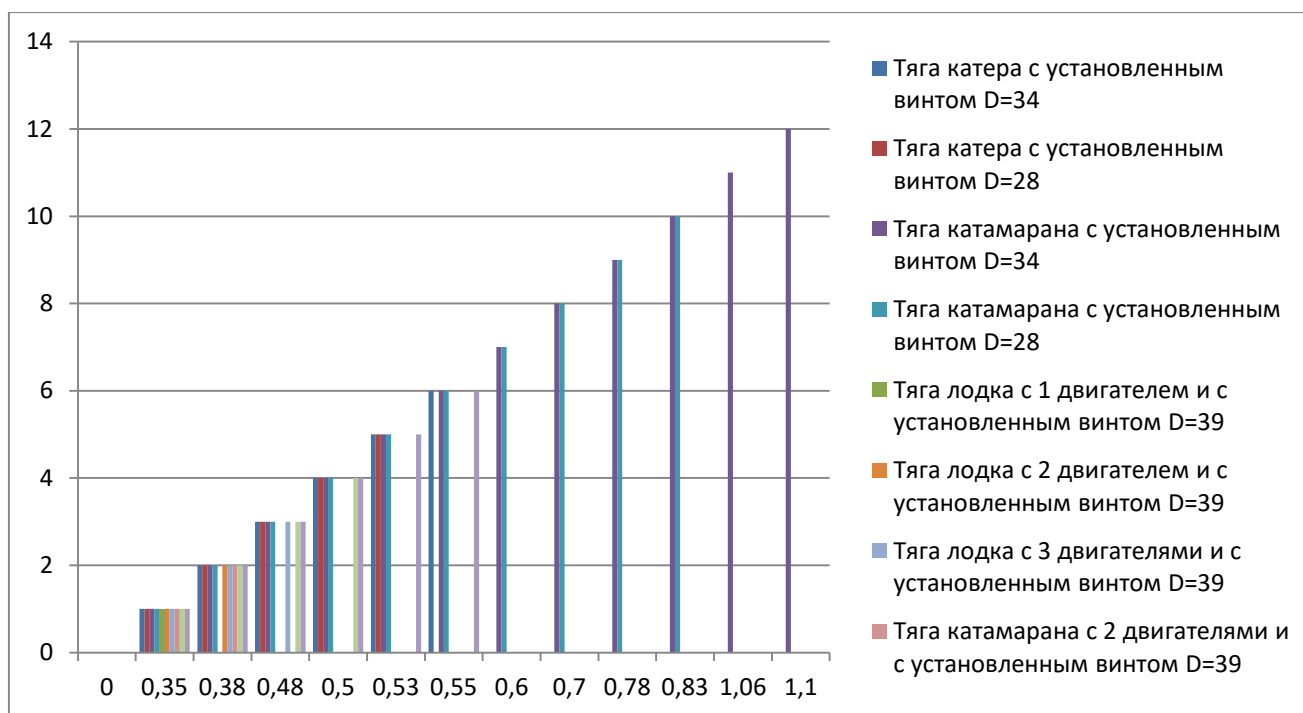


Рис. 3. Графики зависимости $Z_0=f(N_e, h, n_e)$

Приводятся приближенные линейные зависимости располагаемой тяги рыболовного маломерного судна от скорости движения и буксировки.

Исследование выполнено в рамках выполнения государственного задания по теме «Разработка физических, математических и предсказательных моделей процессов эксплуатации донного и разноглубинного траловых комплексов».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев Г.М. Особые случаи морской практики. Ленинградское высшее инженерное морское училище им. адмирала С.О. Макарова. Издательство «Морской транспорт». М. 1959. 339 с.
2. <https://sea-man.org/raschet-tyagovoy-harakteristiki.html>
3. Самбаев Н.С. Промысловое состояние на Шардаринском водохранилище и применяемые орудия лова/ Каспий и глобальные вызовы: материалы Международной научно-практической конференции. Секция 5. Приоритетные направления развития аквакультуры в Прикаспии. - Астрахань. - 2022. - С. 568-574.
4. Радциг А.Н. Экспериментальная гидроаэромеханика. - М.: Издательство МАИ, 2004. - 296 с.

APPROXIMATE JUSTIFICATION OF THE MOORING PULL OF A SMALL FISHING VESSEL

¹Alexander Alekseevich Nedostup, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Commercial Fisheries

²Sergeev Egor Ilyich, postgraduate student of the Department of Commercial Fisheries

³Pavel Vladimirovich Nasenkov, senior lecturer, Department of Commercial Fishing

⁴Konovalova Karina Vitalievna, postgraduate student of the Department of Commercial Fisheries

⁵Voloshin Arthur Alexandrovich, master's degree student of the Department of Commercial Fisheries

^{1,2,3,4,5}Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,
e-mail: nedostup@klgtu.ru

This paper considers the methodology of approximate justification of the draught on moorings of a small-sized fishing vessel. For small-size fleet the information about the draught on mooring fishing vessels is relevant, as well as for transport vessels, which are involved in towing fishing boats in the coastal zone, as well as in the inland waters of the Russian Federation. The current state of the small fishing fleet is represented by outdated vessels that require constant repairs. The President of the Russian Federation Vladimir Putin supported the proposal on the necessity to renew the small-size fleet for the Baltic, Caspian, Azov-Black Sea basins. Such an initiative was addressed by the head of a fishing collective farm of the Kaliningrad region at the meeting of the President with representatives of the agro-industrial complex on March 5. One of the important characteristics of a fishing vessel is its mooring pull. It is not always possible to determine the mooring pull of a small-sized vessel by mathematical dependences, as mathematical models include empirical coefficients, which are not obtained for the whole range of characteristics of fishing vessel types, their engines and propeller types. This limits the use of the mathematical apparatus for justification of the mooring thrust of a fishing small-sized vessel. Approximate dependences of the mooring thrust of a small fishing vessel are given.

АНАЛИЗ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТАВА РЫБОЛОВНЫХ НИТЕВИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

¹Пивоварова Юлия Сергеевна, аспирант кафедры промышленного рыболовства

²Бачинский Александр Алексеевич, студент кафедры промышленного рыболовства

^{1,2}ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,
Калининград, Россия, e-mail: ¹yuliya.pivovarova@klgtu.ru

Представлен обзор и анализ основных видов спектрометров для исследования рыболовных нитевидных материалов, применяемых для изготовления орудий промышленного рыболовства. При помощи спектрометра возможно проводить более точный и детальный анализ химического состава материала и его структуры при производстве рыболовных нитевидных изделий.

В промышленном рыболовстве при изготовлении орудий лова в настоящее время применяются современные синтетические материалы. На ряду с развитием науки, в частности химии, физики, термодинамики, появлением более точных новых приборов, позволяющих проводить разнообразные, глубокие исследования в изучении технологии волокон, в промышленном рыболовстве началась новая эпоха применения современных материалов. Орудия лова подвержены специфическим условиям эксплуатации, в процессе которых они испытывают динамические нагрузки, которые в разы превышают статистические нагрузки. И как следствие, тщательный анализ материала из которого изготавливаются орудия промышленного рыболовства, необходим для обеспечения безопасного и эффективного рыболовства.

Спектрометр – это аналитический прибор, который предназначен для накопления спектра, его количественной обработки, анализа спектра света и других характеристик электромагнитного излучения. Анализируемый спектр получается путем регистрации флуоресценции после воздействия на исследуемое вещество каким-либо излучением (рентгеновским или лазерным излучением, искровым воздействием и др.). Прибор позволяет исследовать распределение интенсивности излучения в зависимости от его длины волны или частоты, а также может регистрировать и другие характеристики, например, поляризационное состояние. Работает он в широком диапазоне длин волн: от гамма до инфракрасного диапазона. Спектрометры бывают разных типов и используются в различных областях, от астрономии до химической промышленности, в текстильной промышленности и сельском хозяйстве, а также приборы можно встретить в криминалистических и судебно-медицинских лабораториях.

Рынок аналитического оборудования представлен множеством фирм, компаний и организаций, занимающихся производством, реализацией и обслуживанием спектрометров. Спектрометры предназначены для проведения исследований с различными по составу, структуре, плотности материалов. Приведем несколько видов спектрометров для анализа нитевидных рыболовных материалов.

Оптические спектрометры. Оптические спектрометры используют принцип анализа света, проходящего через образец или отражающегося от него, для определения химического состава. Эти устройства работают в различных диапазонах, включая ультрафиолетовый (УФ) и инфракрасный (ИК) спектры. Ультрафиолетовая спектроскопия фокусируется на анализе поглощения света в УФ-диапазоне, что позволяет идентифицировать и количественно оценить органические соединения. Инфракрасная спектроскопия изучает спектры поглощения и испускания ИК-излучения, что раскрывает информацию о молекулярном составе веществ.

Инфракрасный фурье-спектрометр ФСМ 2201/2202 (рис.1) используется в различных отраслях промышленности с целью проведения разных видов экспертиз.

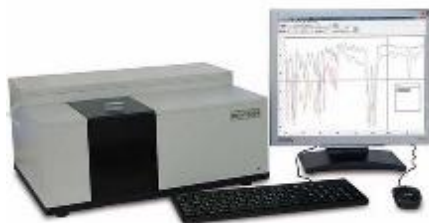


Рис.1. Инфракрасный фурье-спектрометр ФСМ 2201/2202

Таблица 1

Технические характеристики инфракрасного фурье-спектрометра ФСМ 2201/2202

Спектральный диапазон, см ⁻¹	370-7800
Спектральное разрешение, см ⁻¹	1,0 (ФСМ 2201) и 0,5(ФСМ 2202)
Отношение сигнал/шум (время измерения 1 мин в интервале 2100-2200 см ⁻¹ и разрешении 4 см ⁻¹)	>60 000
Минимальное время получения одного полного спектра менее, с	1
Светоделитель	КВг с покрытием на основе Ge
Источник излучения	Высокотемпературный металлокерамический
Детектор	Пироприемник DLATGS
Размеры кюветного отделения, мм	150x190x170
Габаритные размеры, мм	520x370x250
Масса, кг.	28

Универсальные лабораторные ИК фурье-спектрометры ФСМ 2201 и ФСМ 2202 предназначены для проведения научных исследований и аналитических измерений в средней инфракрасной области спектра, определения качественного и количественного анализа образцов органических и неорганических веществ в газообразном, жидком и твердом состоянии, в том числе, пленок и порошков. В области химии полимеров позволяют определить состав сополимеров; структурные характеристики синтетического каучука; провести анализ модифицированных добавок таких как антиоксиданты и пластификаторы.

Универсальный измерительный спектрофотометр Agilent Cary 7000 UMS (рис.2) позволяет анализировать все виды твердых образцов, при этом обеспечивая непревзойденную воспроизводимость и точность результатов.



Рис.2. Универсальный измерительный спектрофотометр Agilent Cary 7000 UMS

**Технические характеристики
универсального измерительного спектрофотометра Agilent Cary 7000 UMS**

Параметр	Ед. измерения	Значение
Источник		Вольфрам-галогенная и дейтериевая лампы
Оптическая схема		Двухлучевая, двойной монохроматор Литтро
Дифракционная решётка	мм	
УФ-Ви	линий/мм (конц., нм)	
БИК	линий/мм (конц., нм)	
Спектральный диапазон	нм	175...3300
Ширина полосы, УФ-Вид	нм	0,01...5,00 с шагом 0,1
Точность длин волн, УФ-Вид	нм	
Воспроизводимость длин волн, УФ-Вид	нм	
Макс. скорость сканирования, УФ-Вид	нм/мин	
Фотометрическая точность, при 0,3 А		
Фотометрический шум, УФ-Вид		
Фотометрическая стабильность	А/ч	
Фотометрический диапазон		А
Кюветное отделение	см	
Габариты, (Ш×Г×В)	см	
Вес	кг	
Виды измерений		Полное зеркальное отражение, диффузное рассеяние, зеркальное отражение, пропускание, рассеянное пропускание, частично рассеянное пропускание

Данный спектрофотометр полностью приспособлен для работы с твердыми образцами. За короткий промежуток времени регистрируются сотни спектров в удобном формате при разовой загрузке образца.

Оптические спектрометры обладают рядом преимуществ и недостатков.

К преимуществам можно отнести следующее: ИК-спектроскопия обеспечивает анализ образцов без их разрушения, что позволяет сохранить материалы для дальнейшего использования. Подробное молекулярное исследование - ИК-спектроскопия предоставляет ценную информацию о молекулярной структуре материалов, что способствует улучшению качества и полезных свойств продукции. Быстрота и эффективность - этот метод позволяет быстро получать результаты, что существенно экономит время. Неинвазивность.

К недостаткам можно отнести следующее: ограничения на анализ некоторых соединений, т.е. не все материалы могут быть эффективно проанализированы с помощью ИК-спектроскопии, особенно если они не активны в ИК-диапазоне. Сложность интерпретации данных - требуется высокая квалификация для анализа и интерпретации спектральных данных, что может усложнить использование для неподготовленных пользователей.

Масс-спектрометры. Масс-спектрометрия является мощным инструментом в арсенале аналитической химии, предоставляющим возможность точного определения молекулярной массы и структуры различных веществ. Метод базируется на ионизации образцов, последующем разделении полученных ионов в электрическом и магнитном полях по отношению массы к заряду и их детектировании. С помощью масс-спектрометра возможно определить состав полимеров, выявив присутствие добавок, стабилизаторов или загрязнителей на молекулярном уровне, что критически важно для обеспечения прочности, эластичности и долговечности орудий лова. На основе полученных данных можно анализировать структурные изменения в материалах после их эксплуатации, что поможет в дальнейшем при создании более надежных и устойчивых к условиям рыбной ловли изделий.

Масс-спектрометр с ионизацией образца на зонде DPiMS-2020 (рис.3), прост в эксплуатации с прямым вводом пробы. С помощью него можно проводить анализ продуктов химической промышленности, пищевых продуктов, биологических образцов без пробоподготовки или с минимальной пробоподготовкой.



Рис. 3. Масс-спектрометр с ионизацией образца на зонде DPiMS-2020

Таблица 3

Технические характеристики масс-спектрометра с ионизацией образца на зонде DPiMS-2020

Массовый диапазон	м/з от 2 до 2000
Разрешение	R < 0,7 и FWHM и регулируется до 0,5 и
Скорость сканирования	макс. 30 000 и/сек (во всех режимах сканирования) (шаг 0,1 и: 300 000 точек данных/сек)
Время переключения положительной-отрицательной ионизации	5 мс
Скорость перехода MRM	макс. 555 каналов/сек

Масс-спектрометры обладают как преимуществами, так и недостатками.

К преимуществам можно отнести высокую точность и чувствительность. Масс-спектрометрия способна идентифицировать молекулы и определять их массу с высокой точностью, что делает её незаменимым инструментом для детального анализа сложных смесей. Помимо определения массы, метод позволяет получить информацию о структуре молекул, выявляя способы связи и функциональные группы. Позволяет провести анализ больших молекул - эффективна для изучения полимеров, благодаря способности анализировать молекулы с большой молекулярной массой.

К недостаткам можно отнести следующее: сложность анализа, т.к. требуются высококвалифицированные специалисты для правильной подготовки образцов для некоторых видов масс-спектрометров, работы с оборудованием и интерпретации результатов. Высокая стоимость. Масс-спектрометры и их обслуживание являются дорогостоящими, что может ограничить доступность метода для некоторых исследовательских групп или небольших производств.

Рентгеновские спектрометры. Рентгеновские спектрометры занимают уникальное место в мире аналитической техники, предлагая возможность глубокого анализа элементного состава образцов с использованием рентгеновского излучения. Этот метод основан на измерении энергии и интенсивности рентгеновских лучей, рассеянных или поглощенных образцом. Так, каждый элемент в образце характеризуется уникальными рентгеновскими "отпечатками пальцев", что позволяет точно идентифицировать состав любой данной пробы.

Универсальный рентгенофлуоресцентный энергодисперсионный спектрометр РЕАН (рис.4) предназначены для быстрого неразрушающего рентгенофлуоресцентного элементного анализа твёрдых, жидких и порошковых веществ. Измерения возможно проводить как подготовленных монокристаллических, порошковых и прессованных в таблетки проб, так и образцов без предварительной пробоподготовки любых размеров и форм.



Рис. 4. Универсальный рентгенофлуоресцентный энергодисперсионный спектрометр PEAN

Таблица 4

**Технические характеристики
универсального рентгенофлуоресцентного энергодисперсионного спектрометра PEAN**

Тип рентгеновской трубки	С боковым окном
Максимальный режим источника питания рентгеновской трубки	Ua до 50 кВ; Ia до 1 мА; P до 50 В·А
Материал анода рентгеновской трубки	Rh (Mo, W, Ag – опционально, согласуется с заказчиком)
Коллимация рентгеновского пучка	от 1 мм до 8 мм
Детектор	Кремниевый дрейфовый с электроохлаждением
Энергетический диапазон	1 – 40 кэВ
Энергетическое разрешение	< 130 эВ (по линии MnK α)
Атмосфера камеры образцов	Воздух Вакуум (P < 0,9 мм рт. ст.) Гелий
Радиационная безопасность	Освобожден от контроля в соответствии с экспертным заключением
Потребляемая мощность от сети 220 В	Без форвакуумного насоса: не более 500 Вт С насосом*: не более 1000 Вт
Габаритные размеры аналитического блока	555 × 565 × 265 мм
Масса аналитического блока	46 кг
Интерфейс с персональным компьютером	USB
Поддержка операционных систем	Windows

Рентгеновские спектрометры обладают рядом преимуществ и недостатков.

К преимуществам можно отнести высокую чувствительность и точность. Рентгеновские спектрометры способны обнаруживать и количественно определять элементы в очень низких концентрациях, что делает этот метод неоценимым для точного элементного анализа. Возможность анализа разнообразных образцов. Такие устройства могут анализировать широкий спектр материалов, от металлов и сплавов до полимеров и керамики, без необходимости в сложной предварительной подготовке образца. Быстрота получения результатов. Анализ с помощью рентгеновских спектрометров часто занимает меньше времени по сравнению с другими методами, предоставляя быстрые и надежные данные.

К недостаткам можно отнести сложности с легкими элементами. Метод может быть менее эффективен для определения легких элементов (например, водорода, углерода и азота), из-за их низкой рентгеновской плотности. Необходимость защиты. Работа с рентгеновскими лучами требует строгих мер безопасности для защиты оператора и окружающих от потенциального воздействия радиации. Высокая стоимость оборудования. Инструментарий для рентгеновской спектроскопии может быть довольно дорогим в покупке и обслуживании, что ограничивает его доступность для некоторых исследовательских групп или малых предприятий.

Ядерные магнитно-резонансные (ЯМР) спектрометры. Ядерные магнитно-резонансные спектрометры представляют собой один из самых мощных и информативных инструментов для анализа молекулярной и кристаллической структуры веществ. Метод ЯМР исследования основан на явлении ядерного магнитного резонанса: при воздействии на образец магнитным полем и радиочастотным излучением ядра атомов в веществе поглощают радиоволны и излучают их обратно, что позволяет получить информацию о молекулярной структуре образца.



Рис. 5. ЯМР спектрометр ECZ Luminous (серия JNM-ECZL)

Таблица 5

Технические характеристики ЯМР спектрометр ECZ Luminous (серия JNM-ECZL)

Частота	400 МГц - 1,3 ГГц
Тип образца	Раствор / Твердое вещество
Количество каналов	2 (стандарт)
Усилитель мощности	100 Вт (стандарт)
Высокая частота	200/500/1000 Вт (опция)
Усилитель мощности	300 Вт (стандарт)
Низкая частота	500/1000/2000 Вт (опционально)
Усилитель градиента магнитного поля	10 А (стандарт)
	30/50 А (опция)
Размер консоли Ш×Г×В	600×855×1279 мм

Спектрометр ядерного магнитного резонанса (ЯМР) является аналитическим инструментом, который может обнаружить мельчайшие изменения атомных ядер и электронов, составляющих вещество. И на основе, содержащейся в них информации, они могут анализировать молекулярную структуру веществ на атомном уровне и прояснять различные вопросы, возникающие в нашей повседневной жизни.

Ядерные магнитно-резонансные (ЯМР) спектрометры обладают рядом преимуществ и недостатков.

К преимуществам можно отнести то, что ЯМР спектроскопия применима к широкому спектру веществ, от небольших органических молекул до биополимеров и комплексных порядков. Данный метод исследования не требует разрушения образца для анализа, что позволяет сохранять исследуемые вещества в первоначальном состоянии. ЯМР спектрометры позволяют с высокой точностью изучать внутреннее строение молекул, включая расположение атомов, характер связей и даже конформационное пространство молекул. Это дает возможность понять молекулярные механизмы процессов, происходящих в веществах.

К недостаткам относится высокая стоимость ЯМР спектрометров как в приобретении, так и в обслуживании. При работе с данным спектрометром требуется специальная подготовка. Для эффективного использования ЯМР спектрометров и интерпретации получаемых данных требуются специализированные знания и опыт. Для проведения некоторых типов ЯМР анализа требуются большие количества образца, что может быть ограничивающим фактором при работе с редкими или дорогими веществами.

Флуоресцентные спектрометры. Флуоресцентные спектрометры являются ключевыми инструментами в исследованиях, связанных с флуоресценцией, позволяя исследователям с высокой точностью определять концентрацию и свойства флуорофоров в растворах. Эти устройства измеряют интенсивность флуоресценции, возникающей, когда флуорофоры (свойства веществ, заставляющих их светиться при освещении) возбуждаются светом определенной длины волны. Величина и спектральная характеристика испускаемого света могут дать ценную информацию о концентрации флуорофора и его молекулярном окружении.

Настольный многофункциональный флуоресцентный спектрометр OmniFluo-900 с возможностью измерения времени жизни и квантового выхода флуоресценции представлен на рис.6.



Рис. 6. Настольный флуоресцентный спектрометр OmniFluo-900

Таблица 6

Технические характеристики настольный флуоресцентный спектрометр OmniFluo-900

Спектральный диапазон эмиссии	350-2500 (другие диапазоны в пределах 200-5500 по запросу) нм
Спектральный диапазон возбуждения	200-1100 нм
Отношение сигнал/шум (рамановский спектр воды)	> 10500:1
Частотный диапазон синхронного усилителя	50 мкГц - 120 кГц
Измеряемые характеристики в программном обеспечении	спектры возбуждения, спектры эмиссии, синхронизованное сканирование возбуждения и эмиссии, время-разрешенное спектральное сканирование, измерение квантового выхода люминесценции, спектральная калибровка, измерение поляризации, температурное картирование

Модульная спектральная система OmniFluo предназначена для широкого спектра научных задач, требующих частого изменения параметров эксперимента.

Флуоресцентные спектрометры обладают рядом преимуществ и недостатков.

К преимуществам относится чувствительность методов, позволяющая обнаруживать очень низкие концентрации флуорофоров в образце. Благодаря использованию специфических возбуждающих и излучаемых длин волн, флуоресцентные спектрометры способны выделить сигналы конкретных флуорофоров даже в сложных смесях. Возможность оперативного анализа. Эти методы позволяют проводить быстрые измерения, что делает их идеальными для мониторинга изменений в реальном времени, например, в биохимических и медицинских экспериментах.

К недостаткам можно отнести влияние внешних факторов. Результаты флуоресцентного анализа могут быть подвержены влиянию внешних факторов, таких как pH раствора, его ионная сила и присутствие других флуоресцирующих веществ, что требует точного контроля экспериментальных условий. Фотообесцвечивание. При длительном освещении некоторые флуорофоры могут терять свои флуоресцентные свойства, что снижает точность измерений при повторных или длительных экспериментах. Ограничение по анализу твердых образцов. Большинство флуоресцентных спектрометров оптимизировано для анализа растворов, а анализ твердых образцов может быть более сложным и менее точным без специального оборудования.

В рамках нашего обзора мы рассмотрели несколько видов спектрометрических методов, включая оптические (с упором на УФ и ИК спектроскопию), масс-спектрометрию, рентгеновскую спектрометрию, ядерно-магнитно-резонансную спектроскопию, а также флуоресцентную спектроскопию. Каждый метод имеет свои уникальные преимущества и недостатки, однако целью данной работы было выявить наиболее подходящий инструмент для анализа материалов, используемых в рыболовных орудиях лова, таких как полиамид, полиэстер, полиэтилен, полипропилен и др.

Из всех рассмотренных методов инфракрасная (ИК) спектроскопия выделяется как наиболее соответствующий нашим задачам. Главным образом это обусловлено неинвазивным характером метода, способностью к быстрому получению точных данных о химическом составе и структуре исследуемых материалов без необходимости их разрушения. ИК-спектроскопия особенно ценна для

идентификации и анализа полимерных материалов, составляющих основу современных рыболовных снастей. Этот метод позволяет эффективно определять характеристики прочности, гибкости и долговечности материалов, что критически важно для целей промышленного рыболовства.

Ключевым преимуществом ИК-спектроскопии перед другими методами является её универсальность и высокая эффективность в анализе широкого спектра материалов, что делает её незаменимым инструментом в разработке и оптимизации рыболовных нитевидных материалов. Способность проводить глубокий и точный анализ полимеров делает ИК-спектрометрию оптимальным выбором для решения наших задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Масс-спектрометр с ионизацией образца на зонде DPiMS-2020. - URL [Электронный источник]: https://shop.christmasplus.ru/catalog/khromato_mass_spektrometry_/mass_spektrometr_s_ionizatsiey_obraztsa_na_zonde_dpims_2020/

2. Инфракрасный фурье-спектрометр ФСМ 2201/2202. – URL [Электронный источник]: <https://salusmed.spb.ru/%D0%B8%D0%BD%D1%84%D1%80%D0%B0%D0%BA%D1%80%D0%B0%D1%81%D0%BD%D1%8B%D0%B9%D1%84%D1%83%D1%80%D1%8C%D0%B5%D1%81%D0%BF%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D1%82%D1%80-%D1%84%D1%81%D0%BC-2201/2202;>

3. Масс-спектрометр SHIMADZU DPiMS-2020. - URL [Электронный источник] <https://argus-company.ru/search/126354;>

4. Рентгеновские спектрометры. - URL [Электронный источник]: [https://spectr-lab.ru/catalog/analiticheskie-pribory/rentgenovskie-spektrometry/;](https://spectr-lab.ru/catalog/analiticheskie-pribory/rentgenovskie-spektrometry/)

5. ООО «Джеол»: Ядерные магнитно-резонансные спектрометры – URL [Электронный источник]: [https://www.jeol.com/products/scientific/feature_nmr/;](https://www.jeol.com/products/scientific/feature_nmr/)

6. OmniFluo-900 - время-разрешенный настольный флуоресцентный спектрометр. -URL [Электронный источник]: [https://sphotonics.ru/catalog/fluorestantsnye-spektrometry/omnifluo-900/;](https://sphotonics.ru/catalog/fluorestantsnye-spektrometry/omnifluo-900/)

7. Универсальный измерительный спектрофотометр Agilent Cary 7000 UMS. -URL [Электронный источник]: [https://analitika.millab.ru/catalog/analiticheskoe-oborudovanie/spektralnye-pribory/spektrofotometry/cary-7000-ums/.](https://analitika.millab.ru/catalog/analiticheskoe-oborudovanie/spektralnye-pribory/spektrofotometry/cary-7000-ums/)

ANALYSIS OF EQUIPMENT FOR STUDYING THE COMPOSITION OF FISHING FILAMENTARY MATERIALS

¹Pivovarova Yuliya Sergeevna, post-graduate student of the Department of Commercial Fishing

²Bachinsky Alexander Alekseevich, student of the Department of Commercial Fishing

^{1,2}Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,
e-mail: ¹yuliya.pivovarova@klgtu.ru

The article presents an overview and analysis of the main types of spectrometers for studying fishing thread materials used to manufacture commercial fishing gear. Using a spectrometer, it is possible to conduct a more accurate and detailed analysis of the chemical composition of the material and its structure in the production of fishing thread products.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОВЕДЕНИЯ МИНТАЯ В ШУМОВОМ ПОЛЕ СУДНА

¹Поляничко Владимир Ильич, зав. сектором промысловой гидроакустики

²Кузнецов Михаил Юрьевич, канд. техн. наук, зав. лаб.

промысловой гидроакустики, технологий лова и технических средств аквакультуры

³Убарчук Игорь Анатольевич, гл. специалист, сектор промысловой гидроакустики

^{1,2,3}Тихоокеанский филиал федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии» (Тихоокеанский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («ТИНРО»)), Владивосток, Россия,

e-mail: ¹vladimir.polianichko@tinro.vniro.ru; ²mikhail.kuznetsov@tinro.vniro.ru

Представлена модель, дающая представление о воздействии шумового поля судна на поведение минтая. В модели использованы сведения о механизмах восприятия акустических полей и особенностей поведения рыб в этих полях, закономерностях ориентации особей, что дает возможность достаточно точно рассчитать траектории движения рыб в шумовом поле приближающегося к ним судна. Модель позволяет получать графическое изображение изменения плотности и структуры скопления рыб в пространственно-временных координатах.

Введение

При проведении научных исследований по оценке запасов рыб большое влияние на достоверность этих оценок оказывает поведение рыб, которое сильно зависит от шумового поля судна и проявляется в виде реакции избегания. Целью работы является разработка модели, позволяющей учитывать двигательное поведение рыб и их пространственное расположение в результате реакции избегания шумового поля судна. Это довольно сложная задача, поскольку модель должна учитывать не только основные параметры акустического поля судна и слуховые способности рыб, но и то, как эта реакция формирует поведение и распределение рыб в различных зонах промысловой системы «судно–трал» в реальном масштабе времени.

Конструкция и параметры модели двигательного поведения рыб

Модель двигательного поведения рыб в шумовом поле судна включает в себя данные о характеристиках акустического поля судна, слуховой чувствительности рыб, а также стереотипах двигательных реакций различных видов рыб на акустический стимул и их энергетических возможностях (скорости плавания).

Основные уравнения модели двигательного поведения рыб. Каждая рыба i может быть представлена набором дифференциальных уравнений, определяющих позицию (местоположение) рыб \vec{x}_i в шумовом поле судна. Эти уравнения создают конструкцию модели [1]:

$$\frac{d\vec{x}_i}{dt} = \vec{f}(t, \vec{x}_i), \quad (1)$$

\vec{x}_i содержит переменные для каждой рыбы ($i = 1, \dots, n$). Переменными в нашей модели являются уровень шума L_r , скорость \vec{V}_1 и направление движения рыб (вектор расстояния) \vec{r}_1 и их энергетический уровень (выносливость) e_i :

$$\vec{x}_i = \begin{bmatrix} L_r \\ \vec{r}_i \\ \vec{e}_i \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} \vec{x}_i = \begin{bmatrix} \Delta L_r \\ \vec{V}_i \\ \vec{e}_i \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \vec{x}_1 \\ \vec{x}_2 \\ \vdots \\ \vec{x}_n \end{bmatrix} (t + \Delta t) = \begin{bmatrix} \vec{x}_1 \\ \vec{x}_2 \\ \vdots \\ \vec{x}_n \end{bmatrix} (t) + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \vec{x}_1 \\ \vec{x}_2 \\ \vdots \\ \vec{x}_n \end{bmatrix} (t) \times \Delta t \quad (4)$$

Чтобы решить систему уравнений и определить позицию (местоположение) каждой рыбы \vec{x}_i относительно судна с заданным временным шагом (Δt) должны быть смоделированы уровень шума в точке приема, скорость и направление движения каждой рыбы относительно судна в каждый момент времени (t) при заданных порогах реакции и параметрах энергетической выносливости каждого j -го вида рыб.

Характеристики шумового поля судна. В модели шумовое поле от судна задается в виде уровня звукового давления шума в точке местоположения рыб \vec{x}_i как функция расстояния до судна:

$$L_{ri} = f(\vec{r}_i) \quad , \quad (5)$$

где \vec{r}_i – вектор расстояния от судна до i -й рыбы.

Судно представляется точечным источником, а распространение шума описывается уравнением гидролокации [2]:

$$I = I_r \frac{10^{-\alpha r}}{r^2} b(\theta) \quad , \quad (6)$$

где I – интенсивность в точке приема, I_r – интенсивность на опорном расстоянии 1 м от источника, r – расстояние от источника, α – коэффициент поглощения звука, $b(\theta)$ – направленность при угле θ от акустической оси.

Выраженное в логарифмической форме уравнение гидролокации, описывающее распространение шума до точки местоположения каждой рыбы, имеет вид:

$$L_{ri} = L_{KN} - 20 \log_{10} r_i \quad , \quad (7)$$

где L_{ri} – используемый в модели уровень звукового давления шума в точке расположения рыбы, L_{KN} – уровень шума источника в зависимости от типа судна (K) в дБ/1мкПа/1 м (рис. 1); r_i – расстояние от источника (судна) до рыбы i . Уровни шума научных и промысловых судов представлены в децибелах относительно 1 мкПа и приведены к расстоянию 1 м. Для сравнения на рисунке представлены рекомендуемые ICES уровни шума (рис. 1А).

Слуховые способности рыб. Различные биоакустические исследования слуховой системы рыб показали, что большинство промысловых видов рыб – сельдевые, тресковые, лососевые и др. обладают хорошими слуховыми способностями, позволяющими им воспринимать звуки и определять направление на их источник в широкой полосе частот и на значительных расстояниях. На рис. 1Б представлены аудиограммы – зависимости слуховых порогов рыб от частоты звука.

Как видно из рис. 1А и 1Б, частотные диапазоны с максимальной энергией спектра шумов судна и максимальной слуховой чувствительности большинства промысловых рыб совпадают, а уровни судового шума значительно превышают слуховые пороги рыб. Это означает, что в процессе съемки или промысла рыбы могут воспринимать шум судна на больших расстояниях.

Обобщение информации о слуховых способностях рыб и характеристиках подводного судового шума, создаваемого промысловыми и научно-исследовательскими судами, позволили определить пороги реакции и рассчитать дистанции реагирования различных видов промысловых рыб на шумы судов в зависимости от частотного состава, интенсивности излучаемого звука и слуховых способностей рыб [3, 4].

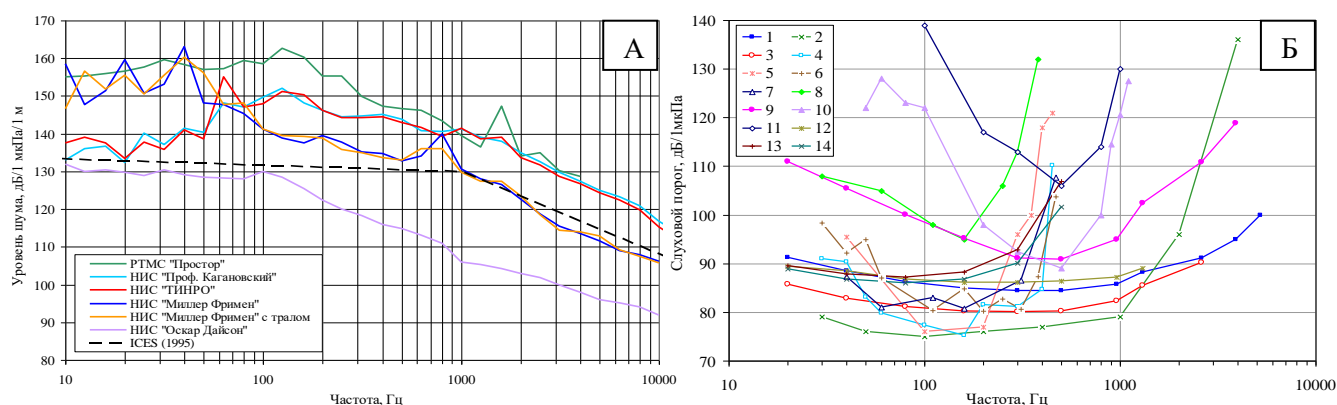


Рис. 1. Характеристики подводного шума судов (А) и аудиограммы некоторых промысловых видов рыб (Б): 1 – тихоокеанская сельдь; 2 – атлантическая сельдь; 3 – дальневосточная сардина; 4 – треска; 5 – минтай; 6 – пикша; 7 – сайда; 8 – атлантический лосось; 9 – японская скумбрия; 10 – желтоперый тунец; 11 – пятнистый тунец; 12 – красноперка; 13 – звездчатая камбала; 14 – южный одноперый терпуг

Пороги реакции и дистанции реагирования рыб. Реакция рыб в шумовом поле судна зависит от того, насколько величина звукового давления сигнала превышает окружающий шум. Поэтому в нашей модели минимальный воспринимаемый рыбами уровень шума (слуховой порог) – это фоновый шум, а уровень звукового давления, достигающий в точке приема определенного значения, превышающего фоновый шум на величину, достаточную для возникновения двигательной реакции – порог реакции.

Пороги реакции рыб на приближающееся судно определяются тремя фазами реакции: 1 – увеличение двигательной активности рыб; 2 – реакция избегания; 3 – сильная направленная реакция [3]. Слуховой порог рыб j -го вида (L_{cj}) на частоте максимальной слуховой чувствительности (f_n) определяется согласно рис. 1Б. Для большинства промысловых рыб пороговые отношения шум судна/фоновый шум составляют от 18 до 35 дБ в диапазоне частот максимальной слуховой чувствительности. Порог реакции рыб (L_{pj}) в первой фазе в зависимости от вида находится по следующей формуле [5]:

$$L_{pj} = L_{cj} + 18 \div 35 \text{ дБ} \quad (8)$$

Влияние шума на распределение рыб вокруг судна в первой фазе, видимо, несущественно, поскольку отсутствует направленное движение рыб от источника шума. Поэтому в модели скорость движения рыб относительно судна в этой фазе реакции принимается за нуль.

Чтобы получить дистанции, на которых происходит непосредственное избегание рыбами судна, т.е. вторая фаза реакции, необходимо повысить порог реакции на величину, достаточную для локализации судового шума. В модели порог реакции избегания рыб (вторая фаза) находится по формуле:

$$L_{ри} = L_{pj} + 20 \text{ дБ} \quad (9)$$

На рис. 2 представлены результаты расчетов зависимости от частоты дистанции реагирования минтая на гидроакустические шумы судов в диапазоне его слуха. Дистанции реагирования на рис. 2А соответствуют первой фазе реакции, а рис. 2Б – второй фазе реакции, когда уровень шума судна превышает порог реакции избегания и происходит направленное движение рыб от источника шума. Показано, что значительные различия в дистанции реагирования рыб на шум приближающегося судна определяет, в первую очередь уровень (интенсивность) звукового поля, излучаемого суд-

ном. Например, малошумное научно-исследовательское судно «Оскар Дайсон», построенное с учетом рекомендаций ICES по шуму, минтай способен обнаружить на значительно меньших расстояниях, чем НИС «Миллер Фримен». Шумовое поле рыбопромыслового судна РТМС «Простор» имеет максимальную дальность действия на гидробионтов. НИС «Профессор Кагановский» и НИС «ТИНРО» в области максимальной слуховой чувствительности рыб занимают в основной части спектра промежуточное положение между НИС «Миллер Фримен» и РТМС «Простор». По мере приближения судна, рыба попадает в его ближнее акустическое поле (около 15 м от судна), где проявляется третья фаза реакции, которая сопровождается отчетливым боковым и вертикальным движением рыбы от источника шума на так называемой бросковой скорости.

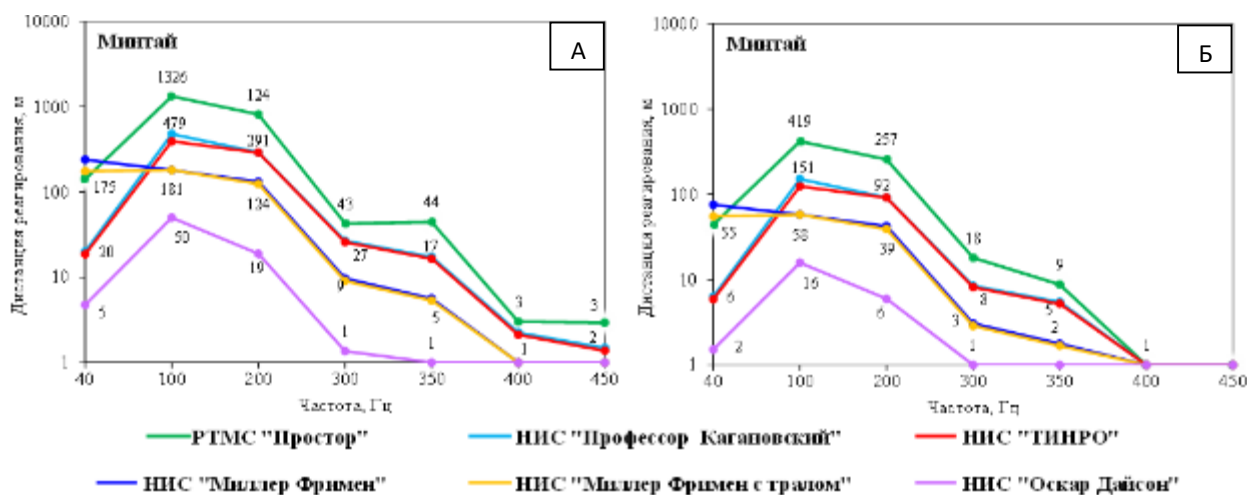


Рис. 2. Дистанции реагирования минтая на шумы судов: А – фаза №1; Б – фаза №2

Плавательные характеристики рыб. Важнейшими параметрами модели являются характеристики плавательного поведения рыб в шумовом поле судна, а именно: скорость (\vec{V}_i), направление движения и выносливость (e_i). В модели *скорость плавания рыб* представлена как функция уровня стимула (уровня звукового давления шума в точке приема и пороговых значений уровня шума рыбы j -го вида), согласно равенству:

$$|\vec{V}_i| = f(L_{ri}, L_{cj}, L_{pj}, L_{pw}, e_i) \quad (10)$$

Реакция начинается, когда стимул превышает заданный порог. Пока рыба не совершает направленных перемещений относительно судна, скорость плавания принимается за нуль. Первой фазой реакции является увеличение скорости плавания как функции уровня стимула ($\vec{V}_i = 0$ в модели), а вторая реакция есть типичная реакция избегания ($\vec{V}_i > 0$ в модели). Реакция сопровождается, как правило, уходом рыб в сторону от судна и (или) их вертикальным перемещением. Соответственно, можно выделить горизонтальную (\vec{V}_r) и вертикальную (\vec{V}_b) составляющие скорости движения рыб. Результирующие векторы скорости (направления) движения рыб от судна (\vec{V}_p) определяются видовым стереотипом защитного двигательного поведения объектов различных этологических групп и размеров (возрастных классов) на шумовой раздражитель.

Горизонтальная составляющая скорости (\vec{V}_r) связана с продолжительностью движения и может быть *крейсерской*, *максимальной* и *бросковой* (Коротков, 1998). Под «*крейсерской*» ($V_{кр}$) понимается скорость, которую рыбы могут поддерживать в течение длительного времени – от десятков минут до нескольких часов, а при миграциях даже сутками. Данная скорость характерна для первой фазы двигательной реакции рыб. *Максимальные скорости* (V_{max}) – на этих скоростях рыбы мобилизуют свои энергетические возможности. Продолжительность движения при таких скоростях сравнительно небольшая. У донных и придонных рыб она составляет не более 5 минут, а у пелагических рыб до 10–15 минут. В зоне облова трала максимальные скорости у рыб наблюдаются под воздей-

ствием довольно сильного раздражителя акустического или оптического характера. Скорость движения рыб на V_{max} характерна для второй фазы реакции избегания и может составлять: для пелагических рыб – 5–14 l_p/c , а для придонных и донных – 3–8 l_p/c (l_p – длина тела рыбы). В модели рыбы двигаются от судна на максимальной скорости. При этом скорость рыб во второй фазе реакции избегания плавно нарастает от крейсерской при $L_{ри} = L_{рj} + 10$ дБ и достигает максимального значения при $L_{ри} = L_{рj} + 20$ дБ. *Бросковая скорость* ($V_{бр}$) наблюдается у рыб на очень близком расстоянии от судна (в ближнем акустическом поле) и характерна для *третьей фазы двигательной реакции рыб*. В зоне действия шумового поля судна, а также активных орудий лова поведение рыб часто определяется короткими стремительными бросками в течение непродолжительного времени – от долей до нескольких секунд.

Вертикальная ($\vec{V}_в$) скорость движения рыбы – это скорость ее погружения. $\vec{V}_в$ по сравнению с $\vec{V}_г$ будет иметь небольшую величину, что связано со способностью рыб переносить изменение гидростатического давления – необходимостью регулирования своего собственного давления с гидростатическим давлением окружающей среды.

Направление движения. Рыбы стремятся минимизировать величину звукового стимула, действующего на их слуховые рецепторы. Иначе говоря, движение рыб осуществляется в направлении, противоположном градиенту звукового давления шума, создаваемого судном:

$$\Delta L_{ri} \parallel -\vec{r}_i, \quad (11)$$

$$\vec{V}_i \parallel \vec{r}_i, \quad (12)$$

Выносливость. Выносливость, e_i , определяется как время, в течение которого рыба может поддерживать данную скорость плавания. По некоторым данным пелагические рыбы могут проплывать на максимальной скорости довольно значительные расстояния (более 200 м) без усталости. В нашей модели речь идет о небольших временных интервалах (порядка 5-10 мин.) и расстояниях (до 200 м). Поэтому выносливость (продолжительность плавания на заданной скорости) можно не вводить как параметр модели.

Реализация модели, программное обеспечение для оценки взаимодействия скоплений минтая с шумовым полем судна

Для оценки состояния скоплений рыб при взаимодействии с промысловым или научным судном и их численной интерпретации требуется иметь информацию о распределении и плотности рыб в любой точке акватории вокруг судна в любой момент времени. Для этой цели в лаборатории промысловой гидроакустики Тихоокеанского филиала «ВНИРО» («ТИНРО») на языке программирования «DeLphi» была разработана программа «Noise», которая реализует вышеприведенный алгоритм модели поведения рыб в шумовом поле судна. Используемые в модели исходные данные и параметры для расчета, представлены в таблице 1. Программа позволяет рассчитывать горизонтальное и вертикальное положение рыб относительно судна с любым временным интервалом от 0,01 с, то есть в реальном масштабе времени.

Рыбы согласно модели в программе движутся в направлении, противоположном градиенту звукового давления шума. В начальный момент времени весь массив рыб в программе располагается по горизонтали и вертикали через равные интервалы дистанции от 1 до 10 м. Эти интервалы выбираются исходя из скорости хода судна для удобства односекундного представления результатов расчета. Судно двигается вдоль оси x и как источник шумового поля моделируется точкой с нулевыми значениями координат x, y, z (x – ось по курсу судна, y – ось поперек курса судна, z – вертикальная ось).

Выходных данные

Параметр	Описание	Величина	Единица измерения
l_{pj}	Длина рыбы j-го вида	Задается	м
V_v	Вертикальная составляющая скорости движения рыб	0,5-0,7	м/с
V_{rj}	Горизонтальная составляющая скорости движения рыб вида j, в т.ч.:		
V_{ki}	Крейсерская скорость (первая фаза реакции)	(1-3) l_{pj}/c	м/с
V_{mj}	Максимальная (спринтерская) скорость (вторая фаза реакции)	(3-14) l_{pj}/c	м/с
V_{bj}	Бросковая скорость (третья фаза реакции)	(6-30) l_{pj}/c	м/с
$L_{шк}$	Уровень звукового давления шума судна типа k на частоте f_n	Рисунок 1	дБ/1 мкПа/1 м
L_{ri}	Уровень звукового давления шума в точке расположения i-й рыбы	Формула 7	дБ/1 мкПа
L_{cj}	Слуховой порог рыб вида j на частоте f_n	Рисунок 2	дБ/1 мкПа
L_{pj}	Порог реакции рыб вида j (первая фаза)	$L_{cj} + (18 \div 35)$	дБ/шум
L_{pri}	Порог реакции избегания рыб (вторая фаза)	$L_{pj} + 20$	дБ/шум
V_c	Скорость судна	Задается	м/с

Программа работает с электронной базой данных «Noise» (формат файла «.mdb»), в таблицах которой заложены все исходные данные и параметры для расчета. Структура базы данных показана на рис. 3 и состоит из следующих таблиц:

The image shows five screenshots of a database interface, each representing a different table in the 'Noise' database. The tables are numbered 1 through 5.

- Table 1 (Ship):** Lists ship names and IDs. Columns: Ship_id, Ship_name. Data includes ships like "Оскар Дайсон", "Миллер Фримен", etc.
- Table 2 (Ship_noise):** Lists noise data for various ships. Columns: Ship_idx, Angle, Frequency, Noise. Data includes noise levels for ships like "Проф. Кагановский" at different frequencies.
- Table 3 (Fish):** Lists fish species and their characteristics. Columns: Fish_idx, Fish_Name, Vmax_a, Vmax_b, TSLCoef_A, TSLCoef_B, ear_size1, ear_size2, ear_loss1, Max_dive. Data includes species like "Минтай", "Треска", "Лосось", etc.
- Table 4 (Fish_porog):** Lists hearing thresholds for fish. Columns: Fish_idx, Frequency, Porog. Data includes thresholds for "Минтай" and "Треска" at various frequencies.
- Table 5 (Fish_pos):** Lists fish positions. Columns: Fish_num, Fish_idx, Fish_len, x_pos, y_pos, z_pos. Data includes positions for "Минтай" fish.

Рис. 3. – Структура базы данных программы «Noise»: 1 – таблица «Ship», 2 – таблица «Ship noise», 3 – таблица «Fish», 4 – таблица «Fish porog», 5 – таблица «Fish pos»

1. Таблица «Ship» содержит названия судов, по которым есть информация об их шумовых характеристиках.

2. Таблица «Ship noise» содержит информацию о шумовых характеристиках судов:

Angle – угол в задающем направлении относительно основной плоскости судна (где 0° – нос, 180° – корма), при котором рассчитывается шум судна;

Frequency – частоты, на которых измерен шум судна;

Noise – уровень измеренного шума в данном направлении на данной частоте;

3. Таблица «Fish» содержит следующую информацию:

Fish name – список видов рыб (см. рис. 2);

V_{max_a} / V_{max_b} – коэффициенты, определяющие скоростные характеристики рыб;

$TSLCoef_A / TSLCoef_B$ – параметры, по которым ведется расчет силы цели (*TS*) рыб;

ear_size_1 / ear_size_2 – минимальный и максимальный размер рыбы, в зависимости от которых пропорционально снижается слуховая чувствительность рыб на величину *ear_loss1*;

ear_loss1 – разница в слуховой чувствительности рыб, в зависимости от размера рыбы, дБ.

Для рыб максимального размера и выше – базовая чувствительность, а для рыб меньшего минимального размера – значение будет ниже на величину *ear_loss1*;

Max_dive – максимальная глубина погружения рыбы относительно начальной позиции, м.

4. Таблица «Fish_porog» содержит информацию об аудиограммах рыб (данные о слуховой чувствительности в зависимости от частоты).

5. В таблице «Fish_pos» задается вид и порядковый номер каждой рыбы, ее длина (м) и начальное положение в пространстве относительно судна (м): *x* – впереди (положительные значения) и позади (отрицательные значения) относительно курса судна, *y* – с левой (положительные значения) и с правой (отрицательные значения) стороны относительно курса судна, *z* – глубина.

В соответствующих полях программы «Noise», к которой подгружается база данных Noise.mdb, для расчета взаимодействия рыб с судном задаются необходимые параметры (рис. 4):

– «Судно» – выбирается из списка судов с известными данными о характеристиках подводного шума;

– «Скорость, узлы» – указывается скорость судна в узлах (мор. миля/час);

– «Глубина источника шума, м» – глубина нахождения винтов судна (в большинстве случаев – 0 м);

– «Убегание при превышении порога на, дБ» – превышение сигнала над слуховым порогом, при котором начинается реакция избегания, дБ;

– «Максимальная вертикальная скорость, м/с» – вертикальная составляющая скорости перемещения рыб. Скорости погружения составляют 0,3-0,7 м/с;

– «Макс. скорость при, дБ» – превышение сигнала над слуховым порогом, при котором скорость движения рыб становится максимальной;

– «Коэф. мин. скорости убегания» – описывает начальную скорость убегания рыбы, измеряется в долях от V_{max} ;

– «Коэф. макс. скорости убегания» – описывает максимальную скорость убегания рыбы, измеряется в долях от V_{max} , значение 1 соответствует V_{max} ;

– «Сокр. шума для возвр., дБ» – величина уменьшения уровня шума слышимого рыбой относительно максимального, при котором рыба начинает возвращаться в исходное положение, зависит от положения рыбы в пространстве относительно источника шума, дБ;

– «Макс. скорость подъема, м/с» – максимальная скорость подъема рыбы в исходное положение (обычно меньше скорости погружения);

– «Сокр. шума для макс. скорости возвр., дБ» – величина уменьшения уровня шума слышимого рыбой относительно максимального, при котором рыба развивает максимальную скорость (V_{max}) в процессе возвращения в исходное положение, дБ;

– «Коэф. макс. скорости возвр.» – доля от максимальной скорости;

– «Сокр. шума для мин. скорости возвр., дБ» – величина, на которую уменьшается максимальный уровень шума слышимый рыбой, при котором рыба развивает минимальную скорость возврата, дБ;

– «Коэф. мин. скорости возвр.» – доля от максимальной скорости;

Подменю «Трал» содержит следующие параметры:

– «Вертикальное раскрытие / Горизонтальное раскрытие, м» – вертикальное и горизонтальное раскрытие трала, измеренное с помощью траловых датчиков или взятое из технической документации по данному орудью лова;

– «Дистанция 1 / Дистанция 2, м» – указывается расстояние от судна до трала, где рассчитывается количество рыбы (в шт. или %) прошедшее через устье трала; с учетом шумового поля на данной дистанции рассчитывается количество рыбы, если бы там прошел трал с данным вертикальным и горизонтальным раскрытием;

– «Глубина 1 / Глубина 2, м» – указывается горизонт хода трала (глубина верхней подборы). На этой глубине, с учетом раскрытия трала рассчитывается количество рыбы в штуках или в процентах от суммарного по всему диапазону глубин;

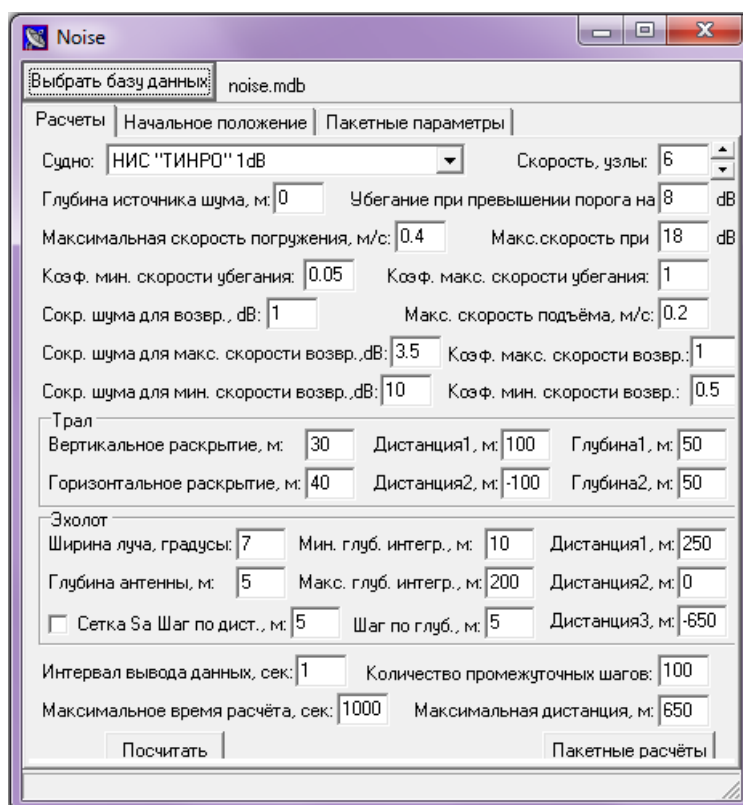


Рис. 4. – Интерфейс программы «Noise»

Подменю «Эхолот» содержит следующие параметры:

– «Ширина луча, градусы» – задается ширина луча используемого эхолота (согласно документации эхолота), например, у научного эхолота ЕК-60 SIMRAD ширина луча составляет 7°;

– «Глубина антенны, м» – глубина нахождения антенны эхолота (обычно антенна располагается на киле судна, в отдельных случаях крепится на выдвижных устройствах ниже поверхности воды);

– «Мин. глубина интегр., м» – глубина с которой производится интегрирование (расчет) S_A (коэффициента обратного поверхностного рассеяния на квадратную морскую милю ($m^2/миля^2$)), эта величина зависит от «глубины антенны» и учетом акустической «мертвой зоны» антенны эхолота;

– «Макс. глубина интегр., м» – максимальная глубина до которой производится интегрирование S_A ;

– «Дистанция 1 / Дистанция 2 / Дистанция 3, м» – указывается дистанция до объекта (рыбы) впереди судна, под судном и после прохода судна, где рассчитывается количество рыбы в акустических единицах S_A или в %;

– «Сетка S_A Шаг по дист., м» – расстояние, через которое рассчитываются данные по S_A , м;

– «Шаг по глуб., м» – дистанция по глубине, с которой рассчитывается положение рыб, м;

– «Интервал вывода данных, сек.» – время, через которое записывается положение рыб (частота записи данных в файл; чем больше число, тем реже запись);

- «Количество промежуточных шагов» – число отрезков времени, содержащиеся в «Интервал вывода данных, сек.»;
- «Максимальное время расчета, сек» – ограничение времени расчёта (обычно составляет 1000 с);
- «Максимальная дистанция, м» – дистанция впереди и позади судна, в течение которой рассчитывается положение рыбы и записывается в файл «NoiseOut.csv».

После проведения вычислений программой в выходном файле данных «NoiseOut.csv» выводится положение каждой рыбы относительно судна как по горизонтали, так и по вертикали с заданным временным интервалом (рис. 5). Интервалы выбираются исходя из скорости хода судна от 1 до 5 м для удобства односекундного представления интервалов времени. Судно движется вдоль оси x и как источник шумового поля моделируется точкой с нулевыми значениями координат.

Time	Num	Idx	Name	Length	MaxSpeed	CurSpeed	Angle	R_Dist	M_Dist	Dist	x	y	z
0 1 0	1	1	Минтай (Theragra chalcogramma)	40	1.85	0	315	178.37	56.41	283.95	200	-200	-25
0 3 0	1	1	Минтай (Theragra chalcogramma)	40	1.85	0	316.47	178.37	56.41	276.99	200	-190	-25
0 5 0	1	1	Минтай (Theragra chalcogramma)	40	1.85	0	318.01	178.37	56.41	270.23	200	-180	-25
0 6 0	1	1	Минтай (Theragra chalcogramma)	40	1.85	0	318.81	178.37	56.41	266.93	200	-175	-25

Рис. 5. – Пример выходного файла данных

Работу программы и модели в целом демонстрируют рис. 6–8, на которых в различных ракурсах отображается процесс изменения местоположения (локализации) и плотности рыб при их взаимодействии с шумовым полем движущегося судна в реальном масштабе времени. Исходное распределение рыб в модели принимается равномерным по горизонту и глубине. Задавая вид и размер рыбы, тип и скорость движения судна (характеристики акустического поля) можно рассчитать (прогнозировать) горизонтальное и вертикальное положение рыб относительно судна в любой момент времени [6].

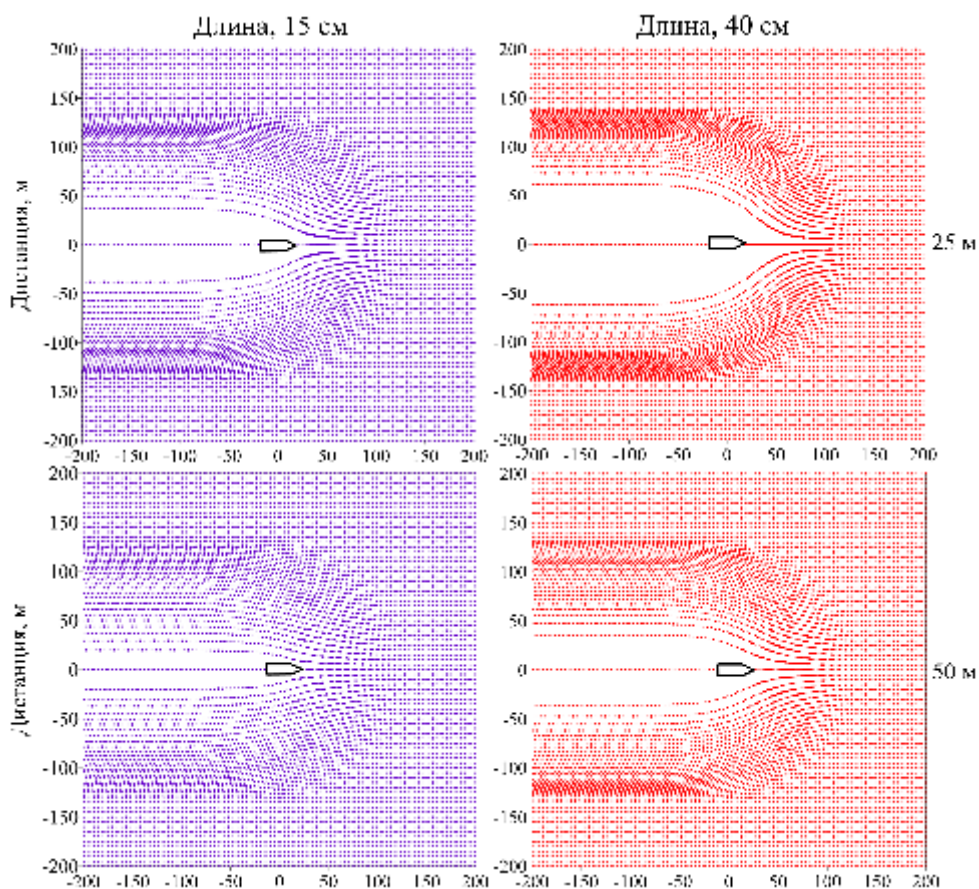


Рис. 6. – Модель поведения минтая в шумовом поле СТМ типа «Атлантик–833» на глубине 25 и 50 м, скорость судна 3,5 уз., вид сверху

Вид сверху (рис. 6) иллюстрирует горизонтальную избегательную реакцию, выражающуюся в уходе рыб в стороны от судна. Отчетливо видно возмущенную область, в пределах которой происходит реакция избегания и искажение пространственного распределения рыб. Вследствие реакции избегания рыбы перемещаются противоположно градиенту давления шумового поля судна со скоростями избегания в пределах дистанции избегания.

Площадь возмущенной области (зоны реакции рыб) и количество отклонившихся особей существенно сокращается с глубиной. Горизонтальные и вертикальные смещения особей, минимизирующие влияние шума, по мере удаления от судна уменьшаются. В результате, на краях возмущенной области образуется зона, где плотность реагирующих рыб становится выше исходной. Эта зона формируется как по бокам, так и под килем судна и выглядит как полусфера, радиусом которой является дистанция реагирования рыб (рис. 6 и 7).

Сравнивая распределения рыб в пространстве в зависимости от их размеров можно видеть, что крупные рыбы, имеющие более высокие энергетические и слуховые способности, в процессе реакции смещаются дальше от судна и имеют большую площадь возмущения, чем мелкие объекты, что демонстрирует одно из проявлений селективирующего влияния шумового поля на размерную структуру улова.

В поперечной плоскости множество рыб в шумовом поле судна образует типичную форму туннеля (рис. 7). При этом горизонтальные и вертикальные смещения рыб, минимизирующие влияние шума, уменьшаются к краям туннеля. Визуально заметны эффекты уменьшения плотности скопления рыб относительно исходной в зоне активной реакции вблизи поверхности и уплотнения (концентрации) минтая в более комфортной зоне по краям туннеля.

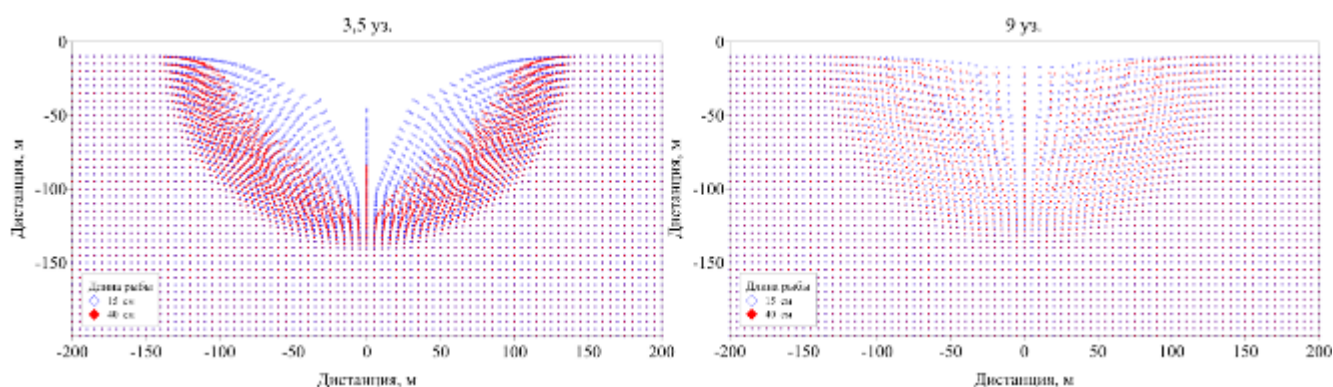


Рис. 7. – Модель поведения минтая в шумовом поле СТМ типа «Атлантик-833» в поперечном разрезе для рыб малой (15 см) и большой (40 см) размерной группы при скорости судна 3,5 и 9 уз. (судно находится в точке с нулевыми координатами)

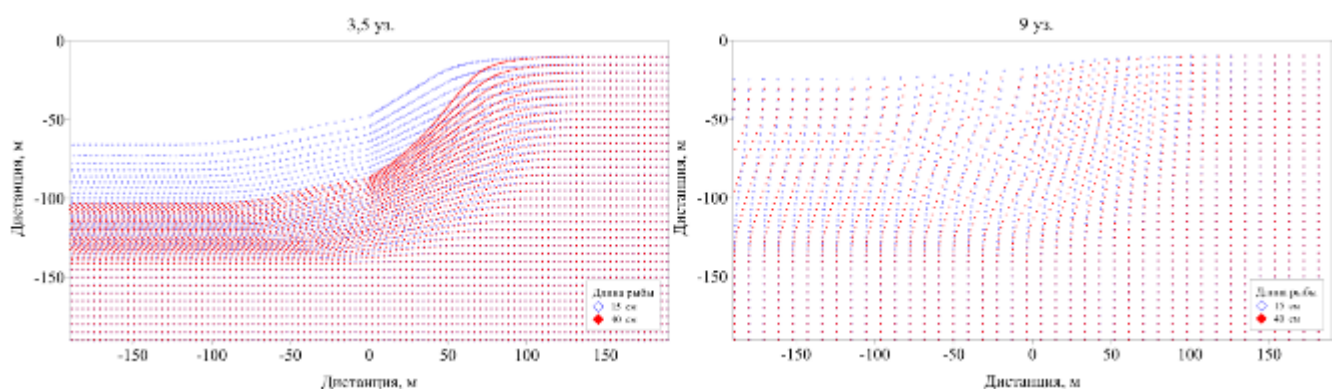


Рис. 8. – Модель поведения минтая в шумовом поле СТМ типа «Атлантик-833» в продольном разрезе для рыб малой (15 см) и большой (40 см) размерной группы при скорости судна 3,5 и 9 уз. (судно находится в точке с нулевыми координатами)

На продольном сечении (рис. 8) следует обратить внимание на изменение горизонта и уплотнение рыб по мере продвижения судна в сторону скопления, увеличение плотности рыб, уходящих

вниз от судна, на дистанциях реагирования. При продвижении судна заглублие каждой следующей рыбы меньше, чем для предыдущей, что говорит о выраженном снижении реакции избегания. Однако по мере продвижения судна, в зону дистанции избегания попадают очередные рыбы, расположенные впереди судна и происходит их заглублие.

Заключение

Разработанная модель дает представление о воздействии шумового поля судна на поведение рыб разных размерных групп и, как результат, графическое изображение изменения плотности и структуры скопления в пространственно-временных координатах. Модель позволит учитывать влияние шумового поля судна на пространственное распределение рыб и оценки запасов рыб траловым (площадным) и гидроакустическим методами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Handegard N.O., Ona E. Modeling fish reaction to vessel noise, the significance of the reaction thresholds // ICES ASC Handbook, ICES Annual Science Conference ICES, Oslo, Norway, 26-29 September 2000. - 2001. ICES CM 2001/Q:10. P. 1-22.
2. Урик Р.Д. Основы гидроакустики. – Ленинград: Судостроение, 1978. – 448 с.
3. Кузнецов М.Ю. Дистанции реагирования различных видов рыб на гидроакустические шумы промысловых и научно-исследовательских судов и допустимые уровни шума // Известия ТИНРО. – 2011. – Т. 164. – С. 157-176.
4. Кузнецов М.Ю., Поляничко В.И., Шевцов В.И. Характеристики гидроакустического шума научно-исследовательских судов ТИНРО-Центра // Известия ТИНРО. – 2014. – Т. 177. – С. 235-257.
5. Кузнецов Ю.А., Кузнецов М.Ю. Обоснование и разработка методов и средств промысловой биоакустики. – Владивосток: Дальрыбвтуз, 2007. – 339 с.
6. Кузнецов М.Ю., Поляничко В.И., Убарчук И.А. Совершенствование методов оценки уловистости траловых учетных систем с использованием гидроакустических средств (на примере минтая Охотского моря) // Известия ТИНРО. – 2015. – Т. 183. – С. 259-278.

MATHEMATICAL MODEL OF POLLACK BEHAVIOR IN THE NOISE FIELD OF A VESSEL

¹Polyanichko Vladimir Ilyich, head of the hydroacoustics sector

²Kuznetsov Mikhail Yurievich, candidate of technical sciences,
head of the laboratory of commercial hydroacoustics, fishing technologies
and technical means of aquaculture

³Ubarchuk Igor Anatlievich, chief specialist, hydroacoustics sector

^{1,2,3}Pacific Branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution “All-Russian Research Institute of Fisheries and Oceanography” (Pacific Branch of the Federal State Budgetary Institution “VNIRO” (“TINRO”)), Vladivostok, Russia,
e-mail: ¹vladimir.polianichko@tinro.vniro.ru; ²mikhail.kuznetsov@tinro.vniro.ru

This paper presents a model that gives an idea of the impact of the noise field of a vessel on the behavior of pollock. The model uses information about the mechanisms of perception of acoustic fields and the behavior of fish in these fields, the patterns of orientation of individuals, which makes it possible to accurately calculate the trajectories of fish in the noise field of a vessel approaching them. The model allows you to obtain a graphical representation of changes in the density and structure of fish aggregations in spatiotemporal coordinates.

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ УСИЛИЯ ВЫБОРКИ ТРАЛОВЫХ МЕШКОВ ПО СЛИПАМ СУДОВ С ДАННЫМИ НАТУРНЫХ ЗАМЕРОВ

¹Скуратов Николай Александрович, специалист по УМР,
инженер группы ПР Атлантического филиала ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО»

²Суконнов Анатолий Владимирович, канд. техн. наук, доцент

³Суконнова Татьяна Евгеньевна, доцент

⁴Львова Екатерина Евгеньевна, канд. техн. наук, доцент

¹Атлантический филиал ГНЦ РФ ФГБНУ

«Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии»,
Калининград, Россия, e-mail: snikal@tut.by

^{1,2,3,4}ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,
Калининград, Россия, e-mail: ¹snikal@tut.by

Посвящено изучению физического процесса подъема уловов на траулерах кормового траления слиповым методом. Проведённые ранее работы позволили получить зависимости усилия возникающего в вытяжном конце вытяжной лебёдки от различных факторов характеризующих судно -трал-промысловая машина. И проведена адаптация полученных зависимостей для натуральных траловых систем.

Финансирование: исследование выполнено в рамках выполнения государственного задания по теме «Разработка физических, математических и предсказательных моделей процессов эксплуатации донного и разноглубинного траловых комплексов».

Известно из морской деятельности, что при выборке мешков с уловом слиповым методом возникают пиковые нагрузки оказывающие негативное влияние на узлы и механизмы и приводящих к различным негативным эффектам [1,2]. Стечением времени значимость проблемы возросла из-за увеличения уловов а как следствие и усилий возникающих в системе судно-трал-промысловая машина. Учитывая важность проблемы, с 2016 г. исследования проводились сотрудниками кафедры промышленного рыболовства Суконновым А.В. и Скуратовым Н.А. на кафедре промышленного рыболовства Калининградского государственного технического университета на экспериментальной установке имитирующей процесс подъема тралов на судах с различными промысловыми устройствами [3-10]. Ими были получены зависимости усилия возникающие в вытяжном конце при выборке траловых мешков с уловом при различном сочетании параметров входящих в систему судно-трал-промысловые механизмы, для различных форм слипа и проведено сравнение результатов макетных и натуральных испытаний.

Результаты научных исследований дадут возможность рассчитывать усилия, возникающие в вытяжном конце при подъеме траловых мешков слиповым методом при различных комбинациях влияющих факторов.

Цели и задачи исследования

Целью работы является проверка и сравнительный анализ зависимостей полученных на макетной установке для различных форм слипа, и адаптация с результатами замеров усилия возникающими в линии промысловая лебёдка -вытяжной конец-траловый мешок на траулере типа СТМ.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить ряд задач, которые включают в себя:

- проведение экспериментальных исследований с расширенным диапазоном факторов с учётом реальных условий эксплуатации траловой системы;
- выполнить расчёты с помощью полученных зависимостей, провести их оценку;

- провести сопоставление и оценку результатов расчётов по макетным испытаниям с результатами натурных испытаний.

Полученная ранее на первом этапе уравнение наиболее полно отвечает параметрам промышленной схемы судна СТМ «Атлантида» К-1704. Скорость выборки на натурном судне варьировалась в интервале от 0,3 м/с, до 0,5 м/с, что при соотношении модели к натуре 1:15, будет равняться 0,02 и 0,033 м/с, что соответствует первому этапу макетных исследований, выраженным результатом которого является следующее уравнение.

Угол выхода вытяжного конца составлял 11°.

Диапазон угла наклона слипа был расширен до 45°.

Испытания проводились по ранее разработанной методике и плану проведения экспериментов.

Исследовательские работы проводились на экспериментальной установке позволяющей имитировать процесс выборки мешков с уловом по слипам судов, которая представляет из себя макет промышленной палубы со слиповым устройством с возможностью смены угла наклона слиповой поверхности, ванны с водой, регулируемой по уровню, настила промышленной палубы, вытяжной лебёдки, направляющего блока, регулируемого по высоте и характеризующего угол выхода вытяжного конца, а так же вытяжного комплекса и динамометра с приёмным устройством (ноутбук). Вес мешка изменялся от 1,25 до 2 кг.

После оценки степени влияния факторов была получена зависимость усилия в вытяжном конце для прямой поверхности слипового настила от угла наклона слипа, угла выхода вытяжного конца и наполнения мешка (1) (результат рассчитывается в кгс):

$$T = 2,02 + 0,47x_1 + 0,21x_2 - 0,17x_3 + 0,04x_1x_2 - 0,08x_1x_3 + 0,01x_1x_2x_3 \quad (1)$$

где x_1 , x_2 , x_3 – значения заполнения мешка, угла наклона слипа и выхода вытяжного конца соответственно, записанные в кодированном виде.

Для проверки адекватности и оценки точности результатов вычислений полученных с помощью зависимости были проведены расчётные действия при различном соотношении факторов, приведённые в таблице 1.

Таблица 1

**Диапазон изменения факторов, результаты замеров и расчётов
для слипа с прямой формой поверхности**

№	Наполнение мешка (x1)	Угол наклона слипа, α° (x2)	Угол выхода вытяжного конца, β° (x3)	Вытяжное усилие T _{ср} , в Н	Расчётное значение усилия, Н	Погрешность, %	Соотношение к весу
1.	2 кг (+)	45° (+)	20° (+)	24,65	24,65	0%	1,2578
2.	2 кг (+)	45° (+)	5°(-)	29,21	29,21	0%	1,4903
3.	2 кг (+)	30° (-)	20° (+)	19,36	19,36	0%	0,9876
4.	2 кг (+)	30° (-)	5°(-)	24,47	24,47	0%	1,2487
5.	1,25 кг (-)	30° (-)	5°(-)	14,27	14,27	0%	1,1648
6.	1,25 кг (-)	30° (-)	20° (+)	12,92	12,92	0%	1,0546
7.	1,25 кг (-)	45° (+)	5°(-)	17,93	17,93	0%	1,4634
8.	1,25 кг (-)	45° (+)	20° (+)	15,91	15,91	0%	1,2984

С целью пересчёта результатов макетных испытаний на натуре, воспользовались переводными формулами изложенными в учебном пособии Долина Г.М. и учли масштабный коэффициент C_V , равный C_l^3 .

Результаты расчётов по уравнению 1 и результаты натурных испытаний приведены в таблице (таб. 2).

Данные расчётного значения усилия в вытяжном конце для СТМ «Атлантида» при весе мешка с уловом равном 1000 кг и результаты морских замеров

№	Расчётное значения усилия для прямого слипа, Н	Натурное значение усилия, Н
1.	12147,98	10164,07

Для проведения сравнительной оценки расчётов, выполненных по уравнениям, полученным в результате макетных испытаний, вводим безразмерную величину равную отношению усилия в вытяжном конце к массе мешка с уловом.

Так среднее значение соотношения усилия при нахождении мешка в районе слиповой канавки к весу мешка на натурном промысловом судне составляет 1,04, а максимальное 1,17.

Среднее значение соотношения усилия при нахождении мешка в районе слиповой канавки к весу мешка на модельной установке составляет 1,24. Отклонение натуральных данных замеров от расчётных составляет -16,3 % для средней величины и 5,6 % для максимального значения.

Зависимость описывает процесс выборки мешков с уловом по прямолинейной поверхности слипа в полной мере, но отклонение составляет 19,5 %, оно повсеместно, поэтому при использовании нужно уменьшать результаты приблизительно на коэффициент равный 1,2.

Ранее было установлено, что суда имеют различные формы слипов, основными являются прямая и сферическая формы. Поэтому были проведены исследования с расширенным диапазоном исследования для слипов со сферической формой поверхности. Была получена зависимость (2) (результат рассчитывается в кгс):

$$T = 2,02 + 0,29x_1 + 0,11x_2 - 0,07x_3 + 0,04x_1x_2 - 0,01x_1x_3 - 0,02x_2x_3 + 0,01x_1x_2x_3 \quad (2)$$

где x_1 , x_2 , x_3 – значения заполнения мешка, угла наклона слипа и выхода вытяжного конца соответственно, записанные в кодированном виде.

Затем были проведены расчёты при различных соотношений факторов и сведены в таблицу 3 для проверки адекватности и точности.

Таблица 3

Диапазон изменения факторов, результаты замеров и расчётов для слипа с сферической формой поверхности

№	Наполнение мешка (x_1)	Угол наклона слипа, α° (x_2)	Угол выхода вытяжного конца, β° (x_3)	Вытяжное усилие $T_{ср}$, в Н	Расчётное значение усилия, Н	Погрешность, %	Соотношение к весу
1.	2 кг (+)	45° (+)	20° (+)	23,10	23,10	0%	1,18
2.	2 кг (+)	45° (+)	5° (-)	25,20	25,20	0%	1,28
3.	2 кг (+)	30° (-)	20° (+)	20,59	20,59	0%	1,05
4.	2 кг (+)	30° (-)	5° (-)	21,66	21,66	0%	1,11
5.	1,25 кг (-)	30° (-)	5° (-)	16,63	16,63	0%	1,36
6.	1,25 кг (-)	30° (-)	20° (+)	15,65	15,65	0%	1,28
7.	1,25 кг (-)	45° (+)	5° (-)	18,30	18,30	0%	1,49
8.	1,25 кг (-)	45° (+)	20° (+)	17,10	17,10	0%	1,40

Для получения универсального уравнения, включающего в себя форму слипа, провели дополнительные расчёты и получили общее уравнение (3), (результат рассчитывается в кгс):

$$T = 2,021 - 0,003x_1 + 0,3780x_2 + 0,164x_3 - 0,048x_4 - 0,088x_1x_2 - 0,048x_1x_3 + 0,049x_1x_4 + 0,040x_2x_3 - 0,047x_2x_4 - 0,009x_3x_4 - 0,003x_1x_2x_3 + 0,034x_1x_2x_4 - 0,007x_1x_3x_4 + 0,003x_2x_3x_4 - 0,013x_1x_2x_3x_4 \quad (3)$$

где x_1, x_2, x_3, x_4 – значения формы слипа, заполнения мешка, угла наклона слипа и выхода вытяжного конца соответственно, записанные в кодированном виде.

Затем были проведены расчёты усилия в вытяжном конце по уравнениям 1,3. Результаты предоставлены в таблице 4

Таблица 4

Данные расчётного значения усилия в вытяжном конце для СТМ «Атлантида» при весе мешка с уловом равном 1000 кг для прямого слипа, универсальное и результаты морских замеров

№	Расчётное значения усилия для прямого слипа, Н	Расчётное значения усилия универсальной зависимости, Н
1.	12147,98	12147,98

Результаты расчётов приведённых в таблице показывают, что универсальное уравнение может применяться для судов с различными слиповыми устройствами.

Выводы

Полученные зависимости адекватно описывают процесс выборки траловых мешков с уловом по слипам судов различной формы и позволяют проводить расчёты усилия в вытяжном конце, возникающего при подъёме траловых мешков с уловом на палубу судна. При этом необходимо учитывать, что пересчёт результатов испытаний на натуре требует введения понижающего коэффициента 1,2.

Проведённые на макетной установке исследования позволяют проводить оценочные действия при проектировании слиповых устройств рыбопромысловых судов тралового лова, а также проектировании и разработке промысловых механизмов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фридман, С.Л. Взаимодействие трала и судна при подъеме улова на кормовом траулере: дис. канд. техн. наук / науч. рук.: А.И. Трещев – Мурманск: Мурман. высш. мореход. училище, 1960. – 242 с.
2. Фридман, А.Л. Исследование взаимодействия системы «судовая слиповая установка». – Калининград: КТИРПиХ, 1985. – 135 с.
3. Долин.Г. М. Планирование экспериментов в промышленном рыболовстве: учеб. пособие – Калининград: Изд-во КГТУ, 1996. – 119 с.
4. Суконнов А. В., Скуратов Н.А. Экспериментальное определение зависимости тягового усилия выборки трала с уловом на палубу судна от параметров системы судно – трал на модели промысловой палубы судов типа РТМ-С // Известия КГТУ. – Калининград, 2018. – №48. – С. 39-46.
5. Скуратов, Н.А. Суконнов, А.В. Экспериментальное исследование процесса подъёма траловых мешков с уловом по слипу судна. // Известия КГТУ. – Калининград, 2019. - №54 – С. 187-195.
6. Скуратов, Н.А. Суконнов, А.В. Чеусов Н.А. Оценка способов подъема уловов на палубу судна для различных промысловых схем тралового лова // Сборник материалов X национальной (всероссийской) научно-практической конференции «Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промысловое и техническое использование» – Петропавловск-Камчатский: изд-во КамчатГТУ. – 2019.

7. Скуратов, Н.А. Суконнов, А.В. Суконнова, Т.Е. Экспериментальные исследования по оценке влияния скорости подъёма траловых мешков с уловом по различным формам слипов судов на усилие в вытяжном конце промысловой лебёдки. // Известия КГТУ. – Калининград, 2020. - № 57 – С. 67-76.

8. Скуратов, Н.А. Суконнов, Суконнова, Т.Е., Быков А.А. Экспериментальное определение зависимости усилия подъёма траловых мешков с уловом от тягово-скоростных параметров промысловой лебёдки // Материалы VIII Международного Балтийского морского форума 5-10 октября 2020 года [Электронный ресурс]: в 6 томах. Т. 2. «Морская техника и технологии. Безопасность морской индустрии», VIII Международная научная конференция. – Электрон. дан. – Калининград: Изд-во БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ», 2020. – 1 электрон. опт. диск. – С. 277-282.

9. Скуратов, Н.А. Суконнов, Суконнова, Т.Е. Теоретическая подготовка и обоснование экспериментальных работ по определению зависимости усилия подъёма траловых мешков с уловом // Материалы IX Международного Балтийского морского форума 4-9 октября 2021 года [Электронный ресурс]: в 6 томах. Т. 2. «Морская техника и технологии. Безопасность морской индустрии», IX Международная научная конференция. – Электрон. дан. – Калининград: Изд-во БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ», 2021. – С. 404-408.

10. Скуратов Н.А., Львова Е.Е., Суконнов А.В., Суконнова Т.Е. Исследование процесса подъёма траловых мешков по слипам судов на модельной установке, // Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4 часть 1, С. 26–32.

COMPARISON OF TEST RESULTS TO DETERMINE THE EFFORT OF SELECTION OF TRAWL BAG BAGS FROM VESSEL SLIPS WITH DATA FROM FIELD MEASUREMENTS

¹Skuratov Nikolay Aleksandrovich, specialist in UMR, engineer of the PR group of the Atlantic branch of the State Scientific Center of the Russian Federation FGBNU "VNIRO"

²Sukonnov Anatoly Vladimirovich, candidate of technical sciences, associate professor

³Sukonnova Tatyana Evgenyevna, associate professor

⁴Lvova Ekaterina Evgenyevna, candidate of technical sciences, associate professor

¹Atlantic branch of the state scientific center of the Russian Federation of the Federal State Budgetary Scientific Institution "All-Russian Research Institute of Fisheries and Oceanography", Kaliningrad, Russia, e-mail: snikal@tut.by

^{1,2,3,4}Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia, e-mail: snikal@tut.by

The work is devoted to the study of the physical process of lifting catches on trawlers of the stern trawling slipway method. Previously conducted work allowed us to obtain the dependences of the force arising in the exhaust end of the exhaust winch on various factors characterizing the vessel - trawl - fishing machine. And the adaptation of the obtained dependencies for full-scale trawl systems was carried out.

Key words: fishing equipment, trawl, catch, slipway, model, experiment, factors, peak loads

Funding: The study was carried out within the framework of the state assignment on the topic "Development of physical, mathematical and predictive models of the processes of operation of bottom and mid-water trawl complexes."

СЕКЦИЯ «РАДИОФИЗИКА, РАДИОТЕХНИКА И ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ»

SECTION "RADIOPHYSICS, RADIO ENGINEERING AND INFORMATION SECURITY"

УДК 654.165, 001.891.573

МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СВОЙСТВ M-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ СТАНДАРТА CDMA В СРЕДЕ MATHCAD

¹Волхонская Елена Вячеславовна, д-р техн. наук, доцент,
профессор кафедры судовых радиотехнических систем Морского института

²Коротей Евгений Владимирович, доцент кафедры судовых радиотехнических систем
Морского института

^{1,2}Балтийская государственная академия ФГБОУ ВО «КГТУ», Калининград, Россия,
e-mail: volkhonskaya_e@mail.ru; eugeny_korotey@mail.ru

Проведен обзор псевдослучайных последовательностей, применяемых при организации прямого и обратного каналов связи в рамках стандарта CDMA. В среде MathCAD разработаны программные коды для генерации M-последовательности произвольной длины, а также созданы процедуры тестирования данной последовательности на соответствие предъявляемым к ней требованиям. Работоспособность модели протестирована для случаев нескольких порождающих полиномов.

Постановка задачи

В настоящее время сотовые системы мобильной связи в глобальном масштабе в части оказания абонентам услуг радиотелефонии базируются на двух стандартах и их модификациях: GSM и IS-95 [1]. Принципиальной разницей таковых систем является формат множественного доступа в беспроводные сети. Узкополосные сети GSM реализуют совмещение множественных доступов с частотным и временным разделением каналов (FDMA и TDMA), в то время как широкополосные сети стандартов IS-95 (cdmaone), cdma2000, WCDMA и пр. осуществляют множественный доступ в сеть с кодовым разделением сигналов [2, 3].

Среди всех преимуществ технологии CDMA можно выделить следующие: уровень электромагнитной совместимости, степень скрытности и защищенности информации, существенно меньшую степень воздействия электромагнитного излучения на организм человека, меньшее количество базовых станций (БС) для одинаковой по площади зоны покрытия, отсутствие в необходимости планирования при распределении частотного ресурса между мобильными станциями (МС). К существенному недостатку технологии CDMA относится более сложная техническая организация сетей и техническая реализация оборудования.

Устный опрос представителей провайдеров сотовой связи в Северо-западном регионе показал, что оборудование БС стремительно стареет, гарантированный срок его безотказной работы подходит к концу, параллельный импорт не может удовлетворить все потребности сотовых операторов, лицензионное программное обеспечение (ПО) не обновляется в условиях санкционного давления со стороны недружественных стран. Таким образом, рано или поздно встанет вопрос о разработке и реализации российских аналогов оборудования и ПО для сетей сотовой связи.

В связи с вышеизложенным, изучение принципов организации сетей сотовой связи, особенностей функционирования их физических и логических каналов, процессов кодирования/декодирования представляется актуальной задачей, которую можно и нужно решать, в том числе посредством моделирования процессов функционирования сотовых сетей и анализа получаемых результатов.

Данная работа преследует цель программной реализации генераторов псевдослучайных последовательностей (ПСП) в нисходящей линии (от БС к МС) стандарта IS-95 и технологии WCDMA в среде MathCAD.

В системах сотовой связи технологии CDMA для передачи информации применяют, так называемые, сложные сигналы, характерной особенностью которых является значение базы, во много раз превосходящее единицу. Для создания требуемой базы сигнала можно использовать одну из следующих технологий:

1) расширение спектра скачкообразной перестройкой частоты (Frequency Hopping Spread Spectrum – FHSS);

2) прямое последовательное расширение спектра (Direct Sequence Spread Spectrum – DSSS).

Выбор кодовых последовательностей в сети CDMA зависит от типа канала передачи – прямой или обратный.

В первом случае (прямой канал передачи) тактовая и кадровая синхронизации адресных последовательностей обеспечиваются в групповом сигнале на базовой станции. На мобильную станцию сигналы в составе группового сигнала прибывают без временных сдвигов в пределах одного луча. Приемник мобильной станции производит синхронную обработку группового сигнала. В связи с чем, в качестве адресных последовательностей используют ансамбль ортогональных функций Уолша с целью минимизации межканальных помех.

Во втором случае (обратный канал передачи) осуществляется асинхронный режим работы мобильных станций по отношению к базовой станции в силу наличия временных сдвигов адресных последовательностей рабочих каналов, определяемых разностью проходимых сигналами мобильных станций расстояний. Здесь находят применение ПСП в виде М-последовательностей.

Требования, предъявляемые к корреляционным свойствам ПСП в прямом и обратном каналах связи можно сформулировать следующим образом:

1) в прямом канале связи максимальный уровень выбросов взаимной корреляционной функции (ВКФ) между любыми используемыми ПСП должен быть как можно меньше;

2) в обратном канале связи при выполнении первого требования нужно еще обеспечить минимизацию максимального уровня боковых лепестков автокорреляционной функции (АКФ) для исключения возможности маскирования главного лепестка боковыми лепестками в условиях многолучевости.

В качестве ПСП, чьи корреляционные свойства подвергались модельному исследованию, в работе были выбраны М-последовательности, которые используют в обратном канале системы сотовой связи технологии CDMA.

Исследование корреляционных свойств ПСП было проведено на основе анализа автокорреляционной и взаимной корреляционной функций кодовых последовательностей.

Оценке подвергались только корреляционные свойства ПСП, а за границами исследования остались применение моделей данных ПСП в составе моделей логических каналов системы CDMA с оценкой эффективности работы каналов.

М-последовательности

М-последовательность представляет собой двоичную псевдослучайную последовательность чисел. Такие последовательности обладают следующими основными свойствами [4, 5]:

Свойство №1: М-последовательность является периодической с периодом, состоящим из N импульсов (символов);

Свойство №2: единиц в последовательности на одну больше, чем нулей;

Свойство №3: сумма по модулю 2 М-последовательности с любым ее циклическим сдвигом приводит к некоторому циклическому сдвигу исходной М-последовательности.

Свойство №4: в М-последовательности имеется 2^{n-1} различных серий (где n - количество ячеек памяти в регистре сдвига), состоящих из последовательных нулей или единиц, причем половина серий имеет длину 1, $1/2^2$ серий - длину 2 и $1/2^q$ серий - длину q ;

Свойство №5: боковые пики АКФ усеченной М-последовательности длиной N имеют значения близкие к $1/\sqrt{N}$.

После анализа некоторых источников [4-6] был выделен алгоритм генерации псевдослучайных последовательностей на основе простого линейного генератора. Его алгоритм работы прост и достаточно полно описан в работах о широкополосных системах связи [4, 5].

Обобщенная схема такого генератора приведена на рис. 1. Номера отводов, которые выбираются для создания цепи обратной связи, определяются порождающим полиномом. Данные полиномы представлены в справочной литературе [7].

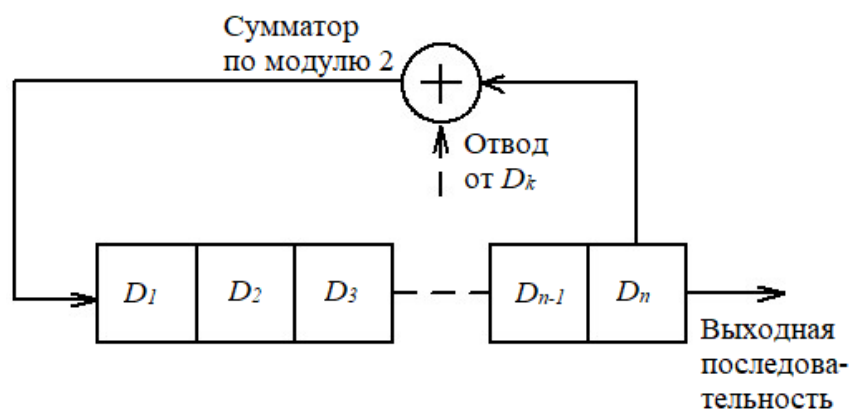


Рис.1. Обобщенная схема линейного генератора M-последовательностей

Согласно [1] были выбраны два порождающих полинома (1), которые используются для генерации двух M-последовательностей, соответствующих синфазному I и квадратурному Q каналу и используемых для кодирования в прямом канале в системе CDMA:

$$g_1(x) = x^{15} + x^{13} + x^9 + x^8 + x^7 + x^5 + 1; \quad g_2(x) = x^{15} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^6 + x^5 + x^4 + x^3 + 1. \quad (1)$$

На основе этих полиномов и были созданы модели генераторов M-последовательностей.

АКФ и ВКФ псевдослучайных последовательностей

ПСП, чьи корреляционные свойства необходимо оценивать, являются дискретными сигналами, принимающими конечное множество значений. Для нахождения АКФ вещественного дискретного сигнала $\{u_j\}$ была использована дискретная свертка (2) вида [8]:

$$B_u(n) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} u_j \cdot u_{j-n}. \quad (2)$$

Формула для расчета ВКФ (3) двух таких дискретных сигналов $\{u_j\}$ и $\{v_j\}$ при этом имеет вид [8]:

$$B_{uv}(n) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} u_j \cdot v_{j-n}. \quad (3)$$

Именно эти формулы использовались в моделировании для исследования корреляционных свойств ПСП.

Программная реализация генератора ПСП

Алгоритм генерации M-последовательности был реализован в виде программного кода в среде MathCAD (рис. 2).

Суть работы программного кода сводится к следующему. Матрицей $m2$ задается сдвиговый регистр, для которого прописывается начальное состояние ячеек памяти. В первой строке кода создается одномерный массив S , равный $m2$. Значение выходного сигнала на каждом такте s_j зависит только от тех значений сигнала в регистре сдвига, которые соответствуют ненулевым коэффициентам порождающего полинома $g_1(x)$ (1). Смещение нумерации на одну позицию связано с тем, что отсчет в среде MathCAD по умолчанию ведется с нуля. После их суммирования по модулю 2 значения входного сигнала сдвигаются на 1 позицию в регистре сдвига, а полученное на выходе значение по обратной связи передается в первую ячейку. Процедура повторяется до тех пор, пока комбинация значений сигнала в регистре сдвига не повторится.

```

m2 := (0 1 1 1 0 1 0 0 1 0 1 1 0 0 0)
m2 := m2T
S := | s0 ← m2
      M0 ← (s0)4 ⊕ (s0)6 ⊕ (s0)7 ⊕ (s0)8 ⊕ (s0)12 ⊕ (s0)14
      for j ∈ 1..32766
      | sj ← | for i ∈ 0..13
              | xi+1 ← (sj-1)i
              | x
              | (sj)0 ← Mj-1
              | Mj ← (sj)4 ⊕ (sj)6 ⊕ (sj)7 ⊕ (sj)8 ⊕ (sj)12 ⊕ (sj)14
      | M

```

Рис. 2. Листинг программного кода генератора М-последовательности длиной 215-1

Оценка адекватности модели генератора ПСП

На следующем этапе были проверены свойства сгенерированной М-последовательности. Программный код для проверки *Свойства №1* представлен на рис. 3.

```

m1 := submatrix(m, 0, 215 - 2, 0, 0)
m2 := submatrix[m, 215 - 1, [2 · (215 - 1) - 1], 0, 0]
m3 := submatrix[m, 2 · (215 - 1), [3 · (215 - 1) - 1], 0, 0]
T := | T ← 215 - 1 if m1 = m2 ∧ m2 = m3
      | T ← 0 otherwise
      | T
T = 3.2767 × 104   Период   215 - 1 = 3.2767 × 104

```

Рис. 3. Листинг программного кода для проверки свойства периодичности

В рамках данной проверки была сгенерирована М-последовательность m длиной $L = 3 \cdot (2^{15} - 1)$. Из нее последовательно были вырезаны части, длина которых составляет $2^{15} - 1$, и занесены в матрицы $m1$, $m2$ и $m3$, соответственно. Проверка условия периодичности заключалась в следующем: если все эти части тождественно равны друг другу, то в переменную T вписывается

число $2^{15} - 1$, иначе - ноль. Как видно в конце программного кода период действительно равен $2^{15} - 1$. Значит, свойство периодичности выполняется.

Следующим проверялось соотношение количества единиц и нулей в M -последовательности (*Свойство №2*). Соответствующий фрагмент программного кода представлен на рис. 4.

На первом шаге было вычислено количество единиц $N1$ путем арифметического сложения всех элементов последовательности. Далее, путем вычитания из длительности одного периода последовательности T количества единиц в ней $N1$ было подсчитано количество нулей $N0$. Затем была вычислена разница между $N1$ и $N0$. Она оказалась равна 1, что подтверждает выполнение проверяемого свойства.

$$\begin{aligned}
 N1 &:= \sum_{i=0}^{T-1} m1_i = 1.6384 \times 10^4 \\
 N0 &:= T - N1 = 1.6383 \times 10^4 \\
 N1 - N0 &= 1
 \end{aligned}$$

Рис. 4. Листинг программного кода для проверки соотношения количества единиц и нулей

Для проверки *Свойства №3* был реализован программный код, который создает все циклические сдвиги исходной последовательности, приведенный на рис. 5.

```

Mm(m) :=
  Mm0 ← m
  for i ∈ 1.. T - 1
    for j ∈ i.. T - 1
      p_j ← m_{j-i}
    for j ∈ T - i.. T - 1
      p_{j-(T-i)} ← m_j
    Mm_i ← p
  Mm
  
```

Рис. 5. Листинг программного кода для генерации циклических сдвигов M -последовательности

В данном случае сгенерированная исходная M -последовательность сдвигается на каждом такте в цикле на одну позицию вправо, а из последней ячейки памяти содержимое переносится в первую ячейку сдвигового регистра. Таким образом, образуется $T - 2$ копия исходной M -последовательности в дополнении к ней.

Следующая часть программного кода приведена на рис. 6. Данный код предназначен для принятия решения о принадлежности произвольной последовательности длиной T ансамблю циклических сдвигов M -последовательности.

```

Pr(a) :=
  n ← 0
  for i ∈ 0.. T - 1
    n ← 1 if a = Mm(m1)_i
  n
  
```

Рис. 6. Листинг программного кода по определению принадлежности произвольной последовательности к сгенерированному ансамблю

Если проверяемая последовательность принадлежит сгенерированному ансамблю М-последовательностей, то выдается положительное решение в виде «1», в противном случае – отрицательное решение в виде «0».

На следующем шаге были выполнены операции суммирования по модулю два всех последовательностей друг с другом, а также проверка на принадлежность результирующей кодовой комбинации ансамблю реализаций и определение номера результирующей кодовой комбинации в ансамбле М-последовательностей. Листинг программного кода приведен на рис. 7.

Последним проверялось свойство о наличии в одном периоде М-последовательности серий из нулей или единиц определенной длины (*Свойство №4*). В работе [6] указано, что любая М-последовательность содержит $2^{n-(p+2)}$ серий как «единиц», так и «нулей», где p – длина серии.

Код программы, реализующий поиск серий из единиц и нулей, представлен на рис. 8.

```

S := | for i ∈ 0..T-1
      |   for j ∈ 0..T-1
      |     | Aj ← m1j ⊕ (Mm(m1)i)j
      |     | Oj ← 0
      |     | Si ← 1 if Pr(A) = 1 ∨ A = O
      |     | Si ← 0 otherwise
      | S
Nm(a) := | n ← 0
          | for i ∈ 0..T-1
          |   n ← i if a = Mm(m)i
          | n

```

Рис.7. Листинг программного кода по расчету сумм по модулю два и определению номера результирующей кодовой комбинации

```

K(a,N) := | k ← 0 | 1
          | for i ∈ 0..N-1 | 2
          |   mi ← 1 | 2
          |   for j ∈ 0..N-1 | 3
          |     | b ← a0,k | 4
          |     | for i ∈ k+1..N-1 | 5
          |     |   | mj ← mj + 1 if a0,i = b | 6
          |     |   | otherwise | 7
          |     |   | k ← i | 8
          |     |   | cj,0 ← b | 9
          |     |   | cj,1 ← mj | 10
          |     |   | b ← a0,i | 11
          |     |   | break | 12
          |     | break if k > N-2 | 13
          | cj,1 ← cj,1 + 1 if a0,N-1 = a0,N-2 | 14
          | otherwise |
          |   | cj+1,0 ← a0,N-1 | 15
          |   | cj+1,1 ← 1 | 16
          | c

```

Рис. 8. Программная реализация алгоритма поиска количества серий из нулей и единиц

Для поиска количества серий из единиц и нулей нужно задать M -последовательность a и длительность одного периода N этой последовательности. В первой и второй строчках кода задаются значения переменной k для счетчика и вектор m , необходимый для отслеживания количества повторяющихся битов. В пятой строчке начинается перебор каждого бита последовательности: если предыдущий бит равен текущему, то к текущему элементу m_j прибавляется единица, а если нет, то запоминается номер текущего бита i , в первую строку двумерной матрицы c вносится значение бита изначальной последовательности, а во вторую строку - значение счетчика m_j , которое равно количеству битов одного типа. Цикл закончится, когда анализ дойдет до предпоследнего бита. В четырнадцатой строчке программы отдельно осуществляется анализ последнего бита. Если он равен предпоследнему, то количество повторившихся битов, записанное на предыдущем шаге, увеличивается на 1, если нет, то в последнее значение двумерной матрицы c запишется последний бит анализируемой M -последовательности, а в количество повторений запишется 1. В шестнадцатой строчке происходит вывод результата.

На последнем этапе проверки адекватности модели было проверено выполнение *Свойства №4*. Для этого был создан программный код по поиску числа серий произвольной длины (рис. 9) и протестирована его работа на примере последовательности длиной $2^6 - 1$.

<p>Поиск серии максимальной длины</p> <p>$Y := 2^{n-1}$ Общее количество различных серий</p> <p>$Y = 32$</p> <p>$X1 := \begin{cases} X \leftarrow (K(a, N^T))_{1,0} \\ \text{for } i \in 1..Y-1 \\ \begin{cases} X \leftarrow (K(a, N^T))_{1,i} \text{ if } (K(a, N^T))_{1,i} > X \\ X \leftarrow X \text{ otherwise} \end{cases} \\ X \end{cases}$</p> <p>$X1 = 6$ Наибольшая длина серии</p>	<p>Поиск количества серий длины q</p> <p>$q := 1$</p> <p>$X2 := \begin{cases} x \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 1..Y-1 \\ \begin{cases} x \leftarrow x+1 \text{ if } (K(a, N^T))_{1,i} = q \\ x \leftarrow x \text{ otherwise} \end{cases} \\ x \end{cases}$</p> <p>$X2 = 16$ Количество серий длиной q</p>
--	--

Рис. 9. Оценка числа серий «единиц» и «нулей» различной длины в M -последовательности

Результат работы программного кода полностью совпал с данными представленными в табл. 1.

Таблица 1

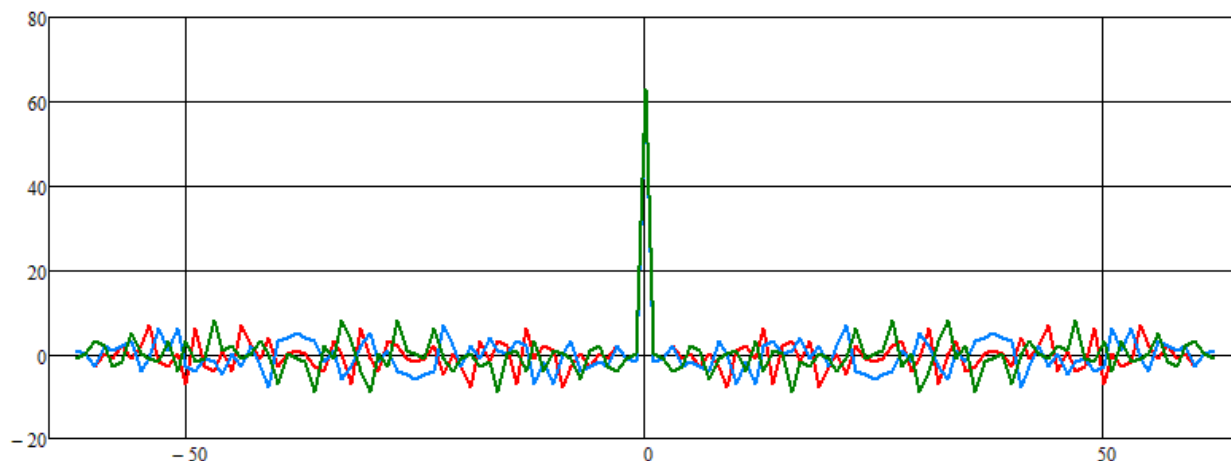
Распределение длин серий в M -последовательности длиной $L=2^6-1$

Длина серии	Число серий		Общее число двоичных символов
	единиц	нулей	
1	8	8	16
2	4	4	16
3	2	2	12
4	1	1	8
5	0	1	5
6	1	0	6

Таким образом, создана программа оценки заявленных свойств для M -последовательности, демонстрация результатов работы которой полностью подтвердила, что реализованный программно алгоритм генерации действительно позволяет сгенерировать M -последовательность произвольной длины.

Исследования корреляционных свойств M последовательностей

При исследовании АКФ сгенерированной M-последовательности длиной N обращалось внимание на максимальный уровень ее боковых лепестков. Согласно *Свойству №5* величина боковых пиков должна быть близка к $1/\sqrt{N}$. На рис. 10 показаны АКФ трех кодовых комбинаций из сгенерированной M-последовательности длиной 63 на основе полинома $x^6 + x + 1$, а также найденные с помощью встроенного оператора MathCAD уровни боковых пиков. Этот уровень должен быть близок к $1/\sqrt{63} \approx 0,126$.



$\max(K1) = 7$ $\max(K2) = 7$ $\max(K3) = 8$ Максимум боковых лепестков положительной полярности

$\max(-K1) = 8$ $\max(-K2) = 8$ $\max(-K3) = 9$ Максимум боковых лепестков отрицательной полярности

$$Abs1 := \frac{(\max(\max(K1), \max(-K1)))}{63} = 0.127$$

$$Abs2 := \frac{(\max(\max(K2), \max(-K2)))}{63} = 0.127 \quad \text{Максимальный уровень боковых лепестков}$$

$$Abs3 := \frac{(\max(\max(K3), \max(-K3)))}{63} = 0.143$$

Рис. 10. АКФ M-последовательности длиной 63 и двух ее циклически сдвинутых копий: по оси абсцисс отложены дискретные отсчеты времени, а по оси ординат - значения АКФ

Красным цветом (K1) выделена АКФ исходной кодовой последовательности из ансамбля M-последовательностей, синим цветом (K2) – АКФ циклически сдвинутой на 15 символов копии, а зеленым (K3) – АКФ циклически сдвинутой на 45 символов копии.

Графические зависимости АКФ представленных кодовых комбинаций имеют максимальное значение величиной 63 в главном лепестке при отсутствии временного сдвига, что характерно для АКФ любых сигналов, а относительный уровень найденных боковых пиков близок к 0,126, что соответствует теоретическим сведениям для M-последовательности. Также АКФ любой кодовой комбинации симметрична относительно главного максимума.

При исследовании корреляционных свойств ВКФ кодовых комбинаций M-последовательности производился поиск их максимального значения (главный максимум) и боковых пиков.

В качестве примера на рис. 11 приведены ВКФ двух пар кодовых комбинаций M-последовательности.

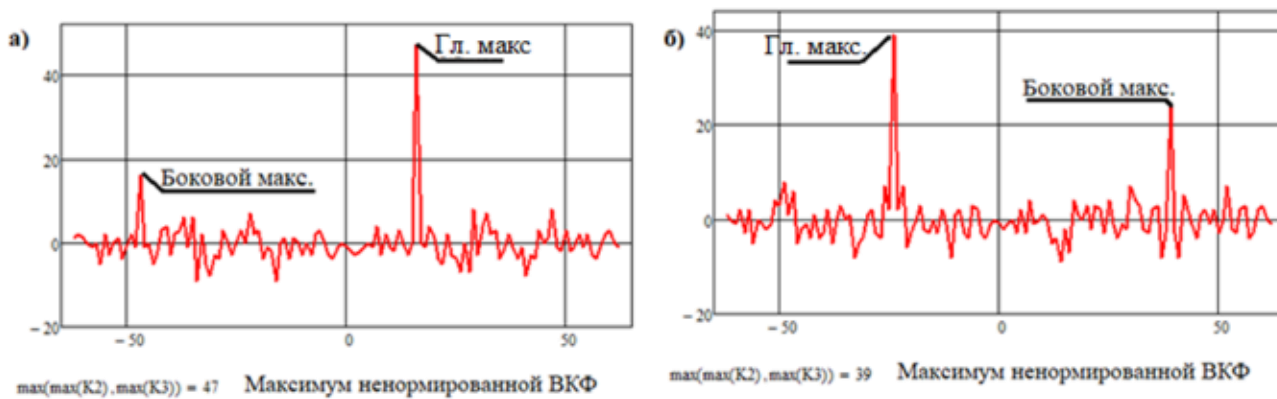


Рис. 11. ВКФ исходной кодовой комбинации длины 63 и ее двух сдвинутых копий:
а) на 16 символов, б) на 39 символов

Из приведенных графических зависимостей можно сделать несколько выводов:

- ВКФ являются несимметричными относительно главного максимума;
- для различных пар кодовых последовательностей боковые максимумы ВКФ имеют разный уровень, равно как и главные максимумы;
- в ансамбле кодовых последовательностей есть такие пары, боковые максимумы ВКФ которых принимают значения, близкие к главному максимуму.

Минимальное значение среди боковых максимумов ВКФ всех попарных комбинаций М-последовательностей составило 0,516.

Заключение

Анализ модельных результатов исследования АКФ ансамбля М-последовательностей подтвердил известные теоретические положения, представленные в научно-технических источниках.

Исследования ВКФ ансамбля М-последовательностей дали модельную оценку несколько ниже, чем теоретическое значение. Последнее определялось выражением вида $6/\sqrt{N}$, представленным в [9], но полученное различие не является определяющим.

Таким образом, в работе показана возможность реализации генератора ПСП в виде М-последовательности в рамках среды MathCAD и проведена проверка адекватности работы построенной модели.

Представленные в разделе результаты могут найти применение в образовательном процессе в качестве основы для выполнения виртуальной лабораторной работы «Исследование свойств ПСП, применяемых в системах сотовой связи технологии CDMA» по дисциплине «Системы подвижной связи».

Работа выполнена в соответствии с тематическим планом кафедры судовых радиотехнических систем по инициативной прикладной научно-исследовательской работе (исследованию) на 2024–2025 г.г. по теме: «Модельные исследования характеристик судовых радиотехнических систем и процессов их функционирования».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлин А. Н. Цифровые сотовые системы связи. – М.: Эко-Трендз, 2007. – 296 с.
2. Лекция 6: Стандарты третьего поколения // ИНТУИТ. Национальный открытый университет. Электрон. дан. Режим доступа URL: <https://intuit.ru/studies/courses/551/407/lecture/9340> (дата обращения: 24.06.24).
3. Эволюция стандарта IS-95 в cdma2000. Принципы построения и архитектура. Отличительные особенности. Электрон. дан. Режим доступа URL: <https://intuit.ru/studies/courses/551/407/lecture/9338>. (дата обращения: 26.06.24).
4. Весоловский К. Системы подвижной радиосвязи / пер. с польск. И. Д. Рудинского; под ред. А. И. Ледовского. – М.: Горячая линия-Телеком, 2006. – 536 с.

5. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.
6. Диксон Р. К. Широкополосные системы: пер. с англ. / под ред. В. И. Журавлева. – М.: Связь, 1979. – 304 с.
7. Шнайер Б. Прикладная криптография. Протоколы, алгоритмы, исходные тексты на языке Си. - М.: Издательство ТРИУМФ, 2003 – 816 с.
8. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: «Высшая школа», 2000. – 462 с.
9. Разделение каналов по форме в широкополосных системах передачи информации // Банк лекций SIBLEC.RU. Электрон. дан. Режим доступа URL: <https://siblec.ru/telekommunikatsii/razdelenie-kanalov-po-forme-v-shirokopolosnykh-sistemakh-peredachi-informatsii#3.3> (дата обращения: 28.06.24).

MODEL STUDIES OF CORRELATION PROPERTIES M-SEQUENCES OF THE CDMA STANDARD WITHIN MATHCAD

¹Volkhonskaya Elena Vyacheslavovna, Grand PhD in Engineering sciences,
the associate professor, the professor of Maritime Institute department
of ship radio engineering systems

²Korotey Evgeniy Vladimirovich, the associate professor
of Maritime Institute department of ship radio engineering systems

^{1,2}Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,
e-mail: volkhonskaya_e@mail.ru; eugeniy_korotey@mail.ru

In this paper, a review of pseudorandom sequences used in the organization of forward and reverse communication channels within the CDMA standard is carried out. In the MathCAD environment, software codes have been developed to generate an arbitrary length M-sequence, as well as procedures for testing this sequence for compliance with the requirements imposed on it. The performance of the model has been tested for the cases of several generating polynomials.

АНАЛИЗ НАУЧНЫХ ПОДХОДОВ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ И ПРОГНОЗИРОВАНИЮ КОМПЬЮТЕРНЫХ АТАК

¹Ильяшов Андрей Николаевич, ассистент, кафедра информационной безопасности

²Подтопельный Владислав Владимирович, ст. преподаватель,
кафедра информационной безопасности

³Жестовский Александр Георгиевич, доцент, кафедра информационной безопасности

^{1,2,3}Институт цифровых технологий ФГБОУ ВО «КГТУ», Калининград, Россия,
e-mail: ¹andrej.ilyashov@klgtu.ru; ²ionpvv@mail.ru; ³ionpvv@mail.ru

Рассматриваются особенности применения различных методов моделирования в области информационной безопасности автоматизированных систем. Проводится анализ различных методов поиска оптимальных последовательностей действий злоумышленника при аудите. Представлены особенности применения различных методов, основанных на теории вероятности, векторов, интеллектуальных технологий; а также рассматриваются задачи, возникающие при аудите (анализе рисков) информационной безопасности.

Для защиты информационных систем важно не только быть в курсе новых угроз, но и разрабатывать действенные методы, которые смогут обнаруживать как явные, так и скрытые признаки компрометации. Это особенно актуально при аудите многоуровневых систем, учитывая специфику технологий передачи данных и защитных механизмов. Успешность исследования отдельных этапов компрометации во многом определяет, как будет развиваться вектор атаки или выбираться новое направление для ее реализации [1-4].

Существует множество методов обнаружения и анализа вредоносных воздействий, таких как статистические методы, вейвлет-анализ, кластерный анализ, фрактальный анализ, метод опорных векторов, генетические алгоритмы, иммунные системы, нейронные сети, деревья решений, байесовские сети и экспертные системы. Однако, несмотря на многообразие методов, они не всегда способны учесть все тонкости прогнозирования атак в условиях недостатка информации.

Вейвлет-анализ помогает выделить значимые области данных, сглаживая шумы посредством подбора коэффициентов признаков инцидентов по базисным функциям. Фрактальный анализ обнаруживает самоподобные интервалы данных в сетевом трафике и упрощает принятие решения о вторжении на основе значений результирующего показателя Херста. Кластерный анализ разделяет трафик на группы нормального и аномального состояния. Нейронные сети часто используются для обнаружения аномалий, но требуют значительных ресурсов и времени на обучение. Марковские модели применяются для оценки и прогнозирования состояния сложных технических объектов, включая защищённые объекты критической инфраструктуры. В работах таких авторов, как Артеменков С. Л., Алхимов В. И., Баранов С. Н., Беляева О. Б., Кубарев А. В., Лапсарь А. П. и Думин П. Н., рассматриваются различные аспекты использования марковских моделей.

Работа Марковой О. С. исследует вектор атаки через призму психологических склонностей нарушителя с использованием теории вероятности. Способы формирования векторов, включая применение марковских сетей, описаны в работах Носаль И. А. [6-8].

Исследования по моделированию атак на основе математических моделей включают применение теории автоматов, нейронных сетей и вероятностных графов. Теория автоматов проста для описания, но сложна для реализации из-за неполноты информации и трудностей в расчёте функций переходов. Байесовские графы атак представляют собой направленные ациклические графы. При построении расширенного графа используются операции логической алгебры (конъюнкция и дизъюнкция). Они позволяют учитывать неопределённость исходных данных о моделируемых атаках. Метод экспертных оценок имеет свои ограничения: субъективность, неполнота информации и сложности повторяемости процесса могут снизить его эффективность. Также актуальны исследования по анализу контента форумов DarkNet для прогнозирования новых векторов атак на основе частоты упоминаний методов атак и эмоциональной окраски обсуждений.

Прогнозирование новых уязвимостей программного обеспечения остаётся важной темой исследований. Эффективность различных методов прогнозирования зависит от типа программного обеспечения и его версии. Анализ подходов к прогнозированию возможных векторов компьютерных атак на новую архитектуру системы информационной безопасности показывает необходимость адаптации старых методов к новым технологиям, таким как облачные вычисления и интернет вещей. Таким образом, анализ рисков информационной безопасности требует комплексного подхода с использованием разнообразных методов и моделей. Необходимо учитывать динамику угроз и адаптировать существующие методологии к новым условиям для повышения эффективности защиты информационных систем.

В дополнение к традиционным деревьям атак существуют их расширенные версии, которые включают в себя новые типы вершин, такие как «Order AND». Эти вершины обозначают, что злоумышленник должен достичь определённых целей, представленных дочерними вершинами, в определённом порядке. Такой подход позволяет более точно моделировать сложные сценарии атак, где последовательность действий играет ключевую роль для достижения успеха. Например, в атаках на многоуровневые системы этот метод может помочь выявить критические этапы, которые необходимо преодолеть для успешного завершения атаки.

Это особенно важно в условиях, когда информация о потенциальных угрозах может быть неполной или недостоверной. Метод экспертных оценок, широко применяемый в сфере информационной безопасности, имеет свои ограничения: субъективность, неполнота информации. Этот метод не позволяет создать исчерпывающий список мер по защите информации и может привести к недооценке или переоценке рисков. Важно учитывать, что эксперты могут иметь разные взгляды на одни и те же угрозы, что усугубляет проблему и может привести к конфликтам мнений при принятии решений.

Исследования по анализу информации из DarkNet, позволяют прогнозировать векторов компьютерных атак на основе частоты упоминаний о них с учётом эмоциональной лексики и субъектов, участвующих в обсуждении. Анализ таких данных может помочь выявить новые угрозы и подготовиться к ним заранее. Использование методов обработки естественного языка (NLP) для анализа текстов может значительно повысить точность выявления тенденций. Прогнозирование новых уязвимостей программного обеспечения также является актуальной темой исследований. Эти методы основываются на анализе накопленной информации о количестве уязвимостей и их типах в предыдущих версиях программного обеспечения. Методы статистического анализа и машинного обучения могут быть полезны для улучшения точности прогнозирования, но они требуют качественных данных для обучения моделей.

Анализ подходов к прогнозированию возможных векторов компьютерных атак на новые архитектуры систем информационной безопасности с использованием виртуального программного обеспечения также является актуальной темой исследований, поскольку при этом появляется возможность масштабировать и адаптировать к различным инфраструктурам среды изучения вредных воздействий. Это позволяет успешно применять при анализе угроз старые векторы компьютерных атак для новых архитектур информационных систем (облачные технологии, интернет вещей). Необходимость учёта динамики угроз и адаптации существующих методологий к новым условиям требует дальнейших исследований и разработок эффективных инструментов для защиты информационных систем от современных киберугроз.

Интеграция теоретических подходов с практическими данными будет способствовать созданию более надёжных систем защиты информации и повышению общей устойчивости к атакам. Таким образом, исследование методов анализа угроз и прогнозирования уязвимостей остаётся актуальным направлением в области информационной безопасности. Необходимость учёта динамики угроз и адаптации существующих методологий к новым условиям требует дальнейших исследований и разработок эффективных инструментов для защиты информационных систем от современных киберугроз. Важно продолжать развивать как теоретические модели анализа угроз, так и практические инструменты их реализации с учётом новых технологий и методов атаки.

Большинство исследований, посвящённых оценке рисков информационной безопасности, основываются на законодательстве и стандартах, таких как ISO 27005 [1-4]. В большинстве работ угрозы рассматриваются с точки зрения защищаемой организации, и только в одной из них учиты-

ваются мотивы и критерии нарушителя. Это ограничение может привести к недостаточной эффективности защитных мер, поскольку понимание мотивации злоумышленников является ключевым фактором для создания адекватных стратегий безопасности.

В большинстве исследований предполагается, что существует универсальный способ защиты от каждого типа угроз. Однако в одной из работ предлагается альтернативный подход, основанный на использовании ориентированного графа и системы уравнений Колмогорова. Этот метод позволяет разделить механизмы защиты на типы и анализировать остаточные риски информационной безопасности. Такой подход может повысить адаптивность системы защиты к изменяющимся угрозам и увеличить её общую эффективность [8-10].

Некоторые исследования учитывают динамическое изменение угроз с течением времени. Например, в одной из работ предлагается использовать неструктурированные данные из интернета для оценки рисков. Однако в этой работе не указаны конкретные источники данных и информация, которая должна учитываться. Это подчёркивает необходимость разработки более чётких методик сбора и анализа данных для обеспечения актуальности оценки рисков.

Интеграция практических данных в исследовательские работы является важным шагом к повышению их релевантности. В зарубежных исследованиях оценки рисков информационной безопасности авторы часто рассматривают различные задачи:

1. Улучшение эффективности экспертного метода. Изучаются новые методы формирования экспертных групп и этапов оценки рисков информационной безопасности. Это может повысить точность и скорость анализа рисков.

2. Оптимизация расчётов. Численные методы и инструменты автоматизации используются для оптимизации расчётов по оценке рисков информационной безопасности. Однако ограничения методологий оценки рисков остаются, что требует дальнейших исследований в этой области.

3. Формирование перечня угроз. Теория графов и деревья компьютерной атаки применяются для оптимизации формирования перечня угроз информационной безопасности. Это позволяет более эффективно идентифицировать и классифицировать потенциальные угрозы.

4. Модели противоборства. Применяется теория игр, что позволяет анализировать динамику процессов вторжения, противодействия вторжению. Эти модели позволяют предсказать действия как атакующих, так и защитников.

5. Изменение вероятности. Модели, учитывающие изменение вероятности реализации компьютерной атаки во времени, способствуют более точной оценке рисков. Это позволяет адаптировать стратегии защиты к изменяющимся условиям.

6. Обнаружение атак. Предлагается механизм обнаружения компьютерных атак с помощью машинного обучения, который обеспечивает обнаружение аномального поведения пользователя в режиме реального времени. Это открывает новые перспективы для быстрого реагирования на инциденты.

Сравнение системы защиты информации с иммунной системой человека помогает лучше понять механизмы её функционирования. Подобно тому как иммунная система реагирует на патогены, система информационной безопасности должна быть способна быстро идентифицировать и нейтрализовать угрозы.

Таким образом, исследование методов анализа рисков в области информационной безопасности остаётся актуальным направлением научных исследований. Необходимость учёта динамики угроз и адаптации существующих методологий к новым условиям требует дальнейших исследований и разработок эффективных инструментов для защиты информационных систем от современных киберугроз. Важно интегрировать теоретические разработки с практическими данными для повышения эффективности защиты информации в условиях постоянно меняющегося киберпространства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 50922-2006. Защита информации. Основные термины и определения. – Введ. 2008-12-27. – М.: Изд-во стандартов, 2008. – 12 с.

2. Банк данных угроз БИ ФСТЭК России: [сайт]. – URL: <https://bdu.fstec.ru/> (дата обращения: 17.11.2019). – Текст: электронный. 7 Список уязвимостей ФСТЭК России: [сайт]. – URL: <https://bdu.fstec.ru/vul/> (дата обращения: 17.11.2019). – Текст: электронный.

3. ГОСТ Р ИСО/МЭК 27005-2010. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Менеджмент риска информационной безопасности. – Введ. 2009-05-25. – М.: Изд-во стандартов.
4. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408-1-2008. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Критерии оценки безопасности информационных технологий. Часть 1. Функциональные требования безопасности. – Введ. 2009-10-01. – М.: Изд-во стандартов.
5. ГОСТ Р ИСО/МЭК ТО 18044-2007 Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Менеджмент инцидентов ИБ. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200068822> (дата обращения: 30.10.2021)
6. Сюн Ц. Построение модели оценки угроз уязвимости информационной сети для оценки рисков CPS / Ц. Сюн, Ц. Ву // Computer Communications. – 2020. – № 155. – С. 197–204. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2020.03.026>. – Текст: электронный (дата обращения: 08.07.2021).
7. Носаль И. А. Потенциал нападения и типовая модель нарушителя // Информационная безопасность и защита персональных данных: Проблемы и пути их решения: материалы VI Межрегиональной научно-практической конф. (г. Брянск, 28 апреля 2014г.). Брянск: Издательство БГТУ, 2014. С.96-101.
8. Ажмухамедов И. М. Анализ и управление комплексной безопасностью на основе когнитивного моделирования // Управление большими системами: сборник трудов. 2010. № 29. С.5-15.
9. Абрамов Е. С., Кобилев М. А., Крамаров Л. С., Мордвин Д. В. Использование графа атак для автоматизированного расчета мер противодействия угрозам информационной безопасности сети // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. №2(151). С.92-100.
10. Котенко И. В., Нестерук Ф. Г., Шоров А. В. Гибридная адаптивная система защиты информации на основе биометафор «нервных» и нейронных сетей // Инновации в науке. 2013. №16-1. С.79-83.

ANALYSIS OF SCIENTIFIC APPROACHES TO THE DEFINITION AND PREDICTION OF COMPUTER ATTACKS

¹Ilyashov Andrey Nikolaevich, Assistant, Department of Information Security

²Podtopelny Vladislav Vladimirovich, senior lecturer, Department of Information Security

³Alexander Gestovsky, Associate Professor, Department of Information Security

^{1,2,3}Institute of Digital Technologies, KSTU, Kaliningrad, Russia,
e-mail: ¹andrej.ilyashov@klgtu.ru; ²ionpvv@mail.ru

This paper discusses the features of the application of various modeling methods in the field of information security of automated systems. The analysis of various methods of searching for optimal sequences of actions of the attacker during the audit is carried out. The paper presents the features of the application of various methods based on probability theory, vectors, and intelligent technologies. The tasks arising during the audit (risk analysis) of information security are also considered.

ОПЕРАТОРНЫЕ МЕТОДЫ, СОГЛАСОВАННЫЕ С СИГНАЛОМ

¹Пахотин Валерий Анатольевич, д-р физ.-мат. наук, профессор,
профессор ОНК Института высоких технологий

²Власова Ксения Валерьевна, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры судовых
радиотехнических систем Морского института

³Алещенко Алексей Николаевич, канд. физ.-мат. наук, доцент ОНК Института
высоких технологий

^{1,3}Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия,
e-mail: ¹VPaхotin@kantiana.ru

²Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ»,
Калининград, Россия, e-mail: ²p_ksenia@mail.ru

Приведены результаты исследования вопросов оптимальности операторных методов обработки сигналов. Вводится фактор, связанный с различием формы сигнала в реализации и копии сигнала, который совместно с дисперсией шума в реализации, определяет минимум функционала правдоподобия, а следовательно, и минимум функции риска. Показано, что обработка сигналов с амплитудно-фазовой модуляцией операторными методами не является оптимальной. Предлагается оптимальная обработка сигналов с амплитудно-фазовой модуляцией операторными методами, согласованными с сигналом. Приведены результаты модельных расчетов.

Введение

В настоящее время основой обработки сигналов являются спектральный, корреляционный, угловой спектральный анализ [1-5]. Будем в дальнейшем называть их операторными методами в связи с тем, что их основой является оператор преобразования Фурье. Одним из важных вопросов при использовании операторных методов является вопрос об их оптимальности. В принятой реализации, как правило, содержится совокупность сигналов и аддитивный нормальный шум. В этом случае, в соответствии с положениями теории оптимального приема (метод максимального правдоподобия), обработка реализации считается оптимальной, если достигается минимум функции потерь [1, 4, 5]. При этом функционал правдоподобия достигает своего минимального значения, равного дисперсии шума в реализации. Оценки параметров в этом случае являются не смещенными, эффективными, достаточными [1., стр 162]. В литературе минимум функционала правдоподобия связывается с дисперсией шума [7-10]. Однако имеется и другой фактор, практически не отмеченный в литературе, влияющий на значение минимума функционала правдоподобия. Он определяется соответствием правой и левой частей подынтегрального выражения функционала правдоподобия по количеству и форме сигналов. Наличие этого фактора увеличивает значение минимума функционала правдоподобия. Для оптимизации операторных методов необходимо изменять порождающие функции операторных методов, согласовывая их с сигналом. В результате предлагается модернизация операторных методов, которые будем называть операторными методами, согласованными с сигналом.

Таким образом, целью работы является исследование оптимальности операторных методов при использовании сигналов с амплитудно-фазовой модуляцией.

Основы теории

Рассмотрим спектральную обработку сигнала с амплитудной модуляцией. Запишем принятую реализацию в виде

$$\hat{y}(t) = \hat{U}_0 \mu(t) \exp(i\omega_0 t) + \hat{U}_{ш}(t), \quad (1)$$

где \hat{U}_0 – комплексная амплитуда сигнала;

$\mu(t)$ – функция, модулирующая амплитуду сигнала;

ω_0 – круговая частота;

$\hat{U}_{ш}(t)$ – шумовая составляющая в комплексном виде с дисперсией σ^2 , интервалом корреляции τ_k , и средним значением квадратурных компонент, равным нулю.

На основании (1) запишем функционал правдоподобия в том виде, из которого следует выражение для спектрального анализа

$$\Delta(\omega_0) = \frac{1}{T} \int_0^T |\hat{y}(t) - \hat{U}_0 \exp(i\omega_0 t)|^2 dt, \quad (2)$$

где штрихами отмечены неизвестные оцениваемые параметры сигнала.

Модулирующая функция $\mu(t)$ искажает огибающую сигнала, по сравнению с радиоимпульсом, для которого амплитуда постоянна. В результате, правая и левая части подынтегрального выражения не соответствуют друг другу. Математическое ожидание от функционала в точке минимума $\omega_0 = \omega_0$ будет равно

$$M(\Delta(\omega_0)) = \sigma^2 + \frac{1}{T} \int_0^T |\hat{U}_0 \exp(i\omega_0 t)(1 - \mu(t))|^2 dt. \quad (3)$$

Если модулирующая функция равна тождественно единице, тогда второе слагаемое в (3) будет равно нулю и функционал будет иметь минимальное значение, равное дисперсии шума в реализации.

Дифференцируя (2) по амплитуде, получим выражение для спектрального анализа.

$$\hat{U}_0(\omega_0) = \frac{1}{T} \int_0^T \hat{y}(t) \exp(-i\omega_0 t) dt. \quad (4)$$

Подставляя выражение (1) для $\hat{y}(t)$ в (4), получим

$$\hat{U}_0(\omega_0) = \frac{1}{T} \int_0^T \hat{U}_0 \mu(t) \exp(i\omega_0 t) \exp(-i\omega_0 t) dt + \frac{1}{T} \int_0^T \hat{U}_{ш}(t) \exp(-i\omega_0 t) dt. \quad (5)$$

Первое слагаемое определяет спектр сигнала. В точке максимума при $\omega_0 = \omega_0$ получим оценку комплексной амплитуды

$$\hat{U}_0(\omega_0 = \omega_0) = \frac{\hat{U}_0}{T} \int_0^T \mu(t) dt. \quad (6)$$

Оценка средняя с учетом модулирующей функции. Следовательно, оценка амплитуды смещенная. Она не соответствует истинному значению амплитуды сигнала. Второе слагаемое позволяет определить дисперсию шума

$$D_{ш} = M \left(\frac{1}{T} \int_0^T \hat{U}_{ш}(t) \exp(-i\omega_0 t) dt \frac{1}{T} \int_0^T \hat{U}_{ш}^*(t) \exp(i\omega_0 t) dt \right) = \frac{\sigma^2 \tau_k}{T} = \frac{\sigma^2}{N}. \quad (7)$$

Рассмотрим второй случай. Пусть функционал правдоподобия имеет вид

$$\Delta(\omega_0) = \int_0^T |\hat{y}(t) - \hat{U}_0 \mu(t) \exp(i\omega_0 t)|^2 dt. \quad (8)$$

Правая и левая части подынтегрального выражения в этом случае соответствуют друг другу. В результате математическое ожидание от функционала в точке минимума $\omega_0 = \omega_0$ будет иметь минимальное значение

$$M(\Delta(\omega_0)) = \sigma^2. \quad (9)$$

Оно меньше, чем значение, получаемое согласно (3). Дифференцируя (8) по комплексной амплитуде и приравнивая дифференциал к нулю, получим

$$\hat{U}_0(\omega_0) = \frac{\int_0^T \hat{y}(t)\mu(t) \exp(-i\omega_0 t) dt}{\int_0^T \mu(t)^2 dt}. \quad (10)$$

Будем называть это выражение спектральным анализом, согласованным с сигналом. В нем порождающей функцией является функция $\mu(t) \exp(-i\omega_0 t)$. Раскрывая $\hat{y}(t)$ в (10), получим

$$\hat{U}_0(\omega_0) = \frac{\bar{U}_0 \int_0^T \mu(t) \exp(i\omega_0 t) \mu(t) \exp(-i\omega_0 t) dt}{\int_0^T \mu(t)^2 dt} + \frac{\int_0^T \bar{U}_ш(t) \mu(t) \exp(-i\omega_0 t) dt}{\int_0^T \mu(t)^2 dt}. \quad (11)$$

Математическое ожидание от первого слагаемого в точке максимума $\omega_0' = \omega_0$ определяет несмещенное решение

$$\hat{U}_0(\omega_0' = \omega_0) = \bar{U}_0. \quad (12)$$

Второе слагаемое определяет шумовую составляющую. Математическое ожидание от второго слагаемого равно нулю. Дисперсия шума равна

$$D_ш = M \left(\frac{\int_0^T \bar{U}_ш(t) \mu(t) \exp(-i\omega_0 t) dt}{\int_0^T \mu(t)^2 dt} \frac{\int_0^T \bar{U}_ш(t) \mu(t) \exp(i\omega_0 t) dt}{\int_0^T \mu(t)^2 dt} \right) = \frac{\sigma^2 \tau_k}{\int_0^T \mu(t)^2 dt} \quad (13)$$

Подтвердим вышеприведенные результаты модельными расчетами. Сравним эффективность обработки классическим спектральным анализом радиоимпульса и радиоимпульса треугольной формы. Для случая радиоимпульса спектральный анализ является оптимальным методом обработки. Для радиоимпульса треугольной формы спектральный анализ не является оптимальным. Амплитуды прямоугольного и треугольного радиоимпульсов 2, частоты 50 Гц. Порождающая функция равна $x = \exp(i\omega_0 t)$.

На рисунке 1 сравниваются результаты обработки спектральным анализом прямоугольного радиоимпульса и треугольного радиоимпульса.

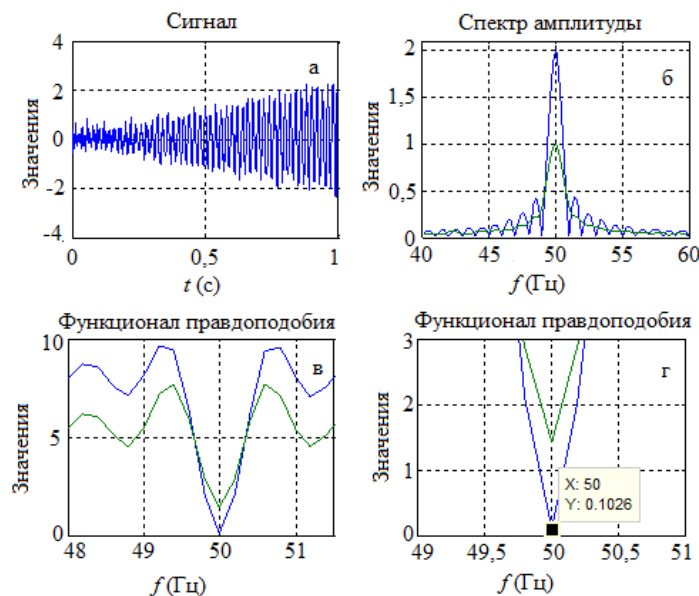


Рис. 1. Спектральная обработка радиоимпульса и радиоимпульса треугольной формы: (а) вид треугольного радиоимпульса, (б) спектры прямоугольного и треугольного радиоимпульсов, (с) функционалы правдоподобия прямоугольного и треугольного радиоимпульсов, (г) увеличенный масштаб функционалов правдоподобия

Рисунок (б) иллюстрирует согласованность спектрального анализа с радиоимпульсом. Амплитуда радиоимпульса определена вполне удовлетворительно. Она равна модельному значению 2. В то же время спектральный анализ не согласован с треугольным радиоимпульсом. В результате его амплитуда определяется средним значением 1. На рисунке (в) показаны функции правдоподобия для радиоимпульса и треугольного радиоимпульса. В связи с неоптимальностью обработки треугольного радиоимпульса, минимум функционала правдоподобия существенно превышает минимум функционала правдоподобия для прямоугольного радиоимпульса. Более отчетливо это показано на рисунке (г) в увеличенном масштабе. Минимум функционала правдоподобия для прямоугольного радиоимпульса равен 0,1, что соответствует модельному значению дисперсии шума. Минимум функционала правдоподобия для треугольного радиоимпульса равен 1,4, что иллюстрирует неоптимальность метода обработки. Нет согласованности спектрального анализа с сигналом - треугольным радиоимпульсом.

Рассмотрим эффективность спектрального анализа, согласованного с сигналом, который содержится в принятой реализации с амплитудой 2 и частотой 50 Гц (рисунок 2 (а)). Порождающая функция равна $x = \frac{t}{T} \exp(i\omega_0 t)$. На рисунке (б) показан спектр сигнала. Максимум спектра определяет оценку амплитуды. Она соответствует модельному значению 2. На рисунке (в) показан минимум функционала правдоподобия. Его значение равно 0,1, что соответствует модельному значению шума. Следовательно, обработка треугольного радиоимпульса спектральным анализом, согласованным с сигналом, является оптимальной. Решение оказывается несмещенным, эффективным и достаточным.

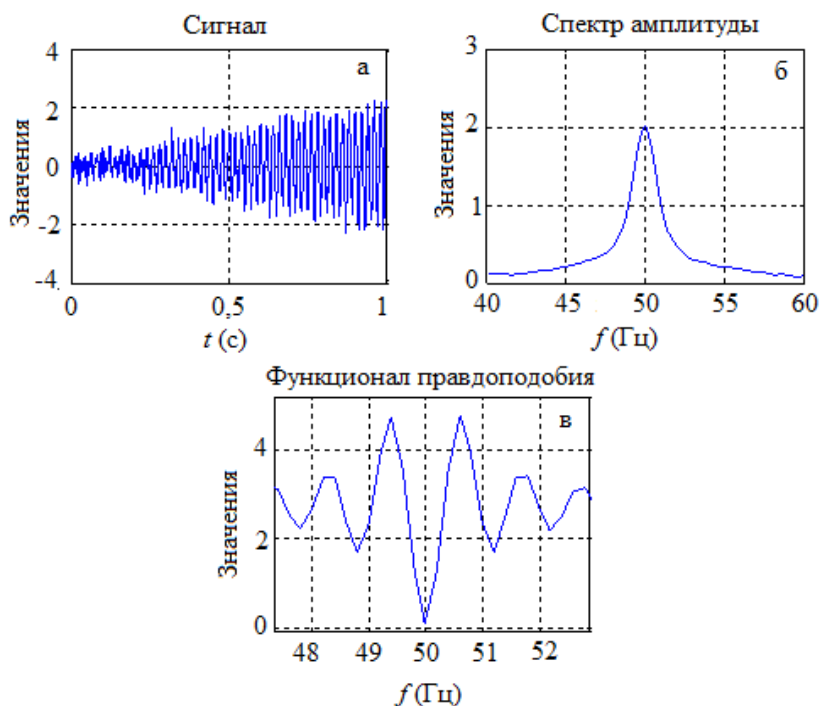


Рис. 2. Оптимальная обработка треугольного радиоимпульса спектральным анализом, согласованным с сигналом

На рисунке 3 показана обработка ЛЧМ-сигнала классическим спектральным анализом с порождающей функцией $\hat{x}(\omega_0) = \exp(i\omega_0 t)$ и обработка ЛЧМ-сигнала спектральным анализом, согласованным с сигналом с порождающей функцией

$$\begin{aligned} \hat{x}(t'_0) &= \mu(t) \exp(i\omega_0(t - t'_0)) = \exp(iAt^2) \exp(i\omega_0(t - t'_0)), \\ \hat{x}(t'_0) &= \exp(i(\omega_0 + A(t - t'_0))(t - t'_0)). \end{aligned}$$

На рисунке 3 (а) показан вид реализации, содержащей ЛЧМ-сигнал. Начальная частота 50 кГц, конечная частота 200 кГц, амплитуда равна 2, длительность ЛЧМ-сигнала 200 мкс, СКО шума 0,5. На рисунке 3 (б) показаны спектры ЛЧМ-сигнала. Кривая с маркером определяет спектр

ЛЧМ-сигнала, полученный классическим спектральным анализом. Его ширина определяется девиацией частот. Амплитуда представляет собой усредненное значение. Спектральный анализ, согласованный с сигналом (линия без маркера) определяет фактически спектр радиоимпульса с амплитудой 2 и частотой 50 кГц. На рисунке 3 (в) показана оптимальность спектрального анализа, согласованного с сигналом. Минимум функции правдоподобия (линия без маркера) равен дисперсии шума в реализации. Минимум функционала правдоподобия при классическом спектральном анализе (кривая с маркером) существенно превышает дисперсию шума в реализации и указывает на неоптимальность обработки.

Аналогичные результаты можно получить при корреляционном анализе. Таким образом, введенный операторный метод, согласованный с сигналом оптимизирует результаты обработки. Минимум функционала правдоподобия достигает значения дисперсии шума в реализации, а оценки амплитуд оказываются несмещенными.

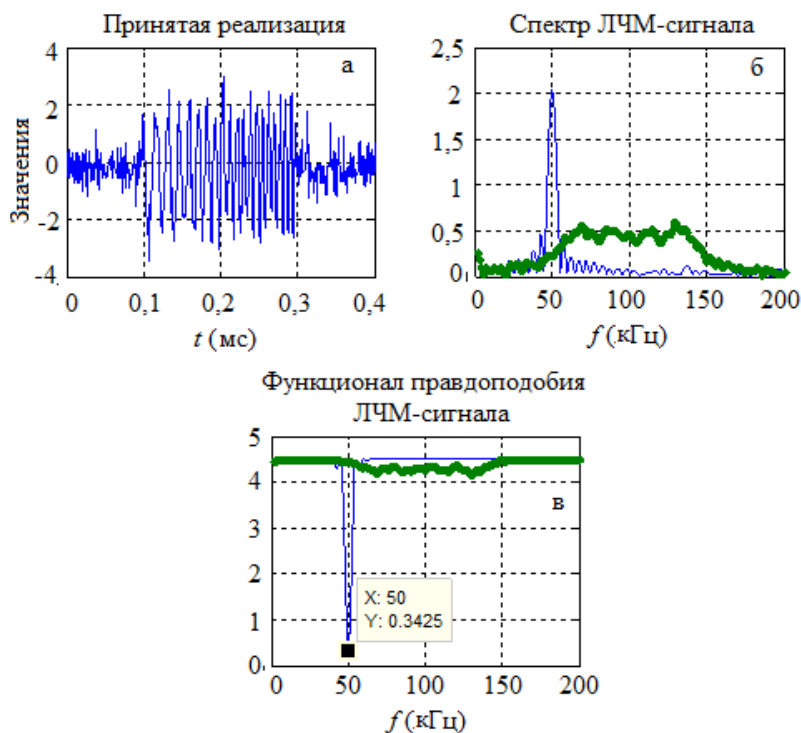


Рис. 3. Оптимальность обработки ЛЧМ-сигнала спектральным анализом, согласованным с сигналом: (а) принятая реализация с ЛЧМ-сигналом, (б) спектры ЛЧМ-сигнала, (в) функционалы правдоподобия

Заключение

1. Представлены операторные методы обработки сигналов, согласованные с сигналом. Они отличаются от классических операторных методов аналитическими выражениями для порождающей функции.

2. По результатам исследований сделан вывод: операторные методы, согласованные с сигналом оптимизируют результаты обработки. Результаты обработки этими методами сигналов с амплитудно-фазовой модуляцией характеризуются несмещенностью, эффективностью, достаточностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перов А. И. Статистическая теория радиотехнических систем. – М.: Радиотехника, 2003. – 400 с.
2. Радиотехнические системы: Учеб. Для вузов по специальности «Радиотехника»/ Ю. П. Гришин, В. П. Ипатов, Ю. М. Казаринов и др.; под ред. Ю. М. Казаринова. – М.: Высш. шк., 1990. – 496 с. ил.

3. Ван Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции. Том 1. Теория обнаружения, оценок и линейной модуляции. Нью-Йорк, 1968. / Перевод с английского под ред. проф. В. И. Тихонова. – М.: «Сов. радио», 1972. – 744 с.
4. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. – М.: Советское радио, 1969. – 752 с.
5. Тихонов В. И. Оптимальный прием сигналов. – М.: Радио и связь, 1983. – 320 с.
6. Марпл С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / С. Л. Марпл-мл.; Пер. с англ. О. И. Хабарова, Г. А. Сидоровой; Под ред. И. С. Рыжака. – Москва: Мир, 1990. – 584 с.
7. Пахотин В. А. Оптимальный прием сигналов с высоким разрешением / В. А. Пахотин, К. В. Власова, Р. В. Симонов, В. А. Бессонов, И. В. Либерман. // 21-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2019» (27–29 марта 2019 года) [Электронный ресурс]: доклады. – Москва: Московское НТО радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова. – Том Выпуск: XXI. Книга 2(2). – с. 331-336.
8. Пахотин В. А. Оптимальная обработка сигналов с высоким разрешением / В. А. Пахотин, К. В. Власова, Р. В. Симонов, С. В. Петров // Мягкие измерения и вычисления – М.: ООО «Издательский дом «Научная библиотека»», 2019. – №4 (17). – С. 56-70.
9. Сравнительный анализ методов цифровой обработки сигналов / В. А. Пахотин, К. В. Власова, С. В. Молостова // XI Международный Балтийского морской форум. XI Международная научная конференция «Морская техника и технологии. Безопасность морской индустрии». Секция «Прикладная радиофизика, радиотехника и информационная безопасность» [Электронный ресурс]: сборник докладов. Т. 2. Калининград: Изд-во БГАРФ, 2023. – С. 294-299.
10. К вопросу оптимальности методов обработки сигналов / К. В. Власова, В. А. Пахотин, Р. В. Симонов, В. А. Бессонов // IX Международный Балтийского морской форум. IX Международная научная конференция «Морская техника и технологии. Безопасность морской индустрии». Секция «Прикладная радиофизика, радиотехника и информационная безопасность» [Электронный ресурс]: сборник докладов. Т. 2. Калининград: Изд-во БГАРФ, 2021. – С. 420-424.

SIGNAL-MATCHED OPERATOR METHODS

¹Pakhotin Valery Anatolyevich, D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Professor of the Scientific and Technical Department of the Institute of High Technologies

²Vlasova Ksenia Valerievna, Ph.D. (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Department of Marine Radiotechnical Systems of the Marine Institute

³Aleshchenko Alexey Nikolaevich, Ph.D. (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Scientific and Technical Department of the Institute of High Technologies

^{1,3}Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia, e-mail: ¹VPakhotin@kantiana.ru

²Baltic Fishing Fleet State Academy FSBEI HE "KSTU", Kaliningrad, Russia, e-mail: ²p_ksenia@mail.ru

The paper presents the results of the study of the optimality of operator methods for signal processing. A factor is introduced that is related to the difference in the signal shape in the implementation and the signal copy, which, together with the noise variance in the implementation, determines the minimum of the likelihood functional and, consequently, the minimum of the risk function. It is shown that the processing of signals with amplitude-phase modulation by operator methods is not optimal. Optimal processing of signals with amplitude-phase modulation by operator methods matched with the signal is proposed. The results of model calculations are presented.

ФАКТОР СИНГУЛЯРНОСТИ ПРИ ОБРАБОТКЕ СИГНАЛОВ МЕТОДОМ МАКСИМАЛЬНОГО ПРАВДОПОДОБИЯ

¹Пахотин Валерий Анатольевич, д-р физ.-мат. наук, профессор,
профессор ОНК Института высоких технологий

²Власова Ксения Валерьевна, канд. физ.-мат. наук,
доцент кафедры судовых радиотехнических систем Морского института

³Бессонов Владимир Александрович, канд. физ.-мат. наук,
доцент ОНК Института высоких технологий

^{1,3}Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия,
e-mail: ¹VРakhotin@kantiana.ru

²Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ»,
Калининград, Россия, e-mail: ²p_ksenia@mail.ru.

Рассмотрена область неортогональности сигналов, в этой области не выполняется критерий разрешения Рэлея. Обращено внимание на сингулярность корреляционной матрицы уравнений правдоподобия. Введен термин шумовые сингулярные максимумы. Они реализуются вблизи области сингулярности корреляционной матрицы, и могут превышать уровень сигнала. Предложено для подавления шумовых сингулярных максимумов ограничивать область вблизи линии сингулярности. Представлены результаты модельных исследований, иллюстрирующих возможность существенного подавления шумовых сингулярных максимумов.

Введение

Метод максимального правдоподобия позволяет решать статистические задачи в радиотехнических системах [1-3]. Решение существенно усложняется при наличии в принятой реализации нескольких сигналов. В этом случае область решений включает область неортогональности сигналов [5, 6], в которой критерий Рэлея не выполняется. В этой области корреляционная функция уравнений правдоподобия имеет сингулярность, существенно затрудняющую решение статистических задач. Это связано с тем, что в области сингулярности шумовая составляющая существенно увеличивается, и статистические задачи решаются на фоне значительных шумовых максимумов. Анализ структуры сингулярных шумовых максимумов показывает возможность снижения уровня шума за счет ограничения области решений вблизи от области сингулярности. Это позволяет в области неортогональности решать статистические задачи радиотехники. Таким образом, основной задачей настоящей работы является исследование влияния фактора сингулярности на решение статистических задач радиотехники.

Теоретические основы

Пусть принятая реализация содержит N сигналов и нормальный аддитивный шум $\hat{U}_{ш}(t)$. Среднее значение квадратурных компонент шума равно нулю, интервал корреляции τ_k , дисперсия σ^2 .

$$\hat{y}(t) = \sum_{n=1}^N \hat{U}_n \hat{f}_n(\bar{\lambda}, t) + \hat{U}_{ш}(t), \quad (1)$$

где \hat{U}_n – комплексная амплитуда для n – сигнала.

$\hat{f}_n(\bar{\lambda}, t)$ – аналитическая форма n – сигнала.

$\bar{\lambda}$ – вектор неэнергетических параметров совокупности сигналов.

На основании (1) запишем функцию правдоподобия.

$$L(\bar{\lambda}, \hat{U}_1 \div \hat{U}_N) = \text{const} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2\tau_k} \int_0^T \left|\hat{y}(t) - \sum_{n=1}^N \hat{U}_n \hat{f}_n(\bar{\lambda}, t)\right|^2 dt\right), \quad (2)$$

где const – определяется нормировкой;

штрихами отмечены неизвестные параметры.

Функция правдоподобия имеет вид поверхности. В разрезах по времени приема поверхность функции правдоподобия имеет большое количество локальных максимумов, которые существенно усложняют ее максимизацию. Для исключения локальных максимумов используем подстановку Хелстрема [4]. Она заключается в том, что функциональные зависимости, получаемые при решении уравнений правдоподобия, подставляются в выражение для функции правдоподобия. Запишем систему уравнений правдоподобия в векторном виде

$$\bar{b}(\bar{\lambda}) = \hat{R}(\bar{\lambda}) \bar{U}(\bar{\lambda}), \quad (3)$$

где $b_n(\bar{\lambda}) = \frac{1}{T} \int_0^T \hat{y}(t) \hat{f}_n(\bar{\lambda}, t) dt$ – элементы вектора \bar{b} ;

$\hat{R}_{n,m}(\bar{\lambda}) = \frac{1}{T} \int_0^T \hat{f}_n(\bar{\lambda}, t) \hat{f}_m^*(\bar{\lambda}, t) dt$ – определяют элементы матрицы ($n, m = 1 \div N$);

$\bar{U}(\bar{\lambda})$ – вектор оцениваемых амплитуд.

При решении уравнений правдоподобия (3), получим функциональные соотношения, определяющие оценки комплексных амплитуды сигналов

$$\bar{U}(\bar{\lambda}) = \hat{R}(\bar{\lambda})^{-1} \bar{b}(\bar{\lambda}). \quad (4)$$

Полученные функциональные зависимости являются также поверхностями в пространстве оцениваемых параметров $\bar{\lambda}$. Заменяя амплитуды сигналов функциональными зависимостями, можно получить преобразованную функцию правдоподобия $L1(\bar{\lambda})$

$$L1(\bar{\lambda}) = \text{const} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2\tau_k} \int_0^T \left|\hat{y}(t) - \sum_{n=1}^N \hat{U}_n(\bar{\lambda}) \hat{f}_n(\bar{\lambda}, t)\right|^2 dt\right). \quad (5)$$

Для случая двух сигналов в принятой реализации, поверхность преобразованной функции правдоподобия показана на рисунке 1. Основной и зеркальный максимумы позволяют получить оценки неэнергетических параметров сигналов.

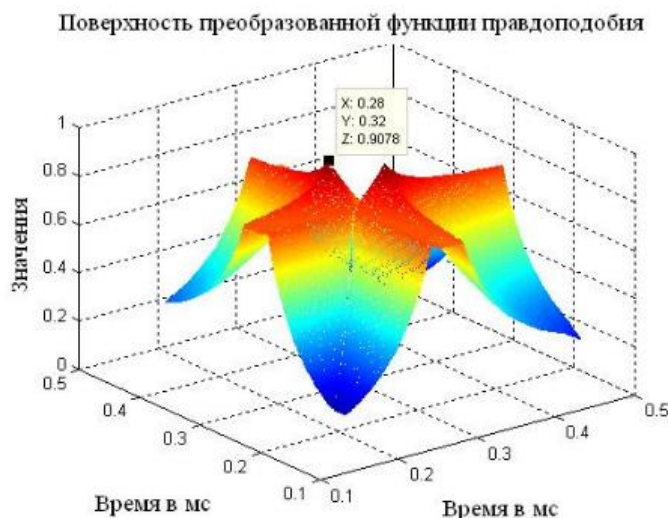


Рис.1. Представлена поверхность преобразованной функции правдоподобия, иллюстрирующая эффективность подстановки Хелстрема. Времена приема сигналов 0.28 мс, и 0.32 мс, отношение сигнал/шум в модели 15 дБ

Времена приема двух сигналов оцениваются по положению каждого из максимумов. Алгоритмически один из максимумов может быть исключен. Комплексные амплитуды сигналов оцениваются по оценкам времен приема. Таким образом, задача раздельной оценки параметров совокупности сигналов оказывается решенной. Основой решения статистических задач являются функция правдоподобия (5) и уравнения правдоподобия (4).

Рассмотрим фактор сингулярности. Корреляционная матрица уравнений правдоподобия (3) является сингулярной матрицей. Исследования фактора сингулярности корреляционной матрицы $\hat{R}(\hat{\lambda})$ практически отсутствуют в литературе. Равенство оценок параметров различных сигналов определяет сингулярность корреляционной матрицы. Если условие сингулярности выполняется, тогда возникают шумовые максимумы на поверхности функциональных зависимостей (4). В дальнейшем их будем называть шумовыми сингулярными максимумами. Они реализуются вблизи линии сингулярности и могут превышать уровень амплитуд сигналов. Выражения для дисперсии параметров Рао-Крамера, при наличии сингулярных шумовых максимумов показывают зависимость от детерминанта корреляционной матрицы и ограничивают область решений. Пусть для простоты принята реализация содержит два сигнала, отличающихся временами приема. В этом случае функциональные зависимости (решения) уравнений правдоподобия имеют вид:

$$\begin{aligned}\hat{U}_1(\hat{t}_1, \hat{t}_2) &= \frac{\frac{1}{T_{\text{ЭКВ}}} \int_t^{2T+t} \hat{y}(t) \hat{f}_1^*(\hat{t}_1, t) dt - \hat{R}(\hat{t}_1, \hat{t}_2) \frac{1}{T_{\text{ЭКВ}}} \int_t^{2T+t} \hat{y}(t) \hat{f}_2^*(\hat{t}_2, t) dt}{1 - |\hat{R}(\hat{t}_1, \hat{t}_2)|^2}, \\ \hat{U}_2(\hat{t}_1, \hat{t}_2) &= \frac{\frac{1}{T_{\text{ЭКВ}}} \int_t^{2T+t} \hat{y}(t) \hat{f}_2^*(\hat{t}_1, t) dt - \hat{R}^*(\hat{t}_1, \hat{t}_2) \frac{1}{T_{\text{ЭКВ}}} \int_t^{2T+t} \hat{y}(t) \hat{f}_1^*(\hat{t}_2, t) dt}{1 - |\hat{R}(\hat{t}_1, \hat{t}_2)|^2},\end{aligned}\quad (6)$$

где $\hat{R}(\hat{t}_1, \hat{t}_2) = \frac{1}{T_{\text{ЭКВ}}} \int_{\hat{t}_1}^{\hat{t}_2+2T} f_2(\hat{t}_2, t) \hat{f}_1^*(\hat{t}_1, t) dt$ – коэффициент корреляции по времени приема двух сигналов;

$T_{\text{ЭКВ}} = \int_0^T |\hat{f}_1(\hat{t}_1, t)|^2 dt$ – эквивалентная длительность сигнала.

Поверхность одной из функциональных зависимостей (6) показана на рисунке 2. Шумовые сингулярные максимумы располагаются вдоль диагональной линии, которая определяется равенством $\hat{t}_1 = \hat{t}_2$. В области неортогональности двух выражение для дисперсии амплитуд и шума определяется информационной матрицей Фишера.

$$D_U = \frac{\sigma^2 \tau_k}{T_{\text{ЭКВ}}(1-|\hat{R}(\tau)|^2)} = \frac{\sigma^2}{N_{\text{ЭКВ}}(1-|\hat{R}(\tau)|^2)},\quad (7)$$

где $N_{\text{ЭКВ}}$ – количество некоррелированных отсчетов шума на интервале сигналов.

Выражение (7) для дисперсии Рао-Крамера определяет ее зависимость от модуля коэффициента корреляции. Характерным является увеличение дисперсии амплитуд сигналов, а следовательно, и шума от модуля коэффициента корреляции, от степени близости разности оценок времен приема к нулевому значению. Введем относительную дисперсию

$$\frac{D_U}{D_{U0}} = \frac{1}{1-|\hat{R}(\tau)|^2},\quad (8)$$

где $D_{U0} = \frac{\sigma^2}{N_{\text{ЭКВ}}}$ – дисперсия амплитуд при ортогональности сигналов.

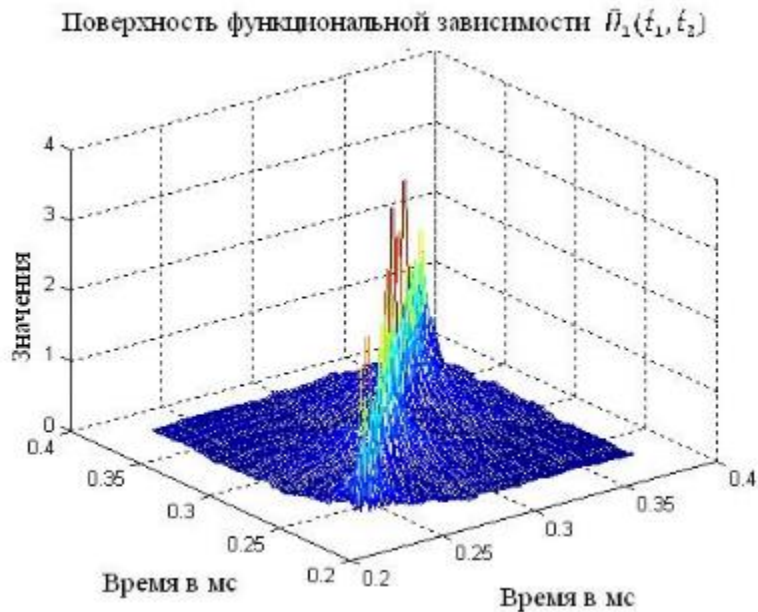


Рис.2. Зависимость $\hat{U}_1(t_1, t_2)$ от оценок времен приема для случая при нулевых амплитудах сигналов

Согласно выражению (8), дисперсии амплитуд и шума дополнительно увеличиваются при приближении коэффициента корреляции к единице. В настоящей работе выражение (8) положено в основу оценки рабочей области разрешения сигналов. Вид зависимости относительной дисперсии (8) показан на рисунке 3.

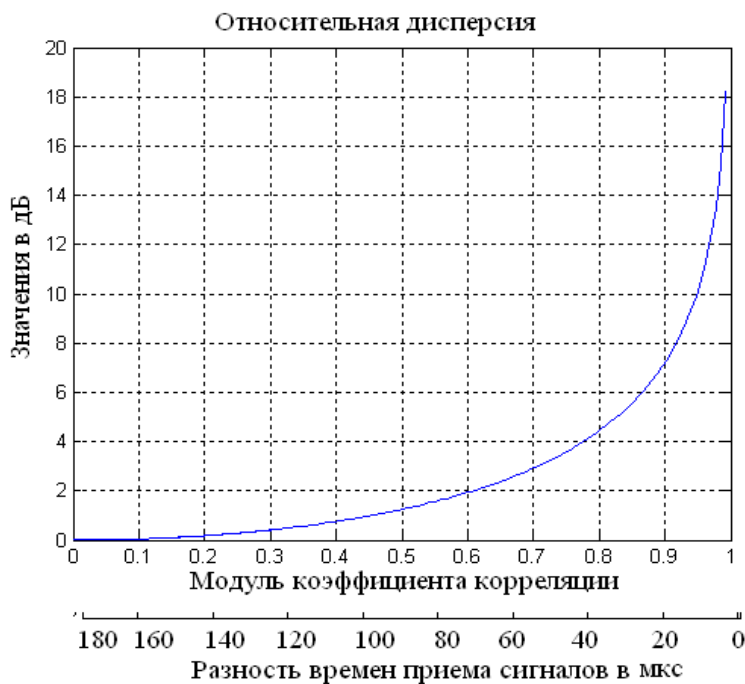


Рис.3. Относительная дисперсия в зависимости от модуля коэффициента корреляции

При приближении разности оценок времен приема к области сингулярности (коэффициент корреляции равен единице) отмечается дополнительное увеличение дисперсии шума. Рабочий диапазон разрешения двух сигналов может быть определен интервалом изменения коэффициента корреляции от нуля до значения 0.9. На границе рабочего диапазона разрешение двух сигналов может быть увеличено в 10 раз по сравнению с рэлеевским разрешением. Разность времен приема при этом равна 20 мкс. На границе рабочего диапазона отношение сигнал/шум дополнительно увеличивается на 7 дБ. Статистики оценок времен приема и амплитуд двух сигналов приведены на рисунке 4 (отмечены прямоугольником, а и б).

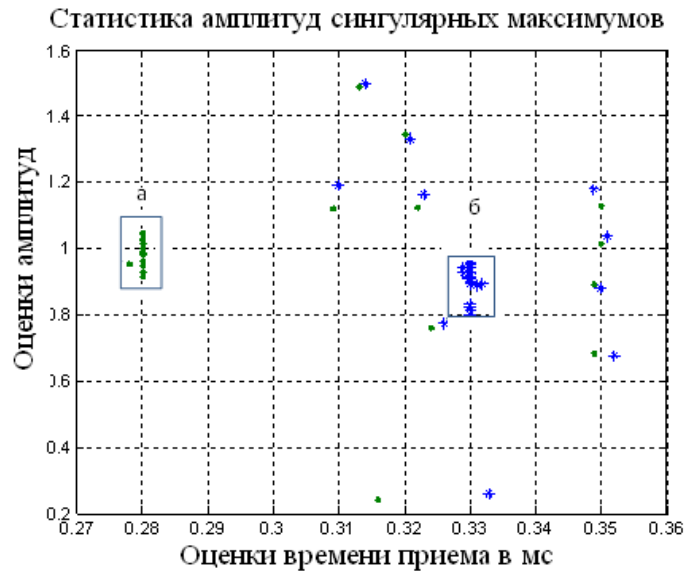


Рис.4. Оценки амплитуд сигналов, времен приема сигналов и оценки значений шумовых сингулярных максимумов. Времена приема сигналов согласно модели равны 0.28 мс и 0.33 мс

Статистика шумовых сингулярных максимумов и их времен приема при отсутствии сигналов в реализации представлены точками вне прямоугольников. Согласно рисунку, амплитуды сигналов могут быть меньше значений шумовых сингулярных максимумов. В этих условиях решить задачу обнаружения практически невозможно. Обращают на себя внимание малые значения разности времен приема шумовых сингулярных максимумов. В настоящей работе эта особенность положена в основу метода подавления шумовых сингулярных максимумов. Ограничивая область решений узкой полоской вдоль линии сингулярности корреляционной матрицы, можно существенно подавить уровень шумовых сингулярных максимумов.

На рисунке 5 показан результат подавления шумовых сингулярных максимумов за счет ограничения области решения полоской ± 5 мкс от диагональной линии. Представлена статистика амплитуд двух сигналов (а, б) и статистика подавленных шумовых сингулярных максимумов. Согласно рисунку, задача обнаружения двух сигналов с использованием методики подавления шумовых сингулярных максимумов вполне решается.

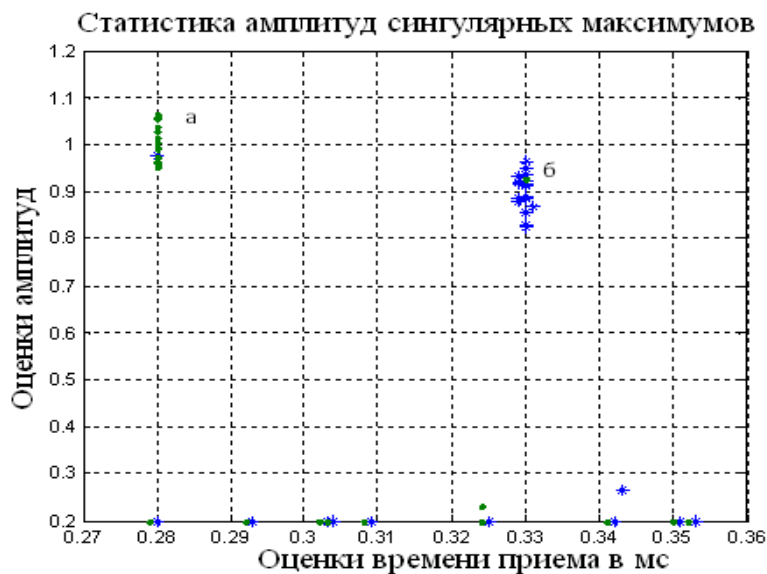


Рис.5. Оценки амплитуд и времен приема двух сигналов и оценки значений подавленных шумовых максимумов

Таким образом, шумовые сингулярные максимумы могут быть существенно подавлены при решении статистических задач в области неортогональности сигналов. В результате задача обнаружения сигналов, задача оценки параметров и задача разрешения решаются вполне удовлетворительно.

Заключение

1. Представлен ранее неизвестный фактор сингулярности, существенно затрудняющий решения статистических задач.
2. Показано наличие шумовых сингулярных максимумов в области неортогональности сигналов.
3. Представлен метод, подавляющий шумовые сингулярные максимумы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перов А. И. Статистическая теория радиотехнических систем. – М.: Радиотехника, 2003. – 400 с.
2. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. – М.: Советское радио, 1969. – 752 с.
3. Тихонов В. И. Оптимальный прием сигналов. – М.: Радио и связь, 1983. – 320 с.
4. Хелстром К. Статистическая теория обнаружения сигналов [Текст] / Перевод с англ. Г. Ю. Кобзарева; Под ред. [и с предисл.] Ю. Б. Кобзарева. – М.: Изд-во иностр. лит., 1963. – 431 с.
5. Пахотин В. А. Оптимальный прием сигналов с высоким разрешением / В. А. Пахотин, К. В. Власова, Р. В. Симонов, В. А. Бессонов, И. В. Либерман. // 21-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2019» (27–29 марта 2019 года) [Электронный ресурс]: доклады. – Москва: Московское НТО радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова. – Том Выпуск: XXI. Книга 2(2). – с. 331-336.
6. Пахотин В. А. Оптимальная обработка сигналов с высоким разрешением / В. А. Пахотин, К. В. Власова, Р. В. Симонов, С. В. Петров // Мягкие измерения и вычисления – М.: ООО «Издательский дом «Научная библиотека»», 2019. – №м 4 (17). – С. 56-70.

SINGULARITY FACTOR IN SIGNAL PROCESSING BY THE MAXIMUM LIKELIHOOD METHOD

¹Pakhotin Valery Anatolyevich, D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor,
Professor of the Scientific and Technical Department of the Institute of High Technologies

²Vlasova Ksenia Valerievna, Ph.D. (Physics and Mathematics), Associate Professor
of the Department of Marine Radiotechnical Systems of the Marine Institute

³Bessonov Vladimir Alexandrovich, Ph.D. (Physics and Mathematics), Associate Professor
of the Scientific

^{1,3}Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia,
e-mail: VPakhotin@kantiana.ru

²Baltic Fishing Fleet State Academy FSBEI HE "KSTU",
Kaliningrad, Russia, e-mail: p_ksenia@mail.ru

The region of non-orthogonality of signals is considered, in this region the Rayleigh resolution criterion is not satisfied. Attention is paid to the singularity of the correlation matrix of the likelihood equations. The term noise singula maxima is introduced. They are realized near the singularity region of the correlation matrix and can exceed the signal level. It is proposed to limit the region near the singularity line to suppress noise singula maxima. The results of model studies illustrating the possibility of significant suppression of noise singula maxima are presented.