

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

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

**СОДЕРЖАНИЕ**

**CONTENTS**

**СЕКЦИЯ «НАВИГАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ  
И ВЕДЕНИЕ ПРОМЫСЛА»**

**SECTION "SAFETY OF NAVIGATION, FISHING  
AND LOGISTICS"**

<i>Бондарева О.М., Рагулина И.Р., Левченко О.В., Бондарева Е.В.</i> Стрессом можно управлять: анализ проявления психического состояния человека в стрессовых ситуациях.....	4
<i>Бондарев В.А., Бондарева О.М., Рагулина И.Р.</i> Проблемы морского образования.....	13
<i>Волкова Т.А., Мейлер Л.Е.</i> Оценка применения роудрейлерной технологии перевозок в России .	19
<i>Данилов Ю.А., Гаврильченко Г.Н.</i> Динамическая осадка судов в условиях, стесненных глубиной и узкостью .....	27
<i>Гуральник Б.С., Тимофеев В.К., Сирота А.К.</i> О готовности существующих судов и международной нормативной базы для перевозки грузов на безэкипажных судах .....	32
<i>Ермаков С.В., Морозова С.Ю.</i> Количественная оценка неоднородности магнитного поля Земли в пределах объёма, занимаемого морским судном, в контексте положений теории девиации магнитного компаса.....	40
<i>Кириллов Н.О.</i> Основные направления развития методов и средств мореходной астрономии.....	47
<i>Кубрин С.С., Гуральник Б.С., Ковалишин П.Ю.</i> О необходимости учёта фактора времени при оценке безопасности балкера в случае разжижения груза в трюмах .....	53
<i>Якута И.В.</i> Влияние увеличения главных размерений контейнеровозов на их мореходные качества.....	58

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

**SECTION "INNOVATIVE METHODS IN SHIP DESIGN,  
CONSTRUCTION AND REPAIR"**

<i>Дектярев А.В., Петров С.А., Зобов П.Г., Морозов В.Н.</i> Перспективы применения аддитивных технологий в подводном композитном кораблестроении .....	67
<i>Пинчук В.И., Романюта Д.А., Дмитриев Д.Н.</i> Оптимизация фундамента цистерны судна методом генеративного анализа .....	76
<i>Притыкин А.И.</i> Анализ колебаний одно- и двухпролетных балок на упругом основании .....	83

<i>Романюта Д.А., Десяткин Р.С., Князева А.И., Белоусов В.А.</i> Сравнительный анализ методик расчёта напряженно-деформированного состояния трёхслойных пластин при цилиндрическом изгибе .....	89
---	----

## **СЕКЦИЯ «ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ОБЪЕКТОВ МОРСКОЙ ИНДУСТРИИ»**

### **SECTION "ELECTRICAL SYSTEMS OF MARINE INDUSTRY FACILITIES"**

<i>Белей В.Ф., Коротких К.В., Самарин В.Д.</i> Результаты исследований нелинейных нагрузок ПСЗ «Янтарь» с позиции обеспечения качества электроэнергии и эффективного использования электрооборудования .....	97
<i>Благинин В.А., Волкогон В.А., Кажекин И.Е., Юсын В.М.</i> Проблема изолированности бортовых электросистем от корпусов морских судов и способ её решения .....	107
<i>Вольский А.Б., Новосёлов К.А.</i> Возможные пути адаптации судовой сети иностранных судов к питанию с берега в российских портах .....	114
<i>Геллер Б.Л.</i> Анализ соотношения точности и быстродействия при различных способах обработки сигналов частотных датчиков.....	121
<i>Дмитриев Б.Ф., Галушин С.Я., Согонов С.А., Розов А.Ю., Максимова М.А.</i> Методы и алгоритмы расчета устройства компенсации неактивной мощности преобразователя частоты в судовой электроэнергетической системе .....	126
<i>Зубавичюс Р.В., Харитонов М.С.</i> Выравнивание графика нагрузки морского порта как подход к снижению затрат на мощность .....	133
<i>Кажекин И.Е.</i> Моделирование феррорезонансного контура в низковольтной судовой электросети с компенсированной нейтралью .....	142
<i>Кугучева Д.К., Харитонов М.С.</i> Исследование особенностей функционирования фотоэлектрических электростанций на морских судах .....	148
<i>Молчанов С.В., Чижма С.Н., Яковлев А.С.</i> Оценка влияния комбинированной магнитной системы на характеристики устройств на постоянных магнитах.....	158
<i>Шабалин Л.Д., Савенко А.Е., Савенко П.С.</i> Совершенствование систем автоматического управления генераторами в электротехнических комплексах морских судов .....	165

## **СЕКЦИЯ «СТАЦИОНАРНЫЕ И ТРАНСПОРТНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ»**

### **SECTION "STATIONARY AND TRANSPORT POWER PLANTS"**

<i>Беркова Е.А., Александров И.С., Плавич А.Ю.</i> Термодинамические свойства компонентов органических энергоносителей: анализ экспериментальных данных для разработки уравнений состояния. Циклоалканы.....	173
<i>Бураковская М.В., Ковальчук Л.И., Яворский И.М.</i> Исследование деформирования цилиндрических втулок судовых дизелей переменными подвижными газовыми нагрузками с учётом влияния изменения толщины стенки вдоль образующей .....	179
<i>Кошелев С.В., Ейдеюс А.И.</i> Способы определения параметров инея на поверхности низкотемпературных воздухоохладителей с плоскими ребрами.....	185
<i>Кункевич С.В., Ермаков А.Ю.</i> Температурный режим работы торцевого уплотнения проектируемого центробежного насоса .....	196
<i>Кункевич С.В., Толмачев А.В.</i> Прецизионные беспрокладочные торцевые уплотнения корпусных элементов многоступенчатых центробежных насосов .....	202

<i>Ореховский Е.М., Толмачев А.В.</i> Реализация питания дизельного двигателя сжиженным газом .....	207
<i>Русаков С.М., Кондратенко В.С.</i> Повышение надежности и безопасности работы системы управления клапанами системы очистки выхлопных газов судовых дизелей.....	211
<i>Филонов А.Г., Щербаков И.И.</i> О выборе типа опреснительной установки для ПАТЭС «Академик Ломоносов».....	218
<i>Шевченко С.Н.</i> Зависимость геометрических характеристик критического диаметра тепловой изоляции от процессов теплоотдачи .....	228

## **СЕКЦИЯ «ПРОМЫШЛЕННОЕ РЫБОЛОВСТВО»**

### **SECTION "COMMERCIAL FISHERY"**

<i>Бабинцев А.Ю., Суконнов А.В.</i> К вопросу создания основ разработки методологии проектирования промысловых комплексов рыболовных судов .....	233
<i>Гавриш Ю.В., Суконнов А.В.</i> Оценка степени потери прочности рыболовных нитевидных материалов от воздействия факторов водной среды .....	237
<i>Коновалова К.В., Недоступ А.А.</i> Экспериментальные исследования формоизменяемости элементарной ячеи.....	241
<i>Недоступ А.А., Коновалова К.В., Наумов В.А.</i> Численное решение задачи определения конструктивных, геометрических и силовых характеристик элементарной ячеи .....	245
<i>Недоступ А.А., Насенков П.В., Пивоварова Ю.С.</i> К применению теории нагружения и разрушения синтетических рыболовных материалов.....	250
<i>Недоступ А.А., Ражев А.О.</i> Алгоритм расчета характеристик оснастки донного трала с учетом комплексного влияния абиотических, биотических и антропогенных факторов .....	262
<i>Ражев А.О., Недоступ А.А.</i> Мониторинг процесса управления траловой конструкцией и объекта лова с применением гидролокатора .....	270
<i>Недоступ А.А., Шибяев С.В., Насенков П.В., Новожилов О.А., Львова Е.Е., Алдушин А.В., Сысенко В.В., Аскарров Д.В., Белозер И.С.</i> Экспериментальные исследования разноглубинного трала 18/95 м для лова ряпушки ( <i>Coregonus albula</i> L.) в озере Виштынецкое .....	278
<i>Чмутина Д.Ю., Савченко А.Е.</i> Мобильная сетепосадочная фабрика и ее экономическое обоснование .....	286

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

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

<i>Волхонская Е.В., Коротей Е.В.</i> Логопериодический облучатель больших зеркальных антенн для одновременного приема радиоволн вертикальной и горизонтальной поляризации.....	291
<i>Петров С.В., Пахотин В.А., Власова К.В.</i> Перспективы развития цифровых систем связи .....	296
<i>Подтопельный В.В., Воробейкина И.В.</i> Особенности формирования вектора событий безопасности при определении угроз в информационных системах .....	302
<i>Симонов Р.В., Пахотин В. А., Власова К.В.</i> Оптимальный приём ультразвуковых сигналов вблизи сингулярного максимума решений уравнений правдоподобия .....	308
<i>Холоденин Д.В., Кузьмин Л.Л.</i> Рассмотрение возможности комплексирования данных от имитатора гидроакустических сигналов с реальными данными эхограмм .....	314

# СЕКЦИЯ «НАВИГАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ И ВЕДЕНИЕ ПРОМЫСЛА»

## SECTION "SAFETY OF NAVIGATION, FISHING AND LOGISTICS"

УДК 316.6

### СТРЕССОМ МОЖНО УПРАВЛЯТЬ: АНАЛИЗ ПРОЯВЛЕНИЯ ПСИХИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЧЕЛОВЕКА В СТРЕССОВЫХ СИТУАЦИЯХ

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

<sup>2</sup>Рагулина Изумруд Рамазановна, канд. геогр. наук, доцент кафедры судовождения  
и безопасности мореплавания

<sup>3</sup>Левченко Ольга Викторовна, генеральный директор

<sup>4</sup>Бондарева Екатерина Витальевна, студент Института гуманитарных наук,  
направление подготовки «Психология»

<sup>1,2</sup>Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ»,  
Калининград, Россия, e-mail: <sup>1</sup>va.bondarev@gmail.com; <sup>2</sup>izragulina@mail.ru

<sup>3</sup>ООО «Издательство «АТМА», Калининградская область, Россия, e-mail: <sup>3</sup>olvi8@mail.ru

<sup>4</sup>ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет им. И. Канта», Калининград, Россия

*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. Негативные проявления «человеческого фактора»

На протяжении нескольких десятилетий материалы статистики позволяют установить, что причиной аварийных ситуаций чаще всего является человеческий фактор. Его изучение с позиции психофизиологической сущности человека способствует выявлению ошибок, допускаемых в процессе работы.

Резолюция Международной Морской Организации А.850 (20) в концепции человеческого элемента отмечает многогранность вопроса, определяет комплексный подход к проблеме.

На рисунке 1. графически представлены основные составляющие «человеческого фактора» [2].

Рассмотрим зависимость суточного распределения аварийности от работоспособности человека, исключив влияние других объективных факторов.

Изменение работоспособности человека на протяжении суточного цикла (представлено графиком на рис.2) имеет два минимальных экстремума во временном промежутке около 15 часов и 1 часа. Наиболее «слабым» человек оказывается в периоды с 2.00 до 5.00 и 13.00 до 15.00, когда ухудшаются зрение, слух, способности различать цвета и так далее, и значительно хуже воспринимается информация.



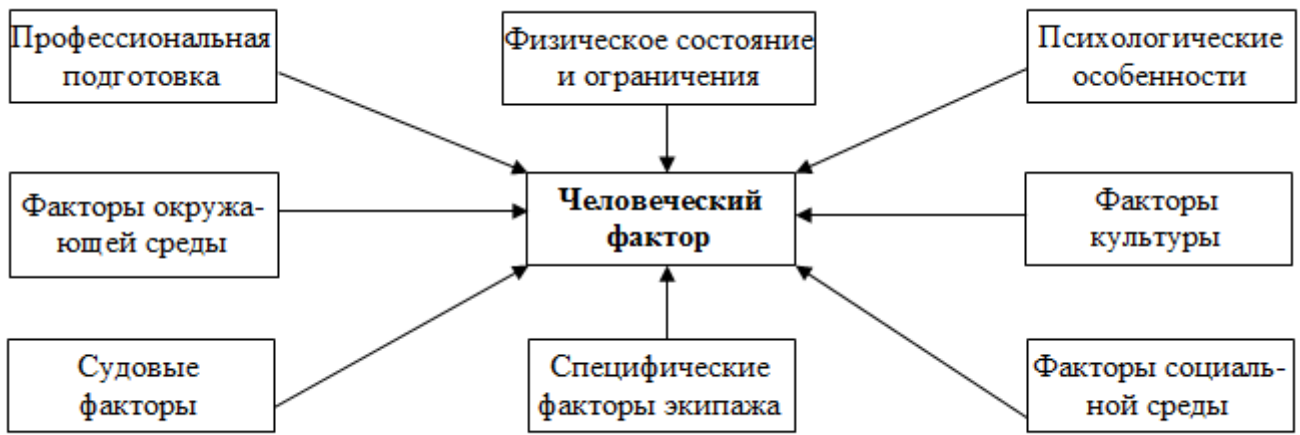


Рис. 1. Понятие «человеческий фактор»

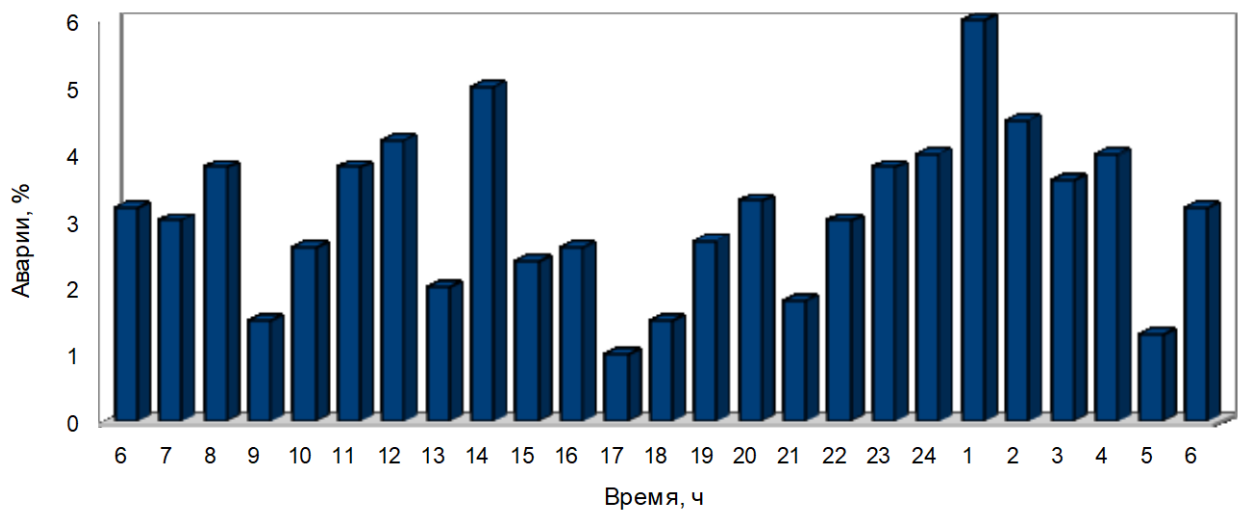


Рис. 2. Изменение работоспособности человека на протяжении суточного цикла (не зависит от сна и бодрствования)

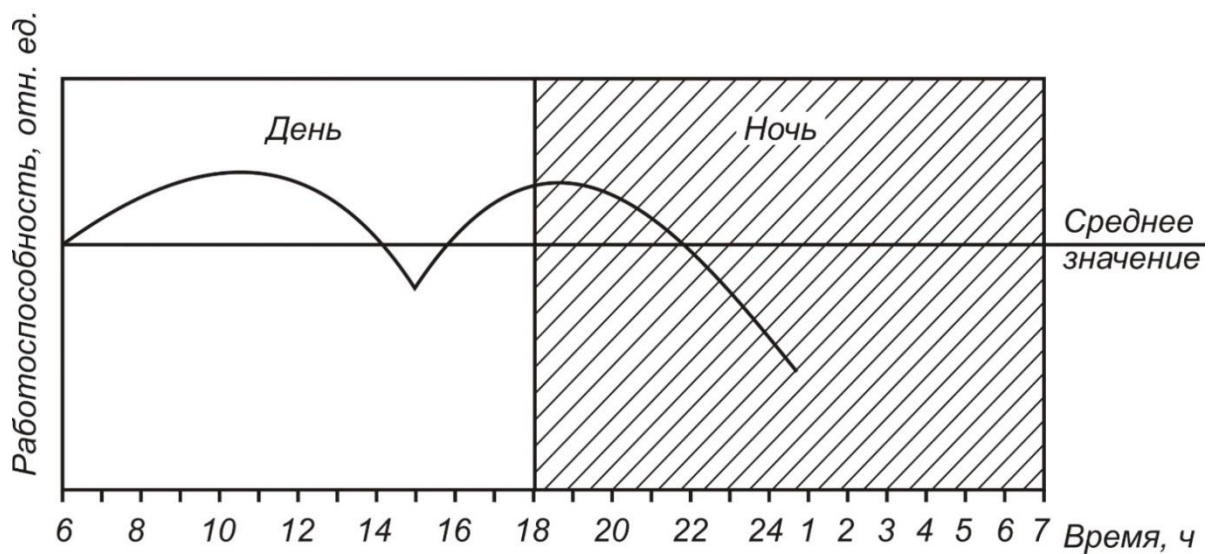


Рис. 3. Распределение столкновений по времени суток

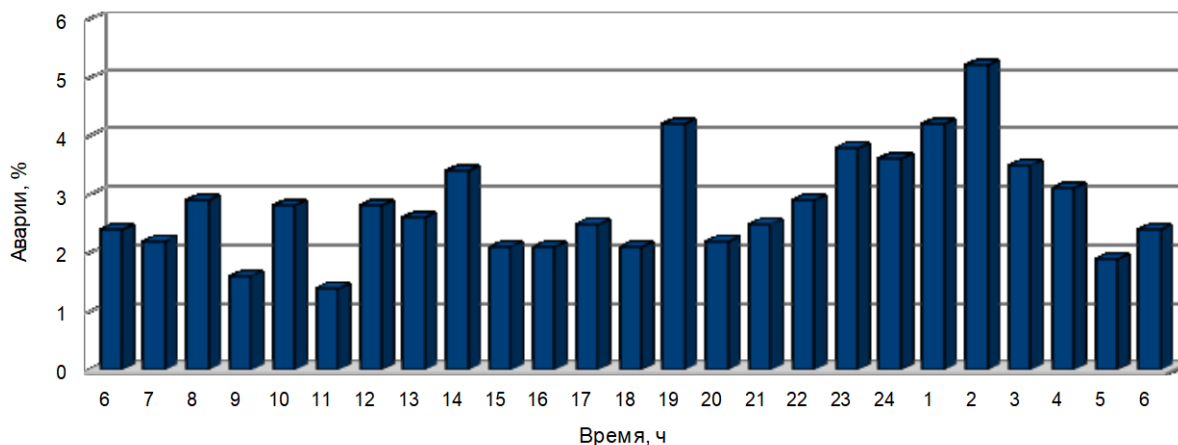


Рис.4. Распределение посадок и касаний грунта по времени суток

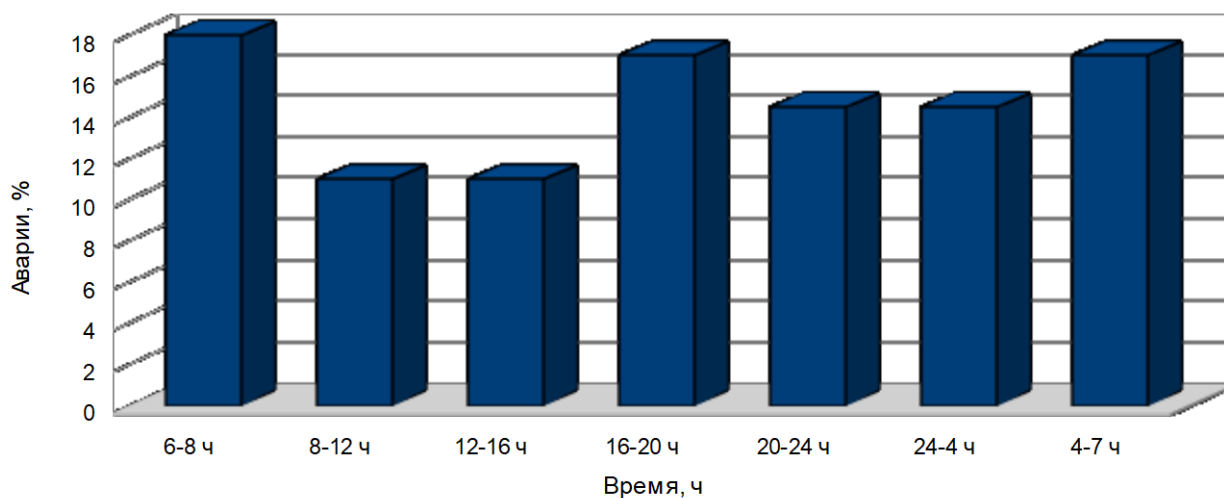


Рис. 5. Распределение аварий судов по времени суток

Искажение или дефицит информации порождает страх, который ведёт к принятию поспешных необдуманных решений - причинам аварий.

Известно, что работоспособность снижается в результате утомления, которое компенсируется систематическим отдыхом, и переутомления, которое не компенсируется систематическим отдыхом. Переутомление накапливается, ослабляет центральную нервную систему и приводит к заболеваниям.

Вопрос утомляемости находится в состоянии изучения. Тем не менее, установлено, что высокая квалификация, умственная тренировка и отработка динамических стереотипов уменьшает эмоциональное напряжение и повышает работоспособность.

На рисунках 3-5 видно, что диаграммы суточного распределения аварийности практически совпадают с зеркальным изображением суточного изменения работоспособности человека.

Диаграммы (рис. 3 и 4) построены по данным нескольких тысяч аварийных случаев на судах за непрерывный десятилетний период. Чем выше частота случаев, тем отчетливее прослеживается эта закономерность.

В промежутке 19.00 - 20.00 часов обращает на себя внимание всплеск аварийности, явно выходящий из закономерности суточного распределения аварий. На основании материалов расследований аварий, произошедших в это время, причинами в большинстве случаев являются особые психофизиологические состояния судоводителей, у которых отмечаются снижение чувства опасности (осторожности) и заторможенности реакции.

Из диаграмм видно, что пики пониженной работоспособности и повышенной аварийности почти полностью приходятся на вахту 2-го помощника капитана и составляют практически половину от всех произошедших крушений [3]. Заторможенность организма в это время мешает появлению быстрой и правильной реакции на случившееся событие.

Непредвиденные чрезвычайные ситуации выводят состояние психики человека из равновесия, появляются смутение, растерянность, беспокойство, опасение, другие отрицательные эмоции, которые за считанные мгновения от состояния внутренней паники, страха приводят к стрессу.

Мотивирующей стороной выбора темы и её разработки стала возможность установления причин негативного проявления «человеческого фактора», формирования рекомендаций для теоретической и практической подготовки морских офицеров, которые, научившись действовать в состоянии стресса, в будущем смогут предотвратить аварийные происшествия.

## **2. Модификаторы стресса**

### **2.1. Концепт привыкания**

Невозможно жить в состоянии ожидания особой нестандартной и опасной ситуации, мгновенно подготовиться к ней; однако, обратившись к внутренним человеческим резервам, можно не только противостоять стрессу, но и действовать - принимать разумные целесообразные решения благодаря особой психологической подготовке и тренировке организма.

На начальном этапе нужно преобразовать своё состояние, в этом поможет адаптация – *«приспособление организма, личности, их систем к характеру отдельных воздействий или к изменившимся условиям жизни в целом»* [4].

Понятие «адаптация» было открыто в биологии, два века назад из естественной плавно перешло в общественные науки и с тех пор имеет полифонический характер, так как в своей структуре содержит разнообразные аспекты в экономической, профессиональной, социальной, бытовой, психологической, этнической сферах. Таким образом, имея естественные корни, адаптация легко проникает в другие научные пространства, расширяя их содержание и значение.

С учётом особенностей работы в море, разнообразием их проявлений возрастает значение адаптации и значение дифференциации в исследовании этого процесса. Социальные и профессиональные аспекты невольно переплетаются, взаимодействуя, образуют неразрывное единство.

Анализ содержания профессиональной адаптации показывает, что концепт «привыкания к профессии» невероятно широк. Это не только приспособление к режиму, условиям и нормам труда, традициям, принятие новых профессиональных ролей, но и отстаивание себя в новой среде, являющейся, по сути, закрытым пространством.

При этом человек невольно стремится найти равновесие, приспособившись к специфике труда и отношений. Однако это появившееся равновесие несколько обманчиво, так как временно, неустойчиво.

Между профессиональной подготовленностью моряка, его представлениями о работе на определенном судне, ожиданиями, запросами, жизненными планами и реальными условиями возникает противоречие. Это противоречие чаще всего является базисом для различного рода недоразумений и неприятностей. Причина их появления кроется также и в том, что специалисту в новой среде сразу и в полном объеме предъявляют все требования.

Значительную роль играют и отношения, которые складываются между «новичком» и членами экипажа. В производственных коллективах промышленных предприятий для «новичков» определяются периоды, необходимые для адаптации. Отдельные исследователи выделяют три периода: начальный, основной и завершающий. В условиях работы в море таких периодов чаще всего не бывает, специалист вынужден вникать в процесс сразу и контролировать его на протяжении всего контракта.

Сокращение сроков профессиональной адаптации представляет одну из наиболее актуальных её проблем. Стихийность этого процесса влечет за собой потери как для общества, так и для личности. Однако сознательно управлять процессом профессиональной адаптации можно и необходимо.

Для этого нужно учитывать факторы адаптации. Их условно можно разделить на две категории. Первая зависит от личностных качеств человека, возраста, темперамента и так далее. Например, флегматикам трудно приспособиваться, но, если они адаптировались, их адаптация носит устойчивый характер. Меланхолики гиперболизируют трудности, медленно проходят процессы адаптации, которая впоследствии не отличается константностью [4]. Зная свой темперамент, имея

позитивную мотивацию и готовность к выполнению профессиональных задач, можно избежать проблем вхождения в новый коллектив, установления с ним связей, создания экстремальных ситуаций.

Вторая зависит от объективных составляющих: характера обстановки, уровня решаемых задач, наличия возможного авторитета в коллективе, наставника и так далее.

Профессиональная адаптация может помочь в преодолении сложностей через привыкание, приспособление. Она формируется быстрее, если в процессе теоретической и практической подготовки человек уже выработал новые динамические стереотипы.

## ***2.2. Воспитание характера***

Определенную роль в аварийной ситуации играет характер человека, от которого зависит и стиль поведения, и быстрота принятия решения, и от того, каким это решение будет. Исследователями принято определенное разграничение характера человека по отношению к уровню нормы: характер может быть нормальным, акцентуированным и/или психопатическим.

Если характер у специалиста на уровне нормы, то он вполне может справиться с выполнением профессиональных задач. В экипаже, работающем на судне в море, редко встречаются люди с психопатическим характером, отдельные черты которого обнаруживаются на уровне патологии. Однако люди с акцентуированным типом характера - явление обычное.

Акцентуация характера отмечается преобладанием пониженного настроения, видением мира в мрачных тонах, склонностью к депрессии, что, соответственно, характеризуется недостаточной инициативностью, зависимостью от решений высшего руководства, нежелания брать на себя ответственность. В обычные будни не мешает удовлетворительному трудовому процессу, хотя самооценку личности заметно занижает и является неизбежным препятствием для адекватной реакции во время экстремальных происшествий.

Представляя собой граничащую разновидность психологической нормы, в моменты выхода за её пределы, вызванные конфликтами, нежелательными условиями, акцентуация может привести к неадекватному поведению, при этом отрицательная, в обычные дни скрытая черта может стать не только преобладающей, но и подавляющей все положительные черты характера. Таким образом, психическое равновесие, теряя свою устойчивость, нарушается и приводит к нервному срыву.

Выявление акцентуации личности не свидетельствует о непригодности человека к работе в море, но, следует отметить, требует особой психологической подготовки.

## **3. Мышление профессионала**

### ***3.1. Отключение страха***

В экстремальной ситуации деятельность экипажа осложняется таким психологическим фактором, как «страх ошибки». В условиях развития аварийной ситуации значительно возрастает юридическая и моральная ответственность за своевременность и правильность действий. У неподготовленных руководителей и рядовых членов экипажа это вызывает «страх ошибки», то есть страх того, что неправильные решения и действия приведут к материальному ущербу и человеческим потерям.

Отключить страх можно несколькими способами. Например, с помощью медитации или гипноза. Однако эти варианты требуют вмешательства специалиста. Безопасные способы, которым можно научиться управлять, тоже существуют. Это самопрограммирование и работа на «автопилоте».

В форме позитивных коротких приказов составить для себя программу действий нетрудно. Важно ввести её в бессознательную сферу психики, таким образом, независимо от сознания программа будет сама включаться и отдавать короткие команды-приказы, человек, следуя им, не успевая испытать «страх ошибки» или страх за свою жизнь, сможет принять грамотное решение и легко выйти из сложившейся, непредвиденной ранее ситуации. Естественно, чтобы научиться пользоваться этим способом, нужно пройти определённую подготовку с психологом.

«Работа на автопилоте» требует более длительной и тщательной подготовки. Речь идет также о подключении бессознательной сферы психики, которая не дает сознанию увидеть опасность для жизни и помогает, благодаря особой тренировке мозга, считать спасительные импульсы-приказы, бегущие по волокнам центральной нервной системы.

Умение владеть такими возможностями психологической подготовки необходимо для людей, находящихся на судне в море, где угроза для жизни может возникнуть в любую минуту.

### **3.2. «Здесь» и «сейчас»**

Ощущать человеку себя в формате «здесь» и «сейчас», то есть в конкретной ситуации, в текущий момент времени на самом деле важно. За проживание любого случая с учетом временных и пространственных характеристик отвечает в организме человека правое полушарие мозга. Оно является своеобразным главнокомандующим наглядно-действенных способов переработки информации и помогает оперировать образами, ориентироваться в пространстве, следить за координацией движений, обнаруживать и узнавать сложные объекты. Какую бы информацию правое полушарие не получало от органов чувств, оно её перерабатывает, а потом уже использует. Переработка происходит симультанно, мгновенно, целостно охватывая все свойства объектов и предметов.

Левое полушарие имеет полномочия власти над словесно-знаковой информацией, управляя абстрактно-логическими способами переработки, которые происходят дискретно и поэтапно.

Так как психические функции распределены между полушариями, есть предпосылки для утверждения, что работой мозга можно управлять, активизируя работу нужного полушария в зависимости от ситуации. В экстремальных случаях, когда на счету каждая минута, левое полушарие не даст мгновенной реакции, помешает быстрому принятию решения, не спеша выстраивая логические цепочки от одного этапа до другого, поэтому его деятельность можно немного снизить. Работу правого полушария, наоборот, активизировать, позволить ему некоторое время доминировать, чтобы ускорить ответные реакции тела на физическом уровне.

На первый взгляд кажется, что доли секунд роли не играют. Однако, управляя левым полушарием, человек будет раскладывать ситуацию досконально по мелочам, взвешивая все «за» и «против», и, явно, задержится с принятием решения, что может привести к трагедии. Позволяя руководить в работе правому полушарию, он мгновенно получит ответную реакцию организма и начнет действовать.

Именно в этом и заключается автоматическое интуитивное мышление профессионала. Автоматизм действий требует наработки определенных матриц, которые тренированный человек может выдавать после получения информации молниеносно. Чтобы матрицы зафиксировались в психике человека, необходимы специальное обучение и отработка разных ситуаций.

Итак, чтобы моряк лучше справлялся с опасными ситуациями необходимо развивать доминирование правого полушария мозга. Для этого подходят профессионально ориентированные системы подготовки и тренажа, которые должны выполняться как на берегу, так и в море. Их частота также должна устанавливаться применительно к конкретному типу судна.

## **4. Внимание: эксперимент**

### **4.1. Анализ результатов по анкете №1**

С целью выявления лиц с крайне акцентуированными чертами характера было протестировано с помощью опросника К. Леонгарда «Определение основных направлений характера» 1100 судоводителей. В результате 51% опрошенных (561 человек) имеет крайне акцентуированные черты характера. Согласно анализу по ключу составлено распределение по шести типам (всего 10) акцентуированного характера:

1. *Застревающий тип* - 11% (121 человек). Основные черты - склонность к аффектам (правдолюбию, обидчивости, подозрительности, ревности), инициация конфликтов, жесткое отстаивание своих интересов. В экстремальных ситуациях подвержены аффективному поведению.

2. *Возбудимый тип* - 6% (66 человек). Людям этого типа свойственны повышенная импульсивность, ослабление контроля над влечениями и побуждениями, низкая контактность в общении, замедленность вербальных и невербальных реакций, равнодушие к будущему.

3. *Тревожно-боязливый тип* - 22% (242 человека). Основные черты - склонность к страхам, повышенная робость и пугливость, низкая контактность, неуверенность в себе. Редко вступают в конфликты, обладают самокритичностью, дружелюбием, исполнительностью. В экстремальных ситуациях подвержены состояниям ажиотажа, ступора, сумеречного состояния сознания.

4. *Аффективно-экзальтированный тип* -29 % (319 человек) соответствует этому типу. Свойственен большой диапазон эмоциональных состояний: легко приходят в восторг от радостных событий и в полное отчаяние от печальных. Отличают высокая контактность, словоохотливость; часто спорят, но не доводят дело до открытого конфликта. В экстремальных ситуациях подвержены аффективному поведению.

5. *Эмотивный тип* - 17% (187 человек). Это чувствительные и впечатлительные люди, отличающиеся глубиной переживаний в области тонких эмоций в духовной жизни, гуманностью, отзывчивостью, обостренным чувством долга, исполнительностью.

6. *Циклотимный тип* - 15% (165 человек) характеризуются периодической сменой настроения, зависимостью от внешних событий. Радостные события у них вызывают жажду деятельности, говорливости; печальные - подавленности, замедленности реакций и мышления; часто меняют манеру общения с окружающими людьми.

#### **4.2. Анализ результатов исследования по анкете №2**

Анкета включает в себя тест на уровень субъективного контроля (УСК) по Д. Роттеру, тест на общепсихологическую типологию личности и тест Шуберта. С помощью данной анкеты было опрошено 510 судоводителей, которые проходили переподготовку в ИПК при БГАРФ. Испытуемые, получившие по шкале «достоверность» оценку ответов как «недостоверные», в таблицу не включены.

54% (275 человек) опрошенных по шкале «УСК» получили высокую оценку. Это свидетельствует о том, что люди имеют высокий уровень субъективного (внутреннего) контроля, полагают, что большинство важных событий в жизни есть результат собственных действий, они могут ими управлять, и, таким образом, чувствуют свою собственную ответственность за события и за то, как складывается жизнь в целом. Из результатов обобщенных различных экспериментальных данных таких людей характеризуют как уверенных в себе, спокойных и благожелательных, часто весьма популярных [3]. Они подходят ответственно к своей работе и, следовательно, допускают меньшее количество ошибок по сравнению с остальными.

46% (235 человека) по шкале «УСК» получили средние результаты.

*Из результатов теста Шуберта испытуемых* 54% (275 человек) опрошенных можно охарактеризовать как лиц, имеющих среднюю выраженность склонности к риску. Обычно такие люди уверены в своих силах, способны принимать решения в сложных и неопределенных ситуациях, у них достаточно развита инициативность.

8% (41 человек) имеет значительную выраженность склонности к риску. Такие люди способны без длительных колебаний принимать решения в сложных и неопределенных ситуациях, уверены в своих силах, возможно недостаточное прогнозирование последствий своих действий; при снижении социального контроля могут иметь тенденцию к авантюрным действиям.

Остальные опрошенные (38% - 194 человека) имеют низкую выраженность склонности к риску. В напряженных условиях у них могут проявляться неуверенность в своих силах, затруднения в принятии решений в сложных и неопределенных ситуациях, избегание ситуаций, требующих самостоятельности в принятии решения.

#### **4.3. Анализ результатов исследования по анкете №3**

С помощью анкет «Прогноз» (Разработана в Санкт-Петербургской военно-медицинской академии. Рекомендуются при подборе лиц, пригодных для работы в экстремальных ситуациях) и «Адаптивность» А. Маклакова и С. Чермянина (также рекомендуются для отбора лиц, пригодных для работы в экстремальных условиях) было опрошено 100 судоводителей, проходивших переподготовку в ИПК при БГА РФ. В результате удалось получить оценку таких качеств судоводителей как нервно-психической устойчивости и поведенческой регуляции - «НПУ», коммуникативного потенциала - «КП», морально-нравственной нормативности - «МН» и личностного потенциала психологической адаптации (или адаптивности человека к работе в усложненных условиях) - «АС» [4].

*Интерпретация по шкале «Нервно-психическая устойчивость и поведенческая регуляция».* 30% опрошенных получили высокие показатели по этой шкале. Можно говорить, что для них характерен высокий уровень нервно-психической устойчивости и поведенческой регуляции, высокая

адекватная самооценка, адекватное восприятие действительности. Деятельность в особых и экстремальных условиях для них показана и может быть успешной. Остальные имеют средний показатель по данной шкале, что не является противопоказанием для работы в сложных условиях.

*Интерпретация по шкале «Коммуникативный потенциал».* 60% опрошенных получили высокие показатели. Для них характерен высокий уровень коммуникативных способностей, они легко устанавливают контакты с окружающими, неконфликтны, склоны как к работе в группе людей, так и к управлению группой. Рекомендуются различные виды операторской деятельности и управления группами людей. Высокое развитие этого качества особенно актуально для старшего командного состава экипажей судов. 20% опрошенных получили низкие показатели по этой шкале. Для них характерны низкий уровень коммуникативных способностей, затруднения в построении контактов с окружающими, проявление агрессивности, повышенная конфликтность и отсутствие склонности выполнять групповую деятельность. Остальные 20 % опрошенных близки к группе испытуемых с высокими показателями по этой шкале.

*Интерпретация по шкале «Морально-нравственная нормативность».* 70% опрошенных получили высокие показатели по этой шкале. Для них характерен высокий уровень социализации, адекватная оценка своей роли в коллективе, в системах «человек – машина». Ориентируются на соблюдение общепринятых норм поведения. Рекомендуются различные виды профессиональной деятельности в особых условиях. 10% получили показатель близкий к низкому.

## **5. До свидания, стресс!**

### **Результаты преобразующего эксперимента**

Исследования, результаты которых приведены выше, проводились на протяжении пяти лет.

Повторное исследование по анкете №1, проведенное в 2020-2021 учебном году, не принесло особых изменений. Картина анализа с целью выявления лиц с крайне акцентуированными чертами характера оставалась практически прежней, показывая разницу в два-три процента.

Работа в сложных морских условиях может помочь некоторым из них набраться опыта и перейти в определении черт характера на уровень нормы, другим же, наоборот, может стать явным препятствием для несения контрактной службы, кроме того, в экстремальных ситуациях дать возможность акцентуированным чертам характера ярко проявиться и нанести моральный и материальный ущерб. Просто ожидать судьбоносных жизненных решений было бы неправильным.

В прошлом 2021-2022 учебном году для проведения преобразующего эксперимента нами была отобрана контрольная группа в составе 35 человек – курсантов судоводительского факультета, по результатам первого эксперимента оказавшихся с крайне акцентуированными чертами характера. На протяжении года с согласия респондентов проводилась психологическая подготовка, основанная на тренингах, тестах, практических и теоретических занятиях. В конце года 35 человек снова были протестированы с помощью опросника К. Леонгарда «Определение основных направлений характера». Результаты преобразующего эксперимента представлены в таблице 1, из расчета, что 35 человек составляют 100%.

Из таблицы 1 видно, что 82.9% респондентов благодаря новым знаниям, полученным навыкам, тщательным тренировкам смогли кардинально изменить тип своего характера. Для устойчивого закрепления результата им рекомендовано самостоятельно продолжать психологическую подготовку, которая, по высказываниям курсантов, начала давать результаты и в повседневной жизни.

Таблица 1

### **Результаты преобразующего эксперимента**

№	Типы акцентуированного характера	Начало 2021-2022 учебного года		Конец 2021-2022 учебного года	
		Количество человек	%	Количество человек	%
1	Застревающий	3	8.7%	0	0%
2	Возбудимый	1	2.8 %	0	0%
3	Тревожно-боязливый	6	17%	1	2.8%
4	Аффективно-экзальтированный	14	40%	3	8.7%
5	Эмотивный	7	20%	1	2.8%
6	Циклотимный	4	11.5%	1	2.8%
	<b>Нормальный тип характера</b>	0	0	29	82.9%
	<b>ИТОГО</b>	35	100%	35	100%

Значительно снизились показатели аффективно-экзальтированного типа акцентуированного характера. Курсанты научились отслеживать свои эмоциональные состояния. Тяжело пришлось представителям эмотивного типа, людям чувствительным и впечатлительным, ответственным и исполнительным, однако глубина их необоснованных переживаний стала меньшей.

Некоторые респонденты во время проведения эксперимента отметили, что, получив образование, не планировали идти в море из-за возбудимости и вспыльчивости характера. Участие в эксперименте помогло понять минусы характера, научиться превращать их в плюсы, ладить с самим собой.

Практически все участники эксперимента указали, что в течение года в лучшую сторону изменились отношения с родителями, преподавателями вуза и сокурсниками; изменилось отношение к учебе.

**Таким образом, анализ результатов проведенных экспериментов наглядно показал, что 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.**

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Даниленко Ал. А., Даниленко А. Ан. Профессиональная надёжность плавсостава как важнейшее условие безопасности судоходства // Эксплуатация морского транспорта. – 2008. – №3 (53).
2. 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.
3. Пашенко Н. Н. Зависимость суточного распределения аварийности судов от работоспособности человека // Морской транспорт. – 1998. – №4.
4. Смирнов Б. А., Долгополова Е. В. Психология деятельности в экстремальных ситуациях. – Харьков: Гуманитарный центр, 2008.
5. 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. № гос. регистрации: 03210001427

## STRESS CAN BE MANAGED ANALYSIS OF THE MANIFESTATION OF THE MENTAL STATE OF A HUMAN IN STRESS SITUATIONS

<sup>1</sup>Bondareva Olga Mikhailovna, Candidate of Psychological Sciences, Associate Professor

<sup>2</sup>Ragulina Izumrud Ramazanovna, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor

<sup>3</sup>Levchenko Olga Viktorovna, General Director

<sup>4</sup>Bondareva Ekaterina Vitalievna, student

<sup>1,2</sup>Baltic Fishing Fleet State Academy FSBEI HE "KSTU",

Kaliningrad, Russia, e-mail: va.bondarev@gmail.com, izragulina@mail.ru

<sup>3</sup>ATMA Publishing House LLC, Kaliningrad region, Russia, e-mail: olvi8@mail.ru

<sup>4</sup>Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education

"Baltic Federal University. I. Kant", Kaliningrad, Russia

*The motivating side of the choice and development of the topic was the possibility of identifying the causes of the negative manifestation of the "human factor", the formation of proposals for the theoretical and practical training of naval officers, who, coping with stress, will be able to prevent emergency situations. An analysis of the manifestation of a person's mental state in stressful situations showed that life sets*



*its own conditions faster than a person adapts. Professional extreme-psychological training is necessary as part of the general training program for marine specialists, and should be included, as a mandatory element, in the main educational program of maritime educational institutions and advanced training institutes for maritime specialties.*

УДК 004.056

## ПРОБЛЕМЫ МОРСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ

<sup>1</sup> Бондарев Виталий Александрович, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой судовождения и безопасности мореплавания

<sup>2</sup> Бондарева Ольга Михайловна, канд. психол. наук, ст. преподаватель кафедры судовождения и безопасности мореплавания

<sup>3</sup> Рагулина Изумруд Рамазановна, канд. геогр. наук, доцент кафедры судовождения и безопасности мореплавания

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

*Рассмотрена противоречивость требований ПДНВ и результатов их исполнения в действительности, приводящая к снижению качества подготовки морских специалистов и уровня безопасности мореплавания. Проанализирован подход европейского морского образования и исторически сложившегося уровня подготовки в России. Выявлен отход от жестких требований ПДНВ к уровню подготовки в сторону снижения требований до минимально возможных в результате проведенной декомпозиции новых требований ПДНВ, начиная с 1995года. Даны рекомендации морскому образованию о необходимом сохранении уровня инженерного образования в России.*

### Введение

Начиная с конца 20-го столетия Международная морская организация (ИМО) направляет главный вектор своего влияния на безопасность мореплавания в сторону человеческого фактора, обвиняя его во всех «грехах». С целью эффективно повлиять на человеческий фактор ИМО вменяет в обязанности судоходным компаниям и морским образовательным учреждениям, ведущим подготовку морских специалистов, выполнять требования Международной конвенции о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты 1978 года с поправками (ПДНВ).

В настоящее время в мире существует около 350 морских учебных заведений, из них более ста находятся на Филиппинах, где на предоставлении граждан в наем в иностранные судоходные компании построена экономика государства. На Филиппинах нет крьюинговых компаний в обычном их понимании. Крьюинг – это государство.

Есть и другие государства, в какой-то мере это относится и к российскому морскому образованию. Многие выпускники морских учебных заведений России предпочитают работать в иностранных компаниях. Судовладельцы обращаются к услугам иностранных крьюинговых компаний при трудоустройстве, а российские моряки, работающие на иностранных судах, подпадают под требования ПДНВ, которые ориентированы на минимальный уровень подготовки [1].

Искусственное снижение числа морских учебных заведений в РФ за счет объединения высших и средних, морских и речных учебных заведений, их объединения с учебными заведениями смежных профилей пагубно отразились на самом понятии морского образования. Такая интеграция ОУ не привела ни к повышению качества подготовки, ни к росту престижности морских профессий.

Прежняя дифференциация учебных заведений позволяла установить границы и связь между ними. В нынешних условиях созданы учебные конгломераты, при которых управление учебными заведениями не является оптимальным [1].

Исстари повелось, что морскому образованию в Европе отводилась роль ремесла, которому свойственно натаскивание. А это идет вразрез с нашей системой подготовки, которая изначально, благодаря гению Петра Первого, придала морскому образованию в России инженерный профиль.

### **Действия международного масштаба**

В СССР в 1944 году при создании системы высших и средних закрытых морских учебных заведений придерживались этому же принципу. Наша система предусматривала подготовку не ремесленников, способных выполнять действия, раздробленные на компетенции, а творческих специалистов, которые готовы и способны действовать в нестандартных условиях реального плавания.

Конвенция ПДНВ нацелена на минимальный уровень подготовки и изложена казенным языком ИМО, не всегда понятным для моряков тех стран, которые не знакомы с качественным морским образованием.

Однако, не смотря на наличие ПДНВ и принимаемые ИМО меры, аварийность на морском флоте продолжала оставаться на высоком уровне. Это, естественно, низкий уровень подготовки только способствовал снижению уровня безопасности, поскольку неуверенность в своих знаниях приводила психоэмоциональное состояние человека, принимающего управленческие решения, к нестабильности и как следствие к аварии.

Для кардинального решения проблемы повышения безопасности мореплавания необходимо: производить прием в учебные заведения по результатам психологического тестирования, мотивации курсантов и повышения качества подготовки моряков с последующим сопровождением, контролирующим как психоэмоциональное состояние специалиста, так и профессиональный лифтинг с учетом реальных изменений в судходной отрасли.

Между тем, не обладая достаточными полномочиями и ресурсами, ИМО избрала иной путь. В качестве противостояния наметившейся тенденции было принято решение создать стандарты подготовки моряков в расчете, что те, кто не будет им соответствовать, на флот не попадут. В странах Европы и Северной Америки возник дефицит кадров. Освободившиеся ниши стали пополнять выходцы из Азии, главным образом из Филиппин.

Многофакторность, много вариантность обеспечения безопасности мореплавания, а тем паче управление безопасностью – задача на сегодняшний день только продекларированная. Решения нет до сих пор.

Однако при этом не учли два обстоятельства: что филиппинских моряков оказалось на морском флоте достаточно много – на тот момент примерно каждый четвертый был филиппинцем – и то, что у них был мощный профсоюз. В связи с этим наметилась угроза всеобщей забастовки, которая могла привести к коллапсу всей мировой судходной отрасли. Планам ИМО не суждено было осуществиться.

В 1995 году генеральный секретарь ИМО У. О’Нил сказал: «Мы должны признать, что тот «морской мир», в котором выросло большинство из нас, завершает свое существование. На смену культуре безопасности мореплавания пришла культура уступчивости. Но мы должны стремиться к таким отношениям, когда безопасное мореплавание станет предметом гордости» [1].

Попытки международного масштаба (триада ИМО: СОЛАС, МКУБ, ПДНВ на базе IQ-х стандартов качества), совершить это чудо также не привели к желаемому результату.

Первая – это внедрение ПДНВ-95. Новые требования Кодекса усиливают ответственность за подготовку судового персонала и безопасное укомплектование судов экипажами.

Вторая – внедрение МКУБ (ISM Code). Система управления безопасностью позволяет в значительной степени влиять на аварийность.

Третья – применение методологии формальной оценки безопасности. Цель применения этой методологии – управление безопасностью на стадии принятия ответственных решений.

Четвертая – широкое внедрение в морских организациях, на предприятиях, в судходных компаниях систем качества на основе стандартов ИСО (9000 и 14000) по управлению качеством ИСО серии 9000 и стандартов по управлению состоянием окружающей среды ИСО серии 14000 [1].

Они разбились о человеческий фактор (филиппинский синдром 1995 год). И как результат утрата престижа морской профессии, в том числе и на Филиппинах.

Генсек ИМО Митропулос описал филиппинских моряков как моряков, которые были «невоспетыми героями» «невоспето́й индустрии», а именно судоходной отрасли, которая занимается перевозками грузов, «большая часть мировой торговли в товарах». Далее он заявил, что «международное сообщество должно воздать должное филиппинским морякам» и Филиппинам за их вклад в судоходство и международную морскую торговлю.

Однако, судя по всему, «культура уступчивости» прочно закрепилась в судоходной отрасли. В морских профессиях все больше стало появляться женщин, при этом уповают не на проблемы найма моряков-мужчин, а на гендерное равноправие. По сути, при помощи Конвенции пытаются все время разрешить проблемы в морском образовании. Однако ПДНВ оказалась и продолжает оставаться «сырой».

С момента принятия к Конвенции неоднократно принимались поправки: в 1991, 1994, 1995, 1997, 1998, 2004, 2006 и 2010 годах. В настоящее время готовятся к ее очередному пересмотру. Это вызвано как объективными причинами: появлением судов новых конструкций и специфическим их предназначением, так и субъективными, о которых говорят крайне неохотно, – снижением качества подготовки моряков на международном судоходном кадровом рынке [1].

## Теория и практика

Безусловно, для обеспечения безопасности мореплавания требуется установить некоторый порог компетенций, которой бы позволял обрести уверенность, что на всех судах мирового флота есть единое понимание последствий и ответственности за принимаемые решения.

Система подготовки морских специалистов должна сводиться к двум фундаментальным положениям: это, во-первых, сочетание теории и практики, и во-вторых, формирование личностной ответственности и психофизиологической устойчивости морских офицеров.

Однако, под нажимом отмеченных выше обстоятельств ИМО была вынуждена при установлении стандартов подготовки отойти от этих основополагающих компетенций – и пойти по пути декомпозиции, т.е. детализации процессов подготовки, прибегнуть к процессу «натаскивания», европейского качества и исключить из этого процесса воспитание личности, формирование ответственности и устойчивой психики.

Между теорией и практикой есть четкие границы, которые наглядно определены народной мудростью: теория без практики мертва или бесплодна, практика без теории слепа или пагубна. Для теории нужны главным образом знания, для практики, сверх того, и умение.

Отсюда ясно общее соотношение между теорией и практикой. Можно обсуждать не действуя, но гораздо хуже действовать без обсуждения.

Не полагаясь на полноту этих двух фундаментальных положений, в ПДНВ их подвергли декомпозиции: знание, умение, понимание, навыки...

В свою очередь компетенция «знание» подразделяется на «знания», «хорошие знания», «глубокие знания». Невольно возникают вопросы, где границы между этими компетенциями и в чем разница между «знанием» и «пониманием».

Мутность ПДНВ не способствует пониманию всей глубины подготовки моряков.

Прав был классик: «Господи, Боже! Какое необъятное расстояние между знанием света и умением пользоваться этим знанием» [Н.В. Гоголь «Мертвые души»].

Разделение понятий привела к существенному усложнению ПДНВ. Для понимания того, что там написано, требуются пространные комментарии. В результате простые и понятные вещи становятся непонятными. Противоречивость толкований проникла в умы самих толкователей. Удивительного в этом ничего нет.

По мере совершенствования человеческой речи слова стали обретать многозначность, а это отразилось на качестве восприятия информации.

По мнению Эрика Берна, декомпозиция целого на части ведет к изнашиванию, разрушению, дезорганизации или разложению [Э. Берна. «Лидер и группа. О структуре и динамике организаций и групп»].

Трансформация информации в знания (это такое изменение, такая «транс – формация» сознания, когда на его месте появляются навыки и мудрость. Об этом говорят, как древние философы, так и современные. Но кто же их слышит? [1].

А что важнее мудрости? [ОШО].

Познание начинается со знакомства субъекта с информацией об объекте. И это очень важный этап, поскольку субъект на основании получаемой информации делает заключение о нужности и полезности информации. Подвох заключается в том, что субъект в силу самых различных причин может прийти к неверному заключению о нужности или, наоборот, ненужности получаемой информации. При этом он использует свой или чужой опыт, и это может послужить причиной полного или частичного отвержения информации.

Явление довольно распространенное. Это наблюдается и в морских учебных заведениях. Неоднократно результаты тестирования курсантов показывают, что чем старше курс, тем сильнее утрата мотивации в морской специальности, особенно после практик. Чего греха таить, некоторые приходят в учебное заведение за дипломом, а не за знаниями. Но в дальнейшем в силу меркантильных интересов остаются в профессии. Или иная ситуация: полагаясь и уверовав в непогрешимость современных технологий, пренебрегают классическими основами судовождения.

Что касается навыков, то они при кажущемся единообразии будут так же отличаться у разных людей в зависимости и от психоэмоционального состояния, в котором человек находится в данное время. «Отработанные навыки», безотказно действующие в одних ситуациях, могут оказаться неприемлемыми и даже вредными в других, хотя внешне и сходных ситуациях.

### **Нестандартные решения в ЧС**

В чрезвычайных ситуациях человек проявляет себя совершенно по-другому. Например, при обучении на тренажерах выбрав первым не правильное решение он его запоминает и повторяет его в случае возникновения чрезвычайной ситуации в действительности. Такой психологический феномен присущ в 30% случаев.

Следовательно, при обучении, используя стандарты, нужно предусматривать и нестандартные ситуации, которые позволяют развивать гибкость ума, для преодоления нестандартных ситуаций, но исходя при этом из тех же самых универсальных компетенций: теории и практики.

Исторически к системе морского образования в России и странах Европы сформировался различный подход. В России Петр Первый, создавший Школу математических и навигацких наук, положил тем самым начало инженерно-техническому и военному образованию. А в других странах Европы и Америки – это ремесло (переход к навыкам без теории). При переходе к стандартам, прописанным в ПДНВ, сбывается пророчество А.Н. Крылова – «практика без теории опасна».

В современном мире, когда существует угроза терроризма и кибератак на средства современной навигации и когда наблюдается отход от проверенных способов обеспечения безопасности мореплавания, особенно актуален возврат к автономным способам навигации на новом уровне. Об этом говорят весь морской ППС: «Безопасность мореплавания отдана на откуп GPS».

«Наставление по организации штурманской службы на судах рыбопромыслового флота» (НШСР) – это предельно лаконичный документ, который позволяет судоводителю принимать управленческие решения, опираясь на личный опыт и на опыт, наработанный предшественниками. НШСР не исключает и не ограничивает применение любых мер, которые, по мнению капитана и судоводителей, могут оказаться эффективными в конкретных условиях плавания на данном судне. не исключают стереотипных действий. В стандартных ситуациях, чтобы избежать ошибок при недостатке опыта, НШСР предлагает стереотипные действия.

Попав в жестокий шторм, древний мореплавец обращался к Нептуну со словами: «О Боже! Ты можешь спасти меня, коли пожелаешь, а можешь погубить. Но какова бы ни была твоя воля, рулем своим я буду править по своему разумению» [Мишель де Монтень «Опыты»].

В словах древнего мореплавателя звучит убежденность в своих силах. Такую же убежденность нужно прививать тем, кто намерен связать свою жизнь с флотом. Стандарты же, предписываемые ПДНВ, этому не способствуют. Благодаря стандартам профессия моряка становится не интересной.

НШСР опирается на то, что судоводитель имеет надежную теоретическую и практическую подготовку. В то время как ПДНВ позволяет довольствоваться знаниями и пониманиями, где-то умениями, а где-то и навыками.

## Практика в море

Вне всякого сомнения, практика, закрепляющая теорию, нужна. Однако, практика позволяет обретать навыки с разной постепенностью, а это зависит от психофизиологического состояния человека. Морская практика на судах была и будет, именно учеба на судах в море позволяет усовершенствовать уже имеющиеся знания, которые «на рабочем месте» трансформируются в навыки. А вот приобретать навыки, как это практикуется в современных условиях, без надлежащей теоретической подготовки, – это уже опасно.

Отрабатывать навыки на реальных объектах чревато губительными последствиями. Для этой цели создаются тренажеры, которые в какой-то степени позволяют адаптироваться к последующим действиям в реальных ситуациях, что позволяет приобрести в ОУ и теорию и практику.

Но мировая судоходная отрасль ориентируется именно на такую учебу на судне, где отдается предпочтение практике, минуя теорию, а это уже чистая декомпозиция. В наше время обеспечение безопасности мореплавания опирается на чек-листы, на «бумажную безопасность», которая подтверждается количеством бумаг, сопутствующих процессу судовождения в качестве балласта.

В результате получается, что процесс судовождения страдает от недостатка знаний и в то же самое время утопает в деталях, точнее в компетенциях. Современный поток информации более всего способствует тому, чтобы парализовать человека, оказавшегося в нестандартной ситуации.

В разработке ПДНВ принимали участие не только капитаны, но и представители, зачастую далеких от мореплавания профессий (юристы, чиновники, управленцы, профсоюзные организаторы и пр.), у которых опыта работы в море нет. В дальнейшем, уже при «изучении» ПДНВ появилось множество интерпретаторов, порою далеких от морского флота. Но беда в том, что этим витийствам внимают и делают вид, что поняли смысл, множество слушателей. Слова высокопоставленных чиновников завораживают, гипнотизируют аудиторию. Невразумительную мысль услужливо стремятся воплотить в жизнь. Например, в угоду европейскому подходу к образованию - натаскиванию в колледжах, чиновники от Минморфлота вообще отказались от высшего образования, приняв положение о дипломировании в 2021 году.

Петр первый и правительство СССР понимали, что нужно российскому флоту, а мы что творим?

### Каким же должно быть российское морское образование?

Российское морское образование должно быть добротным. Это нужно, прежде всего, экономике РОССИИ. Пора, давно пора вернуться к тому, чтобы морским и рыбопромысловым флотами управляли моряки!

Каким морское образование должно быть, высшим или средним? И высшим, и средним. Были и есть мнения со времен создания системы высших и средних морских учебных заведений, что среднего образования вполне достаточно, чтобы обеспечить безопасность мореплавания.

Рик Майнер, президент Сенека-колледжа в Канаде, высказался категорично: «Если вы хотите учиться всю жизнь – идите в университет, если вы хотите получить профессию, которая даст вам возможность работать и достойно зарабатывать, – поступайте в колледж».

Уже давно известно и принято, как закон, что моряку следует учиться постоянно! В сравнении с другими профессиям профессия моряка – временная. Многим приходится уходить на береговую работу досрочно.

Моряк, имеющий высшее образование, на берегу оказывается более востребованным. Следует осознать, что моряки, уходящие на береговую работу, – это интеллектуальный капитал государства. Они обогащены опытом гибкого взаимодействия с иностранными предпринимателями, и как правило, хорошо владеют английским языком.

Сегодня некоторые учебные заведения имитируют образование, скрывая истинную картину ворохом бумаг, именуемых системой менеджмента качества. Как и ИМО?!

Высшее морское образование (полноценное, каким оно было в СССР) флоту РФ необходимо. Образно эту мысль выразил лауреат Нобелевской премии Г. Селье: «Среди нас должен оставаться кто-то, кто будет обучать людей совершенствовать средства для обозрения горизонта, а не для еще более пристального взглядывания в бесконечно малое» [Г. Селье «От мечты к открытию»].

Да, не все пойдут в науку «для обозрения горизонтов», но именно эти мореходы доказали, что высшее образование нужно современному мореплаванию. Те же, кто связал свою судьбу с морем, способствовали росту престижности морских профессий и росту авторитета советских (российских) моряков, который сегодня, увы, пошатнулся.

Витиеватость и казенщина – стиль современных деловых бумаг (текстов). Прочитал, и требуются комментарии. Комментирование превратилось в статью дохода для самых различных толкователей, как добросовестных, так и не очень.

Возьмите Резолюции ИМО – это нечитаемые документы. Прочитал Резолюцию, и возникает вполне естественное желание отложить ее в сторону. Витиеватость присуща многим документам, а между тем цель этих самых документов – внести ясность, выделить из многообразия сочетаний ситуаций правильное и оптимальное решение.

«Сложнейшие словопрения, изобретение нагроможденных терминов усложнения, как будто бы признак начитанности – все это не только не приводит, но именно отводит от потребности бытия. А ведь сейчас – так нужно простое сердечное слово. Не трехэтажный загроможденный термин, но частица светло выполнимой жизни ожидается. Народная масса хочет жить. Хочет, по возможности, украсить жизнь. Народная масса хочет знать. Отлично понимает народ, что знание вовсе не есть условно нагроможденная непонятность, но может быть преподано в очень простых, ясных словах, не огрызаясь и не злобствуя.

### **Рекомендация российскому морскому образованию**

Пора бы уже прекратить самогубительство в области и морского образования.

Переpravляясь через бурю, следует держать выше того места, куда направляешься: течением снесет! ПДНВ – это не тот ориентир, к которому нужно стремиться. Российское морское образование издавна служило и должно продолжать служить примером для других стран [1].

По большому счету, моряка нужно изъять из словесной суеты, что позволит ему полноценно жить, работать и проявлять свои творческие способности.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Григорьев Н. ПДНВ – это стандарт идеального судоводителя? Нет. // Морские вести России. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.morvesti.ru/themes/1696/92500/>

### **PROBLEMS OF MARINE EDUCATION**

<sup>1</sup>Bondarev Vitaly Aleksandrovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Navigation and Safety of Navigation

<sup>2</sup>Bondareva Olga Mikhailovna, Associate Professor of the Department of Navigation and Safety of Navigation

<sup>3</sup>Ragulina Izumrud Ramazanovna, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor of the Department of Navigation and Safety of Navigation

<sup>1,2,3</sup>Baltic Fishing Fleet State Academy FSBEI HE "KSTU", Kaliningrad, Russia, e-mail: <sup>1</sup>va.bondarev@gmail.com; <sup>2</sup>izragulina@mail.ru

*The article considers the inconsistency of STCW requirements and the results of their implementation in reality, leading to a decrease in the quality of training of marine specialists and the level of navigation safety. The approach of European maritime education and the historically established level of training in Russia is analyzed. A departure from the strict STCW requirements to the level of training in the direction of reducing the requirements to the minimum possible as a result of the decomposition of the new STCW requirements, starting from 1995, was revealed. Recommendations were given to maritime education on the necessary preservation of the level of engineering education in Russia.*

## ОЦЕНКА ПРИМЕНЕНИЯ РОУДРЕЙЛЕРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕВОЗОК В РОССИИ

<sup>1</sup>Волкова Татьяна Алексеевна, бакалавр, экспедитор

<sup>2</sup>Мейлер Леонид Ефимович, канд. техн. наук, доцент

<sup>1</sup>ООО «Новик Логистик», Калининград, Россия, e-mail: t.volkova@novikgroup.ru

<sup>2</sup>БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ», Калининград, Россия, e-mail: meyler.le@bgarf.ru

*Роудрейлерная технология перевозок заключается в применении специализированного подвижного состава, который передвигается как по автомобильной дороге, так и по железнодорожному пути. Перевозки в/из Калининградской области в настоящее время связаны с дефицитом контейнеров, очередями автопоездов в пунктах пропуска на государственных границах Белоруссии и Литвы. С учетом преимуществ описываемой технологии перевозок она может быть рекомендована для внедрения на железных дорогах России.*

### Введение

Актуальной задачей во многих странах остаётся снижение преобладающего использования автомобильного транспорта. Проблемы проявляются из-за перегруженности дорог, безопасности перевозки и ухудшения состояния окружающей среды. Во многих странах Европы вводилась политика, которая побуждала к тому, чтобы для транспортировки грузов и пассажиров использовались новые технологии, являющиеся экологически более привлекательными. Проблема использования автомобильного транспорта в последнее время стала особенно актуальной для Калининградской области, которая не имеет общих границ с остальной территорией России, являясь ее полу-эксклавом. Жесткая санкционная политика Европейского Союза в отношении Российской Федерации, привела к тому, что Литва вначале полностью запретила транзит по своей территории большой номенклатуры товаров, предназначенных для нужд области. После угрозы принятия решительных ответных экономических мер, Евросоюз дал разрешение на транспортировку грузов (из России в Россию), но только железнодорожным транспортом. Однако, поскольку определенная часть товаров может перевозиться автотранспортом, следствием стали многокилометровые очереди на границе Калининградской области и Литвы. Например, в середине марта 2022 г. на выезде из Калининградской области в Литву, на многостороннем автомобильном пункте пропуска (МАПП) «Чернышевское» (рис. 1) [1], образовалась восьмиклометровая очередь, в которой стояло более 500 автопоездов. Таможенные органы оценивает прием и оформление грузовых транспортных средств, следующих из Калининградской области, с периодичностью 3 - 4 автомобиля в час.

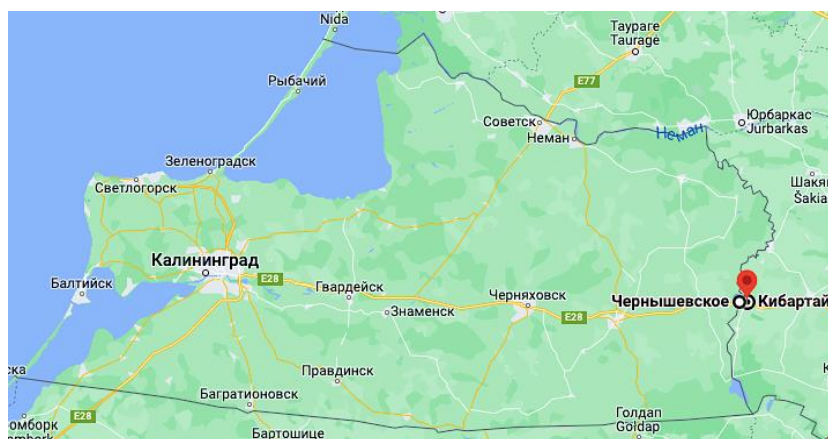


Рис.1. Расположение МАПП «Чернышевское»

В июле 2022 г., очередь на выезд составляла от 250 до 380 большегрузных автопоездов [2].  
 Рис. 2 иллюстрирует динамику очереди в МАПП в июне – июле 2022 г. [3]

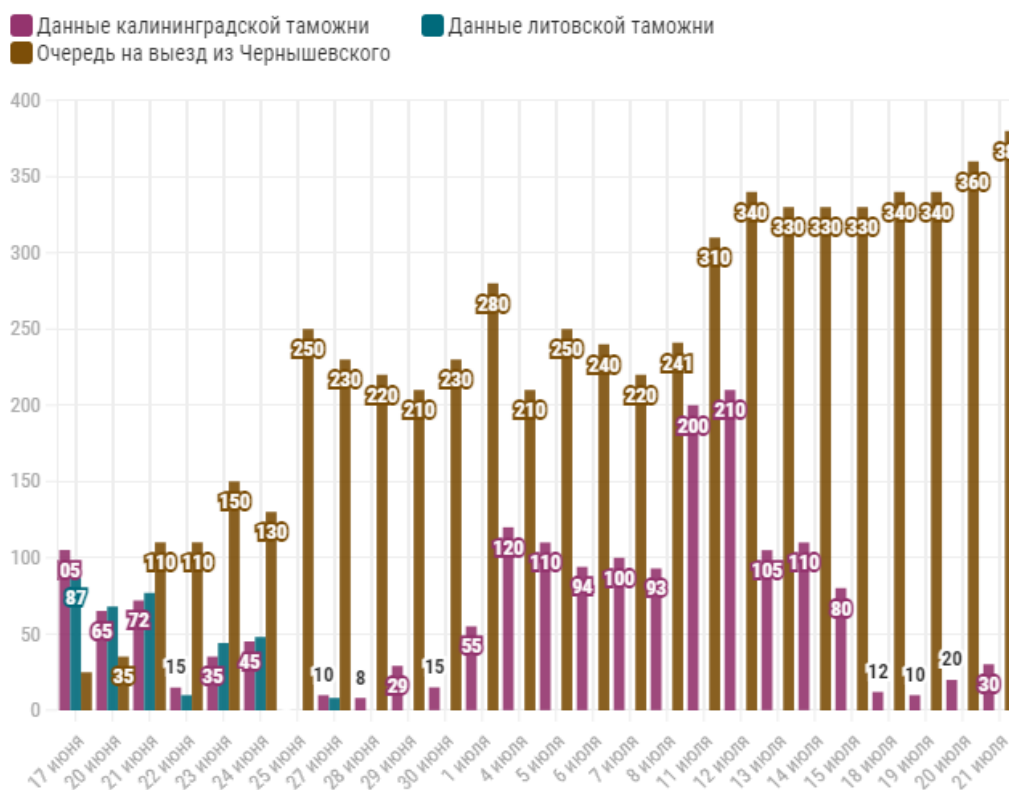


Рис. 2. Динамика очереди автопоездов в МАПП «Чернышевское»

### Интермодальные перевозки

Рынок транспортных услуг определяет свои условия по использованию различных видов транспорта, а именно: скорость доставки, минимизация транспортных издержек, сохранность и безопасность, а наиболее актуальным параметром на сегодняшний день является экологичность транспортировки грузов и пассажиров. Соответствовать данным требованиям стало возможным при использовании интермодальных или комбинированных перевозок. Интермодальные технологии перевозок представляют собой транспортно-технологическую систему организации транспортировки грузов с использованием двух и более видов транспорта, ответственность за груз которого несет оператор интермодальной перевозки (ОИП), осуществляющий договоренность с экспедиторами на том или ином этапе перевозки, и тарифной ставке, согласованной с перевозчиками.

Груз предъявляется к перевозке в укрупненных грузовых единицах (УГЕ) или грузовых транспортных единицах (ГТЕ). При этом, транспортировка груза осуществляется в рамках одной ГТЕ, в процессе перевозки ГТЕ не должна быть консолидирована или деконсолидирована. Комбинированная перевозка – это частный случай интермодальной перевозки ГТЕ с использованием нескольких комбинаций видов транспорта: морского, воздушного, железнодорожного или автомобильного. Одним из видов интермодальной технологии является контейнерная перевозка, в которой ГТЕ является унифицированный контейнер. Такой вид технологии перевозки совершается в рамках контейнерной транспортной системы. Система включает в себя такие элементы, как: технические средства (парк контейнеров, подвижной состав), технологии выполнения транспортировки и перегрузочных работ, инфраструктура (грузовые терминалы), пути сообщения, информационные технологии по планированию, организации, контролю и координации, а также административно - правовое регулирование. Перевозка контейнеров предполагает их погрузку/разгрузку на/с транспортного средства. Для случая комбинации автомобильного и железнодорожного транспорта это автоприцеп/полуприцеп и железнодорожная платформа.

Однако, в настоящее время, когда Россия находится под санкциями, возникли условия, усложняющие контейнерный перевозки. По данным апрель 2022 года, после ухода международных



линейных операторов (Maersk, MSC, Harag-Lloyd и др.) с рынка транспортных услуг в России, дефицит в контейнерах оценивается в количестве 300 тыс. TEU [4]. «Как только иностранные компании завершат эвакуацию своего парка, российский рынок недосчитается как минимум трети прежнего объема тары» - отмечает компания «Трансконтейнер» [5]. Собственным производством потери заместить невозможно – в России выпускается 10 000 контейнеров в год, для покупки в Китае потребуется до 1,4 млрд долл. США [6].

Использование комбинированных ходовых частей для движения по железным и автомобильным дорогам признается целесообразным, однако сфера их применения ограничена, так как на железных дорогах существует тенденция увеличения грузоподъемности, а осевая нагрузка на автомобильную дорогу строго регламентируется в каждой стране. Так, по нормам, принятым в европейских странах, максимально допустимая полная масса автотранспортного средства - 40 т, в Финляндии - 52 т, в России на сегодня - 38 т.

В связи с этим, следует оценить возможность использования комбинированной схемы транспортировки «автомобильный – железнодорожный транспорт», в частности роудрейлерной технологии, при перевозках в/из Калининградской области.

### Роудрейлерная технология перевозок

Примером альтернативного варианта транспортировки груза могут выступать роудрейлерные технологии перевозок. Роудрейлерная технология - это организация комбинированных железнодорожно – автомобильных перевозок без железнодорожных платформ [7]. С технической точки зрения, роудрейлерная технология представляет собой комбинацию дорожного шинно-пневматического автоприцепа с парой железнодорожных тележек, оборудованных устройством присоединения такого бимодуля к системе автоблокировки и торможения поезда. Роудрейлер представляет собой специальный полуприцеп-вагон, имеющий автомобильные колеса, который устанавливается на железнодорожные тележки (рис. 3). Такой роудрейлер передвигается в железнодорожном составе как вагон. Прибыв на железнодорожную станцию, роудрейлер отсоединяется от железнодорожных тележек и далее, как полуприцеп, может двигаться по шоссе за седельным автотягачом.

Роудрейлер оснащен:

- усиленной рамой,
- устройствами для установки полуприцепа на железнодорожные тележки,
- устройствами для втягивания автомобильных колесных пар при движении по железной дороге.

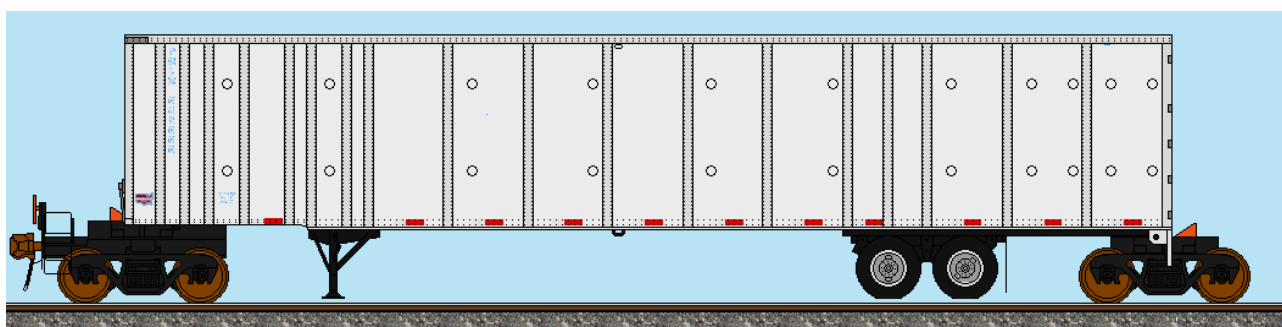


Рис. 3. Внешний вид роудрейлера и железнодорожных тележек

При формировании роудрейлерного поезда существует 3 варианта технологических решений при формировании железнодорожного состава:

- использование адаптеров, благодаря которым передняя и задняя оконечности роудрейлеров опираются на одну стандартную железнодорожную тележку;
- передняя часть роудрейлера опирается на железнодорожную тележку, а носовая сцепляется непосредственно с задней частью предыдущего в составе поезда полуприцепа;
- применение нестандартных тележек, на которые непосредственно опираются переднюю и заднюю оконечности соседних роудрейлеров.

Этапы формирования роудрейлерного поезда схематически показаны на рис. 4 [8]:

- на складе грузоотправителя происходит прием и укладка груза в роудрейлер. с помощью

седельного тягача он доставляется на железнодорожный терминал. на стоянке или на открытом складе происходит накопление партии.

- с помощью локального вилочного погрузчика железнодорожные тележки устанавливаются на рельсы.

- с помощью локального седельного тягача полуприцеп подвозится к железнодорожной тележке.

- при помощи пневматической подвески задняя часть роудрейлера приподнимается, закатывается на тележку и фиксируется, опускаются стойки

- опоры и автомобильные колеса поднимаются и тягач отправляется за следующим роудрейлером.

- в данной последовательности формируется роудрейлерный поезд.

- в завершении подводится концевая тележка и, с помощью автосцепки соединяет систему с локомотивом.

- по окончании транспортировки роудрейлерный поезд разбирается в обратной последовательности.

Применение роудрейлеров отличается рядом преимуществ по сравнению с перевозкой грузов в контейнерах [7, 8]:

- обслуживание подвижного состава на терминалах не требует использования мостовых кранов;

- невысокая стоимость терминалов для формирования роудрейлерного поезда;

- устранение промежуточных погрузочно-разгрузочных работ (ПРР) между автомобильным и железнодорожным транспортом, т.е. снижение затрат на ПРР (время, занимаемое на установку одного прицепа на железнодорожную тележку составляет 5 минут);

- снижение затрат на промежуточное хранение и повышение сохранности грузов;

- снижение расходов топлива, которая достигается за счет перемещения грузопотока с автомобильных на железнодорожные дороги, что позволяет уменьшить выбросы углекислого газа и тем самым уменьшить негативное влияние на экологию;

- железнодорожный вид транспорта более энергоэффективен по сравнению с автомобильным;

- снижение заторов и аварийности на автомобильных дорогах;

- повышение долговечности автодорожного полотна;

- сочетание ритмичности движения железнодорожного транспорта с гибкостью автомобильных перевозок;

- сокращение количества операций погрузки/разгрузки (контейнер при перевозке смешанной железнодорожно-автомобильной доставкой перегружается минимум 4 раза, применение контрейлеров требует только 2-х перегрузок: установки полуприцепов к железнодорожной платформе в пункте отправления, и снятия – в пункте прибытия).

Наиболее успешная реализация проекта роудрейлерной технологии перевозки принадлежит американской компании Triple Crown. Она разработала систему Roadrailer (версия Mark V), которая включала парк 53-футовых трейлеров в количестве 7000 единиц [9]. Технические нормы для роудрейлерной системы разработаны Международным союзом железных дорог (допустимая нагрузка на колесную пару составляет 225 и 180 кН при скорости соответственно до 100 км/ч и 160 км/ч, радиусов кривизны в плане 75 м, в профиле 500 м и др.) [10].

### **Сравнительный анализ ГТЕ**

При решении вопроса о выборе между контейнерами и контрейлерами необходимо провести предварительные расчеты, которые и могут выявить более рациональный метод в конкретном случае. Все зависит от объема перевозки, дальности и характера маршрута, а также типа груза, предъявленного к перевозке. Известно, что универсальные контейнеры составляют 95% мирового парка, в том числе 75% от общего числа 20-футовые контейнеры, 20% от общего числа 40-футовые, остальные 5% – специализированные контейнеры.

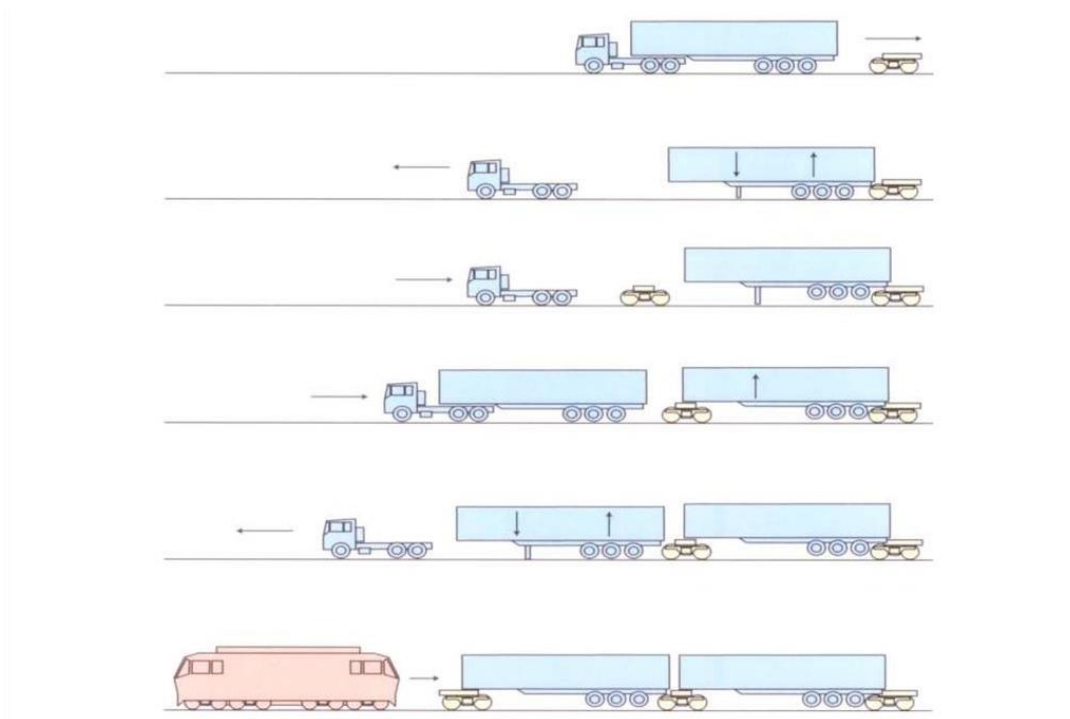


Рис. 4. Схема формирования роудрейлерного поезда

Обычно на автоприцепе размещается один 40' контейнер или один-два 20' контейнера. На железнодорожной специализированной (фитинговой) платформе, в зависимости от ее длины, могут размещаться различное количество контейнеров (рис. 5).

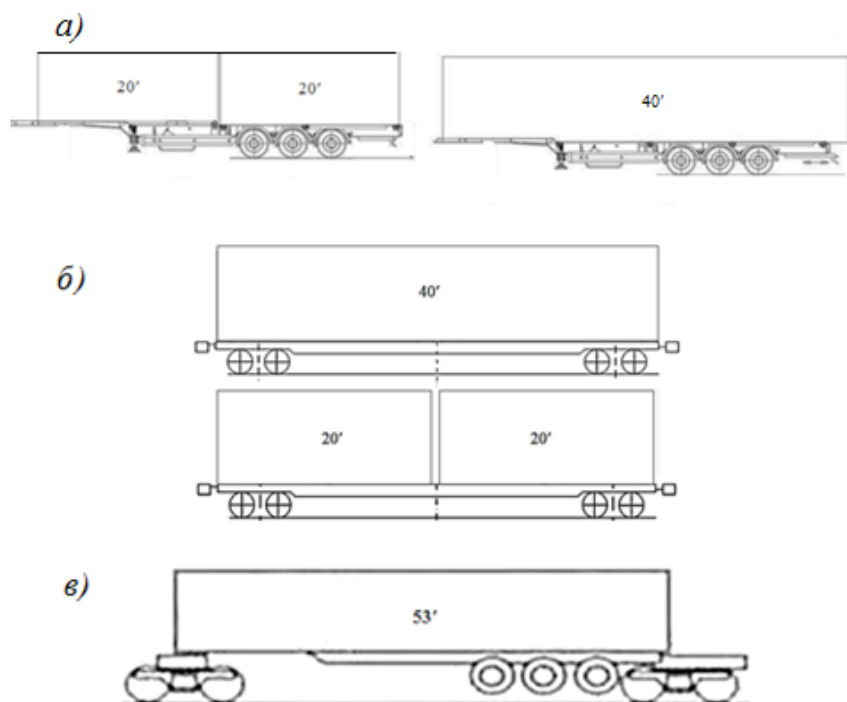


Рис. 5. Схемы перевозки контейнеров и роудрейлера  
а – на автоприцепе, б – на железнодорожной платформе, в – роудрейлер

Проведем анализ перевозки одного 40' DC или двух 20' DC стандартных контейнеров (DC – Dry Cube) [11] на фитинговой платформе и роудрейлера 53' [12]. Результаты сравнения массогабаритных параметров [13] приведены в таблице 1.

## Сравнение ГТЕ по массогабаритным параметрам

Параметр	Контейнеры		Роудрейлер 53'	Сравнение	
	20' DC	40' DC		Роудрейлер и 2-х конт. 20'	Роудрейлер и 1 конт. 40'
Внешняя длина, м					
Масса тары, т				84,44	
Грузоподъемность, т				-21,18	5
Внутренний объем, м <sup>3</sup>					3
Удельный погрузочный объем, т/м <sup>3</sup>					
Коэффициент тары					

Примечание: в столбцах «Сравнение» знак «+» означает, что параметр роудрейлера выше, чем у контейнера; знак «-» означает, что параметр роудрейлера ниже, чем у контейнера.

Из данных табл. 1 видно, что по внутреннему объему роудрейлер превосходит суммарный объем 2-х 20' контейнеров и 40' контейнера более, чем на 70%. По грузоподъемности роудрейлер уступает суммарной грузоподъемности двух 20' контейнеров порядка 20%, но превышает грузоподъемность 40' контейнера почти на 6%. Коэффициент тары роудрейлера выше, чем у 2-х 20' контейнеров, и у 40' контейнера. Удельный погрузочный объем у роудрейлера наименьший, следовательно, он будет более привлекателен при перевозке легкого груза.

## Оценка стоимости перевозки в поезде с различными ГТЕ

Оценим по существующим в настоящее время ценам стоимостные характеристики указанных ГТЕ, при условии, что для перевозки приобретаются новые контейнеры и роудрейлер.

Ориентировочная цена контейнеров [14]: 20' DC - 370 тыс. руб., а 40' DC - 560 тыс. руб.

Цена 40' фитинговой железнодорожной платформы, модель 13-9744-06 [15]: 3,55 млн руб.

Для оценки стоимости роудрейлера используем информацию [16]: «...компания *Canadian National (CN)* приобрела 200 прицепов *RoadRailer Mark V* и 130 железнодорожных тележек *RoadRailer ...*, стоимость которых составила 13 млн долл. США». По действующему курсу рубля к долл. США (1\$ ≈ 60 руб.) 13 млн \$ ≈ 780 млн руб.

В этой информации не указана отдельно стоимость роудрейлеров и соединительных тележек, поэтому приведем ориентировочную оценку по прототипу. Стоимость аналогичного по массогабаритным параметрам полуприцепа Т3-16/К [17] – 3,30 млн руб. Тогда, стоимость 200 роудрейлеров ≈ 660 млн руб.; стоимость 130 тележек ≈ 120 млн руб. Стоимость 1 тележки ≈ 0,90 млн руб., что находится в диапазоне цен на новые вагонные тележки [18].

Сравним (табл. 2) перевозку какого-либо груза в контейнерном поезде на фитинговых платформах и в роудрейлерном поезде. Предположим, что поезда имеют соответственно 50 платформ и 50 роудрейлеров.

Несмотря на то, что стоимость роудрейлеров значительно превышает стоимость контейнеров, стоимость роудрейлерного поезда практически одинакова со стоимостью контейнерных поездов с 20' и 40' контейнерами, за счет высокой стоимости фитинговых платформ. Так как в роудрейлерных транспортировках отсутствует вагон-платформа, весь состав получается легким. По удельной стоимости суммарной грузоподъемности роудрейлерный поезд «проигрывает» только контейнерному поезду с 20' контейнерами, но «выигрывает» у контейнерных поездов по удельной стоимости суммарного внутреннего объема.

## Сравнение перевозки в поезде с различными ГТЕ по стоимостным параметрам

Параметр	Контейнерный поезд		Роудрейлерный поезд
	20'	40'	
Стоимость фитинговых платформ (50 ед.), млн руб.			–
Стоимость 20' DC контейнеров (100 ед.), млн руб.		–	–
Стоимость 40' DC контейнеров (50 ед.), млн руб.	–		–
Стоимость роудрейлеров, (50 ед.) млн руб.	–	–	
Стоимость тележек (51 ед.), млн руб.	–	–	
Стоимость поезда, млн руб.			
Удельная стоимость суммарной грузоподъемности, млн руб./т.			
Удельная стоимость суммарного внутреннего объема, млн руб./м <sup>3</sup>			

Вышеприведенные оценки подтверждаются результатами исследования [19], которые показывают, что себестоимость перевозок грузов роудрейлерами ниже, чем автомобильным и железнодорожным транспортом (рис. 6)

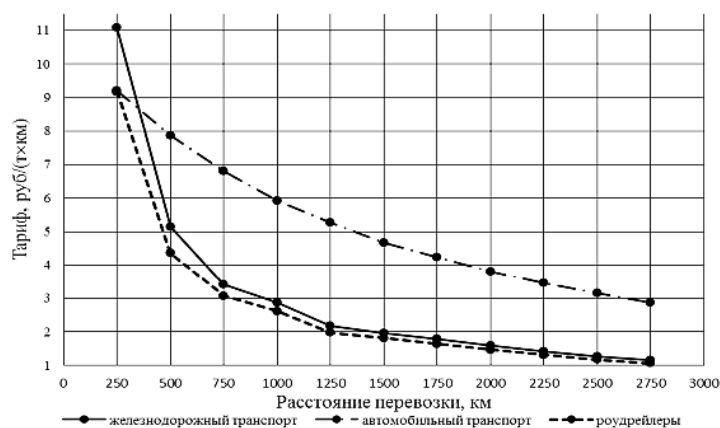


Рис. 6. Изменение себестоимости перевозки грузов

### Заключение

Как показывает зарубежный опыт [20, 21, 22], основным результатом использования роудрейлерных перевозок является ускорение доставки грузов. Принимая во внимание вышеприведенные преимущества, необходимо развивать такие транспортные технологии, как роудрейлерная, причем не только для Калининградской области, но и для всей страны. Калининградская область, в силу своей обособленности от остальной территории Российской Федерации, является потребителем большой номенклатуры грузов, необходимых для жизнеобеспечения региона и функционирования предприятий промышленности и сельского хозяйства. Транзитный железнодорожный «Новый шелковый путь» из Китая в Европу проходит через территорию области. Поэтому бесперебойная транспортировка грузов крайне важна как для международной торговли, так и для экономики области.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. МАПП Чернышевское. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.google.com/maps/place/Таможенный+Пост+МАПП+Чернышевское>
2. Очереди на границе Литвы и Калининградской области. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.rzd-partner.ru/>
3. Очереди на границе Литвы и Калининградской области. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rugrad.online/news/1284537/>

4. России не хватает контейнеров. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/comments/rossii-ne-khvataet-kontejnerov/>
5. "Трансконтейнер" ожидает дефицита контейнеров на российском рынке с июня 2022 года. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tass.ru/ekonomika/14425635>
6. Транспортная отрасль России может потерять до половины и более контейнерного парка. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.forbes.ru/biznes/462447>
7. Контрейлерные перевозки и безвагонные технологии. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://spravochnick.ru/logistika/>
8. Мейлер Л.Е. Технологии интермодальных перевозок: учебное пособие / Л.Е. Мейлер; БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ». – Калининград: Издательство БГАРФ, 2021. – 148 с.
9. Tracks Ahead: Road Rainers. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=ozqY3Ze4sAU>
10. Рахимов, И. В. Роудрейлерные перевозки и возможность их применения в железнодорожных войсках / И. В. Рахимов, И. Д. Куртц, Т. С. Смирнова // Техника и технология наземного транспорта. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_47107444\\_58651254.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_47107444_58651254.pdf)
11. Размеры морских контейнеров. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.container-logistic.ru/razmery-harakteristiki-kontejnerov>
12. Triple Crown Services. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: [http://www.qstation.org/BNSF\\_Triple\\_Crown/](http://www.qstation.org/BNSF_Triple_Crown/)
13. Справочник по морским и железнодорожным транспортным контейнерам. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.all-containers.ru/>
14. Фут контейнер. Поставщик морских контейнеров. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://foot-container.ru/>
15. Вагонная техника. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: [https://transmash.com/products/vagon/13\\_9744\\_06/](https://transmash.com/products/vagon/13_9744_06/)
16. Canadian National buys RoadRailer trailers for Toronto-Montreal runs. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.trucknews.com/transportation/canadian-national-buys-roadrailer-trailers-for-toronto-montreal-runs/1003113310/>
17. Бортовой полуприцеп. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://полуприцеп.рф/>
18. Вагонные тележки в России. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: [http://www.tradedir.ru/good/vagonnye\\_telezhki.html](http://www.tradedir.ru/good/vagonnye_telezhki.html)
19. Рябов И.М. Снижение себестоимости перевозки грузов за счет введения в эксплуатацию роудрейлеров. / И.М. Рябов, В.В. Горина // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. Том: 3, №: 4-1 (15-1), 2015. – С. 383-384. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_24890109\\_24397256.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_24890109_24397256.pdf)
20. Ким В.Р. Роудрейлер, как технология повышения эффективности региональной доставки в РФ. / В.Р. Ким // Инновационное развитие транспорта. Материалы IV Всероссийской научной конференции студентов, магистрантов и аспирантов Санкт-Петербург, 2019 г. – С. 32-35. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: [https://ru.essays.club/Экономические\\_дисциплины/Инновации/Роудрейлер-как-технология-повышения-287014.html](https://ru.essays.club/Экономические_дисциплины/Инновации/Роудрейлер-как-технология-повышения-287014.html)
21. Скорченко М.Ю. Зарубежный опыт организации регулярного контрейлерного сообщения / М.Ю. Скорченко // Транспортные системы и технологии, 4(1), 2018. – С.19-42. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/zarubezhnyy-opyt-organizatsii-regulyarnogo-kontreylernogo-soobscheniya>
22. Америка: пионер контрейлерных перевозок. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/comments/amerika-pioner-kontreylernykh-perevozok/>

# ESTIMATION OF APPLICATION OF THE ROADRAIL TRANSPORTATION TECHNOLOGY IN RUSSIA

<sup>1</sup>Volkova Tatiana Alexeevna, bachelor, forwarder

<sup>2</sup>Meyler Leonid Efimovich, cand. techn. sc., assist. prof.

<sup>1</sup>LLC "Novik Logistic", Kaliningrad, Russia, e-mail: t.volkova@novikgroup.ru

<sup>2</sup>Baltic Fishing Fleet State Academy FSBEI HE "KSTU",  
Kaliningrad, Russia, e-mail: meyler.le@bgarf.ru

*Roadrail transportation technology uses the specialized rolling stock that moves both on road and rail. Transportation to/from the Kaliningrad region is currently associated with a shortage of containers, queues of lorries at checkpoints on the state borders of Belarus and Lithuania. The road rail transportation technology described in the article can be recommended for implementation on the railways of Russia, taking into account its advantages.*

УДК 656.61.052

## ДИНАМИЧЕСКАЯ ОСАДКА СУДОВ В УСЛОВИЯХ, СТЕСНЕННЫХ ГЛУБИНОЙ И УЗКОСТЬЮ

<sup>1</sup>Данилов Юрий Аронович, канд. техн. наук, профессор кафедры судовождения и безопасности мореплавания

<sup>2</sup>Гаврильченко Галина Николаевна, ст. преподаватель кафедры судовождения и безопасности мореплавания

<sup>1,2</sup>Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ», Калининград, Россия, e-mail: <sup>1</sup>yreydaniilov@yandex.ru; <sup>2</sup>galina.gavrilchenko@mail.ru

*Информационные модели относительной динамической осадки показывают надежные связи практически со всеми условиями плавания. Критерий Фруда по глубине места аварии, отношение глубины места аварии к длине судна, отношение глубины места к глубине оценки маневренных характеристик судна по результатам выборки сочетаний их диапазонов и диапазонов относительной динамической осадки показывает возможность рассчитать их эмпирические связи. Эмпирические зависимости относительной динамической осадки от условий позволяют рассчитать её величину и дать оценку безопасности плавания судна.*

В информационных моделях навигационных аварий судов (столкновения и посадка на грунт) на ограниченных глубинах подтверждается влияние динамической осадки судна [1, 2]. Однако, во многих случаях  $T_{дин}/H_f$  (отношение динамической осадки к фактической глубине) оказывается на четвертом или пятом месте для всех диапазонов длины судов четырех типов (балкеры, танкеры, контейнеровозы, перевозчики генеральных грузов), но для самых больших судов в информационных моделях для судов одного типа  $T_{дин}/H_f$  выходит на первые места. Поэтому представление о связях динамической осадки судна с доступными регистрации условиями плавания судна на информационном уровне остается актуальным.

Информационная модель для критерия  $T_{дин}/H_f$  (явления) отношения динамической осадки судна к фактической глубине места аварии [2] составлена по материалам навигационных аварий столкновений судов в узкостях на ограниченных глубинах с учетом нескольких условий. Критерий

Фруда по глубине места аварии, отношение глубины места аварии к длине судна, отношение глубины места к глубине оценки маневренных характеристик судна по результатам выборки сочетаний их диапазонов и диапазонов относительной динамической осадки показывает возможность рассчитать их эмпирические связи. Мера связи коэффициенты информационной связи этих критериев с относительной динамической осадкой показаны в таблице 1.

Аналитическое представление более наглядно, чем информационное. Прямая линия, построенная по четырем точкам (количество аварий в Информационно - логическом анализе - ИЛА достаточно для четырех классов) для судов одного типа или по 16 точкам для четырех типов судов. Можно рассчитать и по всем авариям каждого типа судов.

Таблица 1

**Информационные функции связи  $T_{дин/Нф}$  и условий**

имя	Мера связи $T_{дин/Нф}$ и условий	Коэффициент связи $K_{дин/Нф}$ и условий	Погрешность двух комп системы $\Sigma \Delta H$	Ранг $K_{дин/Нф}$ и условий
балкеры				
$H_{ф}/H_{ман}$	1,481	0,741	0,002	1
$F_{ГН}$	0,401	0,200	0,002	3
$H_{ф}/L_c$	1,127	0,564	0,001	2
перевозчики генеральных грузов				
$H_{ф}/H_{ман}$	1,396	0,698	0,006	1
$F_{ГН}$	0,261	0,132	0,020	4
$H_{ф}/L_c$	0,564	0,282	0,016	2
танкеры				
$H_{ф}/H_{ман}$	1,583	0,792	0,002	1
$F_{ГН}$	0,729	0,365	0,004	2
$H_{ф}/L_c$	0,712	0,356	0,006	3
контейнеровозы				
$H_{ф}/H_{ман}$	0,953	0,476	0,011	1
$F_{ГН}$	0,381	0,191	0,014	4
$H_{ф}/L_c$	0,616	0,308	0,011	2

Эмпирические уравнения связи отношения динамической осадки к глубине места аварии по этим критериям ( $F_{ГН}$ ,  $H_{ф}/L_c$  и по  $H_{ф}/H_{ман}$ ) рассчитаны методом наименьших квадратов и показаны ниже.

Для балкеров:

$$T_{дин/Нф} = 1,27 F_{ГН} + 0,08 \quad (1)$$

$$T_{дин/Нф} = - 0,66 H_{ф}/H_{ман} + 0,99 \quad (2)$$

$$T_{дин/Нф} = - 3,30 H_{ф}/L_c + 0,92 \quad (3)$$

Для перевозчиков генеральных грузов:

$$T_{дин/Нф} = 1,48 F_{ГН} - 0,14 \quad (4)$$

$$T_{дин/Нф} = - 0,38 H_{ф}/H_{ман} + 0,81 \quad (5)$$

$$T_{дин/Нф} = - 3,71 H_{ф}/L_c + 1,07 \quad (6)$$



Для контейнеровозов:

$$T_{\text{дин}}/H_{\text{ф}} = 2,12 F_{\text{ГН}} - 0,28 \quad (7)$$

$$T_{\text{дин}}/H_{\text{ф}} = -0,34 H_{\text{ф}}/H_{\text{ман}} + 0,86 \quad (8)$$

$$T_{\text{дин}}/H_{\text{ф}} = -0,20 H_{\text{ф}}/L_{\text{с}} + 1,20 \quad (9)$$

Для танкеров:

$$T_{\text{дин}}/H_{\text{ф}} = 1,67 F_{\text{ГН}} - 0,15 \quad (10)$$

$$T_{\text{дин}}/H_{\text{ф}} = -0,81 H_{\text{ф}}/H_{\text{ман}} + 0,97 \quad (11)$$

$$T_{\text{дин}}/H_{\text{ф}} = -3,06 H_{\text{ф}}/L_{\text{с}} + 0,99 \quad (12)$$

Общее уравнение для четырех типов судов по 16 точкам:

$$T_{\text{дин}}/H_{\text{ф}} = -0,68 H_{\text{ф}}/H_{\text{ман}} + 0,97 \quad (13)$$

Критерий Фруда по глубине места аварии - это безразмерный показатель скорости судна. Отношение глубины места к длине судна – это показатель условий нестабильной скорости. На рисунках в правой половине показано уравнение  $T_{\text{дин}}/H_{\text{ф}} = f(H_{\text{ф}}/L_{\text{с}})$  и  $T_{\text{дин}}/H_{\text{ф}} = f(H_{\text{ф}}/H_{\text{ман}})$  [2]. В левой половине рисунка показано уравнение  $T_{\text{дин}}/H_{\text{ф}} = f(F_{\text{ГН}})$ . В итоге получаем описание условий, соответствующее значению динамической осадке судна:

$F_{\text{ГН}}$  – возможный характер волнообразования (поперечных волн);

$H_{\text{ф}}/L_{\text{с}}$  – условия быстрого изменения сопротивления воды;

$H_{\text{ф}}/H_{\text{ман}}$  – косвенная оценка влияния глубины места на управляемость судна.

Что дает суммирование трех эмпирических уравнений относительной динамической осадки судов одного типа (подобие формы корпуса)?

**Относительная динамическая осадка танкеров по эмпирическим связям:**

$$3T_{\text{дин}}/H_{\text{ф}} = 1,67 F_{\text{ГН}} - 0,81 H_{\text{ф}}/H_{\text{ман}} - 3,06 H_{\text{ф}}/L_{\text{с}} + 1,81 \quad (14)$$

$$T_{\text{дин}}/H_{\text{ф}} = 0,56 F_{\text{ГН}} - 0,27 H_{\text{ф}}/H_{\text{ман}} - 1,02 H_{\text{ф}}/L_{\text{с}} + 0,60 \quad (15)$$

Пример 1

Скорость 5м/с; глубина  $H_{\text{ф}} = 10$ м; осадка  $T_{\text{с}} = 4$ м;  $H_{\text{ман}} = 24$  м; длина судна  $L_{\text{с}} = 100$ м  
 $T_{\text{дин}}/H_{\text{ф}} = 0,67$  запаса глубины под килем ограничен, на относительных глубинах  $T_{\text{дин}}/H_{\text{ф}} \leq 0,67$  происходит порядка 60% столкновений на ограниченных глубинах. Динамическая осадка, соответствующая условию пониженной управляемости судна и столкновению при расхождении  $T_{\text{дин}} = 5,43$  м

Пример 2

Скорость 10м/с; глубина  $H_{\text{ф}} = 10$ м; осадка  $T_{\text{с}} = 4$ м;  $H_{\text{ман}} = 24$  м; длина судна  $L_{\text{с}} = 100$ м  
 $T_{\text{дин}}/H_{\text{ф}} = 1,00$  запаса глубины под килем нет, в лучшем случае касание грунта, потеря управляемости. Динамическая осадка, соответствующая условию пониженной управляемости и столкновению при расхождении  $T_{\text{дин}} = 10,0$  м.

**Относительная динамическая осадка балкеров по эмпирическим связям:**

$$3T_{\text{дин}}/H_{\text{ф}} = 1,27 F_{\text{ГН}} + 0,08 - 0,66 H_{\text{ф}}/H_{\text{ман}} + 0,92 - 3,06 H_{\text{ф}}/L_{\text{с}} + 0,99 \quad (16)$$

$$T_{\text{дин}}/H_{\text{ф}} = 0,42 F_{\text{ГН}} - 0,22 H_{\text{ф}}/H_{\text{ман}} - 1,02 H_{\text{ф}}/L_{\text{с}} + 0,67 \quad (17)$$

Пример 1

Скорость 5м/с; глубина  $H_{\text{ф}} = 10$ м; осадка  $T_{\text{с}} = 4$ м;  $H_{\text{ман}} = 24$  м; длина судна  $L_{\text{с}} = 100$ м,

$T_{\text{дин}}/H_{\text{ф}} = 0,67$  запас глубины под килем ограничен, на относительных глубинах  $T_{\text{дин}}/H_{\text{ф}} \leq 0,67$  происходит порядка 50% столкновений на ограниченных глубинах.

#### Пример 2

Скорость 10м/с; глубина  $H_{\text{ф}} = 10\text{м}$ ; осадка  $T_{\text{с}} = 4\text{м}$ ;  $H_{\text{ман}} = 24\text{ м}$ ; длина судна  $L_{\text{с}} = 100\text{м}$   
 $T_{\text{дин}}/H_{\text{ф}} = 0,93$  запас глубины под килем практически отсутствует, на относительных глубинах  $T_{\text{дин}}/H_{\text{ф}} \leq 0,93$  происходит порядка 90% столкновений на ограниченных глубинах.

#### Относительная динамическая осадка контейнеровозов по эмпирическим связям:

$$3T_{\text{дин}}/H_{\text{ф}} = -0,34H_{\text{ф}}/H_{\text{ман}} + 0,86 + 2,12 F_{\text{ГН}} - 0,28 - 0,20 H_{\text{ф}}/L_{\text{с}} + 1,20 \quad (18)$$

$$T_{\text{дин}}/H_{\text{ф}} = -0,11H_{\text{ф}}/H_{\text{ман}} + 0,71F_{\text{ГН}} - 0,07 H_{\text{ф}}/L_{\text{с}} + 0,59 \quad (19)$$

#### Пример 1

Скорость 5м/с; глубина  $H_{\text{ф}} = 10\text{м}$ ; осадка  $T_{\text{с}} = 4\text{м}$ ;  $H_{\text{ман}} = 24\text{ м}$ ; длина судна  $L_{\text{с}} = 100\text{м}$   
 $T_{\text{дин}}/H_{\text{ф}} = 0,89$  запас глубины под килем ограничен, управляемость понижена, на относительных глубинах  $T_{\text{дин}}/H_{\text{ф}} \leq 0,89$  происходит порядка 90% столкновений на ограниченных глубинах.

#### Пример 2

Скорость 10м/с; глубина  $H_{\text{ф}} = 10\text{м}$ ; осадка  $T_{\text{с}} = 4\text{м}$ ;  $H_{\text{ман}} = 24\text{ м}$ ; длина судна  $L_{\text{с}} = 100\text{м}$   
 $T_{\text{дин}}/H_{\text{ф}} = 1,27$  запас глубины под килем отсутствует.

#### Относительная динамическая осадка перевозчиков генеральных грузов по эмпирическим связям:

$$3T_{\text{дин}}/H_{\text{ф}} = -0,38 H_{\text{ф}}/H_{\text{ман}} + 0,81 + 1,48 F_{\text{ГН}} - 0,14 - 3,71 H_{\text{ф}}/L_{\text{с}} + 1,07 \quad (20)$$

$$T_{\text{дин}}/H_{\text{ф}} = -0,13 H_{\text{ф}}/H_{\text{ман}} + 0,49 F_{\text{ГН}} - 1,24 H_{\text{ф}}/L_{\text{с}} + 0,60 \quad (21)$$

#### Пример 1

Скорость 5м/с; глубина  $H_{\text{ф}} = 10\text{м}$ ; осадка  $T_{\text{с}} = 4\text{м}$ ;  $H_{\text{ман}} = 24\text{ м}$ ; длина судна  $L_{\text{с}} = 100\text{м}$   
 $T_{\text{дин}}/H_{\text{ф}} = 0,68$  запас глубины под килем ограничен, управляемость понижена, на относительных глубинах  $T_{\text{дин}}/H_{\text{ф}} < 0,68$  происходит порядка 60%

#### Пример 2

Скорость 10м/с; глубина  $H_{\text{ф}} = 10\text{м}$ ; осадка  $T_{\text{с}} = 4\text{м}$ ;  $H_{\text{ман}} = 47\text{ м}$ ; длина судна  $L_{\text{с}} = 100\text{м}$   
 $T_{\text{дин}}/H_{\text{ф}} = 0,83$  на относительных глубинах  $T_{\text{дин}}/H_{\text{ф}} \leq 0,83$  пониженная управляемость.

Такие расчеты полезны на стадии планирования и при исполнении плана перехода.

В суммирующих формулах свободный член увеличен на 28÷39%. Для оценки управляемости судна и оценки опасных условий столкновений судов вклад критерия Фруда по глубине места и относительной глубины по длине судна очень существенный.

Не исключено, что вклад факторов, не учтенных в данном исследовании, также может быть значительным.

По графикам зависимости относительной динамической осадки судна от отношения глубины места аварии к глубине оценки маневренных характеристик судна очевидно, что увеличение скорости увеличивает относительную осадку и уменьшает отношение  $H_{\text{ф}}/H_{\text{ман}}$ , что ведет к уменьшению запаса воды под килем и ухудшению управляемости судна. Снижение скорости увеличивает запас воды под килем и позволяет выйти на скорость эффективной работы подруливающих систем.

Актуальность проблемы подтверждает статистика аварийности на примере статистики Японии, поскольку в данном районе очень высокий уровень интенсивности движения судов, большое количество стесненных условий плавания и мелководья. На рисунке 1 показан график, составленный на основании статистических таблиц с выборкой конкретных видов аварий (столкновений, контактов и посадок на мель. Статистические данные выбраны с 2017 года по 31 июля 2022 года с

официального сайта Совета по безопасности на транспорте Японии в разделе статистика по морскому транспорту. В 2017 году произошло 200 столкновений, в 2018 – 243 столкновения, в 2019 году – 218 случаев, в 2020 году -188 случаев, в 2021 году – 199 случаев. На 31 июля 2022 года произошло 103 случая столкновений, что говорит о достаточной стабильности данного типа аварий, которые лидируют среди остальных типов. Далее лидируют случаи посадок на мель, которые также стабильны с годами, что подтверждает аварийная статистика: в 2017 году произошли 181 посадка на мель, в 2018 году – 172 случая, в 2019 году – 200 посадок на мель, в 2020 году 155 случаев, в 2021 году – 173 случая, а за семь месяцев 2022 года 76 случаев. Контакты также достаточно стабильны с годами, а они могут быть как при навалах судов, так и при касаниях грунта.

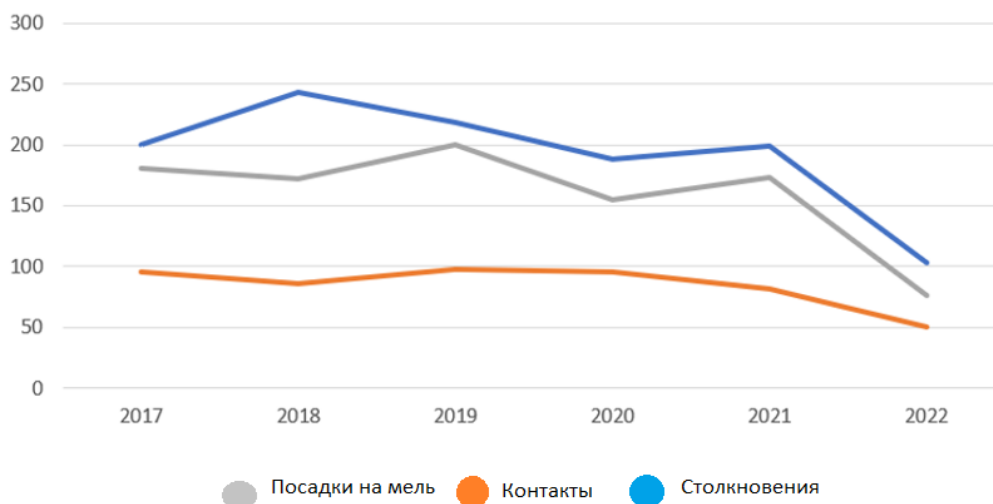


Рис. 1. Аварийность Японии по типам аварий за период с 2017 года по 31 июля 2022 года

На рисунке 2 показан график, составленный на основании таблиц статистики аварийности Японии по типам судов. Эти типы судов чаще других участвуют в авариях и такую разбивку производят в программе Marinetraffic.

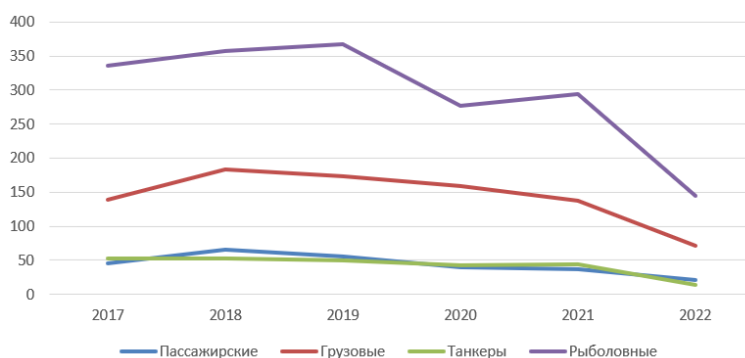


Рис. 2. Аварийность Японии по типам судов за период с 2017 года по 31 июля 2022 года

Лидерами аварий по типам судов в Японии оказались рыболовные суда, которые в огромных количествах работают в прибрежных водах. В 2017 году произошло 336 аварий с рыболовными судами, в 2018 – 358, в 2019 году – 367 случаев, в 2020 году - 277 случаев, в 2021 году – 294 случая. На 31 июля 2022 года произошло 144 случая с рыболовными судами за семь месяцев. Следующими по частоте участия в авариях являются грузовые суда, которые лидируют среди остальных типов при всем своем многообразии, что подтверждает аварийная статистика: в 2017 году произошли 139 случаев с грузовыми судами, в 2018 году – 184 случая, в 2019 году – 173, в 2020 году 159 случаев, в 2021 году – 138 случаев, а за семь месяцев 2022 года произошел 71 случай. Пассажирские суда и танкеры участвовали в авариях примерно в три раза реже, чем грузовые суда и в пять-шесть раз реже, чем рыболовные, но достаточно стабильно и в среднем по 50-60 случаев в

год. Остальные типы судов участвуют в авариях реже. Стабильность аварий требует решений или хотя бы рассмотрения основных причин и условий, в которых они произошли.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилов Ю.А. Исследование условий навигационных аварий судов в узкостях на ограниченных глубинах: монография / Ю.А Данилов. Калининград: Изд-во БГАРФ. 2020 – 180 с.
2. Данилов Ю.А, Гаврильченко Г.Н. Оценка относительной динамической осадки и стесненных условий плавания судна. Первая национальная научно-техническая конференция «Новые стратегии технологии морского судоходства и промысла» . – Калининград. БГАРФ 2022
3. Материалы с сайта [https://www.mlit.go.jp/jtsb/statistics\\_mar.html](https://www.mlit.go.jp/jtsb/statistics_mar.html).

## DYNAMIC DRAFT OF VESSELS IN CONDITIONS CONSTRAINED BY DEPTH AND NARROWNESS

<sup>1</sup>Danilov Yuriy Aronovich, Ph.D., Professor of the Department of Navigation and Safety of Navigation

<sup>2</sup>Gavrilchenko Galina Nikolaevna, Senior Lecturer of the Department of Navigation and Safety of Navigation

<sup>1,2</sup>Baltic Fishing Fleet State Academy FSBEI HE "KSTU",  
Kaliningrad, Russia, e-mail: <sup>1</sup>reydanilov@yandex.ru; <sup>2</sup>galina.gavrilchenko@mail.ru

*Information models of relative dynamic draft show quite reliable connections with almost all sailing conditions. Frud's criterion for the depth of the accident site, the ratio of the depth of the accident site to the length of the vessel, the ratio of the depth of the place to the depth of the assessment of the maneuvering characteristics of the vessel based on the results of the selection of combinations of their ranges and ranges of relative dynamic draft shows the possibility to calculate their empirical relationships. Empirical dependence of the relative dynamic draft on the conditions allows to calculate its value and give an assessment of the safety of the vessel's navigation*

УДК 623. 826

## О ГОТОВНОСТИ СУЩЕСТВУЮЩИХ СУДОВ И МЕЖДУНАРОДНОЙ НОРМАТИВНОЙ БАЗЫ ДЛЯ ПЕРЕВОЗКИ ГРУЗОВ НА БЕЗЭКИПАЖНЫХ СУДАХ

<sup>1</sup>Гуральник Борис Самуилович, канд. техн. наук, профессор кафедры

<sup>2</sup>Тимофеев Владимир Константинович, д-р воен. наук, профессор

<sup>3</sup>Сирота Александр Константинович, доцент, капитан дальнего плавания

<sup>1,2,3</sup>БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ»,

Калининград, Россия, e-mail: kaf-bm@bga.gazinter.net

*Сегодня специалисты работают над проектами морских автономных систем (MAS – Maritime autonomous systems), состоящих из безэкипажного судна, управление которым осуществляется оператором из удалённого берегового центра. В 2020–22 г. в Европе и Японии выполнены опытные перевозки грузов на безэкипажных судах. Рассматриваются вопросы подготовленности существующих сегодня судов по конструкции и соответствию требований ИМО Конвенций для применения при эксплуатации безэкипажных судов, перевозящих различные грузы.*

Сегодня во многих странах ведутся разработки морских автономных систем MAS (Maritime autonomous systems), включающих без экипажные суда USVs (Unmanned Surface Vessels) все процессы, на которых управляются операторами из удалённого берегового центра. Данные технологии являются дальнейшим развитием автоматизированных судов (Smart ships), которые позволяют упростить и убыстрить выполнение отдельных работ и операций на судне, исключить или уменьшить количество ошибок при взаимодействии системы человек-машина.

Сегодня специалисты, работающие в направлении дальнейшего развития технологий MAS теоретически и практически отрабатывают вопросы автономной навигации и предотвращения столкновений (в рамках SOLAS, Colregs), решают вопросы обеспечения уверенной связи и кибербезопасности коммуникации берег – судно, обсуждают юридические вопросы страхования судов и перевозок на без экипажных судах [1]. В некоторых странах начали практическую отработку данных технологий.

В сентябре 2020 г планировался переход без экипажного судна через Атлантический океан из английского п. Плимут в п. Плимут Массачусетс, но из-за Covid -19 рейс был перенесён на 2021 г [2]. После срыва трансатлантического перехода без экипажное судно “USV Maxlimer” 22 суток проработало в автономном режиме при обследовании с помощью эхолота 1000 квадратных километров континентального шельфа. Выйдя из п. Плимут судно прошло 280 миль. В [2] также описан первый международный рейс данного автономного судна “USV Maxlimer” с грузом (5 кг), совершенный в южной части Северного моря между портами West Mersea и Ostend. Переход составил около 82 миль.

В Японии в 2022 г проводился семичасовой эксперимент по управлению автомобильным паромом, шедшим со скоростью до 26 узлов и автоматическим причаливанием и отплытием в каждом порту. В другом эксперименте контейнеровоз «Suzaku» длиной 95 м совершил переход в автономном режиме по Токийскому заливу и вернулся в порт отправления. Через Токийский залив ежедневно проходит около 500 судов, т.е это район с интенсивным судоходством.

Не умаляя необходимость и важность данных работ необходимо отметить, что наравне с отработкой вопросов автономной навигации необходимо сделать оценки обеспечения стандартов безопасности при перевозке грузов разных видов в автономном режиме и вообще приспособленность существующих сегодня судов к работе без экипажей на борту.

Позиция ИМО относительно эксплуатации без экипажных судов состоит в том, что данные суда в системе MASS должны полностью, без каких либо исключений, удовлетворять действующим стандартам безопасности конвенционных судов. Это означает, что без экипажные суда должны в полном объёме соответствовать требованиям следующих Конвенций ИМО:

- Convention for the safety of Life at Sea (SOLAS);
- Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers (STCW);
- Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Fishing Vessel Personnel (STCW F);
- Convention for the Save Containers (CSC);
- Convention on Load line (LL);
- Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea (Colreg);
- International Convention on the Maritime Search and Rescue (SAR);
- Convention on Tonnage Measurement of Ships (Tonnage).

Перечисленные Конвенции рассматриваются в документах ИМО, как инструменты, а способы их практической реализации, как технологии. Если на без экипажных судах какие либо положения перечисленных Конвенций не выполняются, то соответствующие разделы Конвенций (инструменты) должны корректироваться, либо разрабатываться другие документы и в зависимости от возможности их реализации корректироваться или разрабатываться новые технологии.

Связь инструментов с технологиями можно проиллюстрировать следующим примером. До 60-х годов прошлого века строились суда с люковыми закрытиями, имеющими следующую конструкцию. В просвете люка на комингсы укладывались дубовые лючины-полубимсы, поверх которых выстилался брезент со свесами по продольным и поперечным комингсам. Далее свесы брезента прижимались к комингсам металлическими полосами, которые по месту фиксировались забитыми деревянными клиньями.

Работа с такими закрытиями выполнялась несколькими членами экипажа и требовала много времени.

Поэтому были разработаны новые технологии, несколько вариантов люковых закрытий конструкции Мак Грегора. Данные конструкции успешно используются сегодня на конвенционных судах. Однако, на люковых крышках Мак Грегора каждую вахту должны подтягиваться Quick Acting Cleats, чтобы исключить подмочку перевозимого груза. Пренебрежение или не качественное выполнение данных работ приводит к порче груза или его части, как показано на рис. 1.

Чтобы исключить такого рода претензии на без экипажных судах потребуются новые технологии – автоматически подтягивающиеся люковые крышки или другие конструкции, обеспечивающие их водонепроницаемость, а также будет необходимо внести поправки в инструментарии, учитывающие данные изменения.

Основные требования к конструкции судов, обеспечивающие безопасную перевозку грузов сформулированы в Конвенции «SOLAS».



*Рис. 1 Шрот, подмокший из-за текущих люковых крышек*

Главы с I по IV Конвенции «SOLAS» определяют технические требования к отдельным частям судов, удовлетворение которых проверяют инспектора флага судна при ежегодных, промежуточных и очередных освидетельствованиях судов. По результатам инспекций выдаются «Квалификационное свидетельство», «Свидетельство о безопасности грузового судна по конструкции», «Свидетельство о безопасности грузового судна по оборудованию и снабжению», «Свидетельство о безопасности грузового судна по радиооборудованию», «Международное свидетельство о грузовой марке или Международное свидетельство об изъятии для грузовой марки», «Международное свидетельство о предотвращении загрязнения нефтью с дополнением А или В в соответствии с Международной конвенцией по предотвращению загрязнения с судов 1973 г», «Международное свидетельство о предотвращении загрязнения сточными водами в соответствии с Международной конвенцией по предотвращению загрязнения с судов 1973 г», «Международное свидетельство о предотвращении загрязнения мусором в соответствии с Международной конвенцией по предотвращению загрязнения с судов 1973 г», а также Международные свидетельства, распространяемые на пассажирские и другие специализированные суда, учитывающие особенности их эксплуатации. ....

Главы VI и IX Конвенции «SOLAS» регламентируют вопросы эксплуатации судов. В главе V излагаются требования, определяющие безопасность мореплавания.

Однако уже начиная с части С главы II-2 «Меры пожарной безопасности на грузовых судах» и тоже на танкерах появляются вопросы как эти требования можно удовлетворить в условиях от-

сутствия экипажа на судах, работающих в автономном режиме. Эта часть главы II-2 потребует корректировки, учитывающей особенности работы без экипажных судов.

Также можно спорить о необходимости выполнения в полном объёме требований главы III, касающихся спасательных средств и устройств на без экипажных судах и главы IV, в которой рассматриваются вопросы радиосвязи. Полностью отказаться от спасательных средств на без экипажных судах нельзя, т.к в условия эксплуатации на судне могут находиться лоцман или представители сервисных служб, выполняющих какие либо неотложные регламентные или ремонтные работы и для которых спасательные средства могут понадобиться. В тоже время необходимо, чтобы эти спасательные средства могли оперироваться ограниченным минимальным количеством людей. Данные обстоятельства должны быть учтены при корректировке этих глав.

Ограничимся при дальнейшем рассмотрении, из выше перечисленных конвенций, документами, регламентирующими и регулируемыми перевозки грузов и части опасных грузов в упаковке. Также будем рассматривать только суда с уровнем автономности, при котором на борту отсутствуют члены экипажа, т.е суда работающие в автоматическом режиме или управляемые оператором в системе MASS, т.е уровни (Degree) 4 и 3 по классификации ИМО.

В главе VI Конвенции «SOLAS» регламентируются перевозки грузов, а в главе VII перевозки опасных грузов.

Эти вопросы имеют первостепенное значение для без экипажных судов, т.к количество инцидентов на конвенционных судах в год, в том числе серьёзных, связанных с перевозимым грузом почти на порядок превышает количество столкновений, посадок на мель и разливов нефти и нефтепродуктов. И это в условиях, когда сервисные, регламентные работы и наблюдение за техническим состоянием по разным частям судна и за грузом постоянно выполняются экипажем судна.

Требования главы VI развёрнуты в разработанных под эгидой ИМО:

- Кодексе безопасной практики размещения и крепления груза, CSS Code (Code of Safe Practice for Cargo Stowage and Securing);
- Кодексе безопасной практики перевозки палубных лесных грузов, (Code of Safe Practice Carrying Timber Deck Cargoes);
- Кодексе безопасной практики перевозки навалочных грузов, IMSBC Code (International Marine Solid Bulk Cargo Code);
- Международном кодексе по безопасной перевозке зерна насыпью (Code for the Safe Carriage of Grain in Bulk).

Вопросы обращения с грузами также рассматриваются в Конвенциях STCW и STCW-F, для рыболовных судов, затрагиваются в Конвенции LL-66, Кодексе ОНС-2008.

По нашему мнению данный инструментарий необходимо дополнить правилами перевозки конкретных грузов, разработанных государствами флага судна, т.к «Судовое наставление по укладке и креплению грузов», разрабатывается с учётом этих правил.

Таким образом, структуру инструментария обеспечения безопасной перевозки грузов можно представить, как показано на рис. 2.

Тем не менее, данные документы тоже потребуют корректировки. Например, подготовка грузовых помещений к приёму груза (зачистка, мойка, сушка, вентилирование, подготовка сепарации) на конвенционных судах выполняется силами экипажа.

В принципе, на без экипажном судне зачистка трюмов может быть выполнена, по специальному договору, докерами порта выгрузки предыдущего груза, а мойка, сушка и вентилирование в автоматическом режиме на переходе в порт погрузки. Это должно быть учтено путём внесения изменений в CSS Code, а также в STCW или STCW-F.

Сегодня работы по размещению, укладке и креплению грузов, как правило, выполняются портом, но контролируются судовой администрацией, часто крепление груза выполняется, где это разрешено законами порта, силами экипажа.

Кодекс безопасной практики размещения и крепления грузов (CSS Code) требует, чтобы после завершения крепления груза, представитель компетентной организации проверил работы и написал «Сертификат (Документ) об укладке и креплении груза».

В России функции компетентной организации делегированы Минтрансом ЦНИИМФ, Дальневосточному филиалу ЦНИИМФ и Морскому грузовому бюро (г Санкт-Петербург). Данные ор-



ганизации назначили своих представителей в портах России, которые готовят данные Сертификаты. За границей функции компетентной организации, и которые выпускают данные Сертификаты, выполняют независимые сюрвейерские компании.

Выпуская сертификат, представитель компетентной организации должен убедиться, что укладка и крепление груза выполнена в соответствии с требованиями «Кодекса безопасной практики размещения и крепления груза» и «Судового наставления по укладке и креплению грузов».



Рис. 2. Инструментарий обеспечения безопасной перевозки грузов

Судовое наставление» разрабатывается на основе «Кодекса безопасной практики размещения и крепления груза» и национальных «Правил» перевозки конкретного груза.

В случае без экипажного судна логично переложить на компетентную организацию и судовой контроль за укладкой и креплением грузов, возложив на неё и материальную и юридическую ответственность в случае не качественного выполнения этих работ. Добавления, корректировки такого рода могут быть сделаны в Кодексе CSS и STCW или STCW-F.

Здесь необходимо отметить ещё одно важное обстоятельство. Отечественные и иностранные «Правила» перевозки некоторых грузов могут отличаться. Например, при укладке и креплении труб большого диаметра, за границей руководствуются «Правилами», разработанными капитаном А.Sparks и признанными большинством перевозчиков грузов и P&I Clubs. Схема заведения найтовов по отечественным «Правилам», отличается от крепления труб, рекомендованного А.Sparks. Данное разночтение может быть одной из причин инцидентов, связанных с потерей груза и должно быть устранено при эксплуатации, как конвенционных, так и без экипажных судов.

На рис. 3 показаны повреждённые трубы большого диаметра для строительства подводного трубопровода, после обрыва найтовов и разрушения штабеля труб, перевозимых на люковых крышках судна.





*Рис. 3 Повреждённые трубы большого диаметра*

На заводе в Европе на судно были погружены и закреплены найтовыми трубами большого диаметра. На подходе к порту выгрузки, в штормовую погоду, порвались найтовы крепления труб на первой люковой крышке и одиннадцать труб из семнадцати ушли за борт. Шесть оставшихся труб при перекачивании получили такие повреждения полиэтиленового защитного покрытия и металла труб, что их использовать при укладке трубопровода было нельзя.

При разборе аварии выяснилось, что брусья и доски, из которых была набрана сепарация под трубы, не были сбиты гвоздями, а клинья были просто подложены под трубы, как показано на рис. 4 и 5, и не прибиты к сепарации, как это требует судовое наставление.

Четыре найтова крепления труб штабеля на каждой люковой крышке были заведены в обхват и обтянуты с помощью талрепов. Также при изготовлении огонов была неправильно поставлена часть тросовых зажимов (См. рис.6).

В результате во время шторма клинья были выдавлены или выбиты волнами, и трубы в штабеле получили подвижность, в результате чего начали рваться найтовы крепления.

Как видно, потеря труб в данном инциденте, вызваны несколькими причинами, и данный пример показывает на необходимость соблюдения всех требований правил, надлежащего изготовления сепарации и установки клиньев, изготовления и заведения найтовок.

Как исключить подобные ситуации на без экипажном судне?

В первую очередь необходимо привести в соответствие принятую международную практику укладки и крепления труб большого диаметра и требования отечественных Правил и судового наставления по укладке и креплению данного груза, а также внести корректировки в Кодекс CSS и STCW.

Погрузка большинства грузов требует постоянного наблюдения и контроля со стороны администрации судна.



*Рис. 4 Дефекты сепарации под трубы большого диаметра*



*Рис. 5 Клинья, не прибитые к сепарации*

Сегодня отсутствие на металлопродукции коррозионных и механических повреждений контролируется грузовым помощником капитана или назначенным сюрвейером, но решение о внесении ремарок в коносамент принимает капитан судна после консультаций с судовладельцем.

В случае без экипажного судна назначенный сюрвейер может выполнить Preloading survey, т.е. предпогрузочную инспекцию на складе заранее до подхода судна или инспекцию погрузки (Preshipment survey), но с кем будет согласовываться решение о внесении ремарок в коносамент ?



*Рис. 6. Не правильно установленные тросовые зажимы при изготовлении огонов*

Вероятно, это решение будет принимать оператор из удалённого берегового центра. Практика привлечения независимых сюрвейерских компаний для выполнения предпогрузочных инспекций сегодня достаточно распространена в портах мира и поэтому данный момент не потребует каких либо изменений в Кодексе CSS.

Погрузка леса тоже требует постоянного наблюдения и контроля со стороны администрации судна, т.к его плотность практически всегда не известна и может значительно отличаться по влажности даже внутри одной судовой партии, что может привести к не правильной загрузке судна. Для учёта этого обстоятельства грузовой помощник во время погрузки два три раза выполняет драфт-сюрвей для уточнения плотности груза. В принципе данные дополнительные работы по контролю за погрузкой судна могут быть поручены сюрвейеру, назначенному для определения количества погруженного на судно леса.

После погрузки также должно быть выполнено крепление палубного каравана либо экипажем судна, либо портом под контролем со стороны администрации судна. В случае без экипажного судна наблюдение также может выполнить сюрвейер компетентной организации, оформляющий документ или сертификат об укладке и креплению груза. Добавления, корректировки об этом должны быть сделаны в Кодексе CDT и STCW.

Кроме того, правила хорошей морской практики требуют, чтобы во время рейса крепление груза регулярно проверялось и найтовы подтягивались. Сегодня эти работы выполняются экипажами судов.

Существующие сегодня средства крепления и сложившаяся практика выполнения этих работ требует присутствие человека и пока не может быть автоматизирована. В тоже время, невыполнение данных работ скажется на качестве перевозки. Здесь, по всей видимости, потребуется создание новых технологий решающих данную проблему.

В главе VII Конвенции «SOLAS» приводятся требования к конструкции судов, перевозящих опасные грузы, и регламентируются условия перевозки опасных грузов.

В части В данной главы приведены требования к конструкции и оборудованию судов, перевозящих опасные химические грузы наливом, а в части С требования к конструкции и оборудованию судов, перевозящих сжиженные газы наливом.

Часть А данной главы регламентирует перевозки опасных грузов в упаковке и навалом. Основа данной главы требования Правил МОПОГ (IMDG Code) и соответствующих разделов IMSBC Code.

При погрузке опасных грузов судовой персонал следит, чтобы они укладывались и при необходимости разделялись в соответствии с требованиями IMDG Code. Повреждённые упаковки не должны грузиться и должны возвращаться на берег для контроля и переупаковки.

Представляется, что учитывая многообразие опасных грузов, среди которых есть высоко опасные грузы, путаницу и использование разных названий для одного груза, перевозка высоко опасных грузов на без экипажных судах будет запрещена.

Перевозки не высоко опасных грузов и перевозки грузов, обладающих опасными свойствами, по особо согласованному перечню, в соответствии с IMSBC Code могут выполняться на без экипажных судах. Однако, данный перечень грузов должен быть указан в IMDG Code и IMSBC Code.

В [3] описаны некоторые технологические операции, связанные с перевозимым грузом, требующие применение ручного труда. При перевозках этих грузов на без экипажных судах, потребуется разработка новых технологий, выполняемых в автоматическом режиме.

Проведённый анализ показал, что существующие сегодня суда по конструкции и многие технологические процессы на них не в полной мере соответствуют требованиям для работы в автономном режиме.

Развитие морских автономных систем MAS (Maritime autonomous systems), включающих без экипажные суда USVs (Unmanned Surface Vessels), потребует корректировки основных международных Конвенций, начиная с «SOLAS» и других перечисленных в докладе Конвенций, уточняющих и развивающих «SOLAS».

Формулировки корректировок для разных грузов, вероятно, будут отличаться. При работе с некоторыми грузами перечисленные Конвенции потребуют принципиальных корректировок.

Эксплуатация без экипажных судов потребует развития и создания новых технологий, учитывающих особенности обработки различных грузов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sir Alan Massey. Developing regulation for maritime autonomous systems. The International Journal of The Nautical Institute “SEAWAYS”. November 2019, p. 6-7.
2. Shipping Autonomy in South West England. The International Journal of The Nautical Institute “SEAWAYS”. October 2020, p. 32-33.
3. Гуральник Б.С, Тимофеев В.К, Сирота А.К. Некоторые проблемы эксплуатации без экипажных судов, связанные с перевозкой грузов/ Б.С.Гуральник, В.К.Тимофеев, А.К.Сирота – Текст

электронный//Балтийский морской форум: научное издание: материалы Международного Балтийского морского форума: в 6 т./Правительство Калининградской области [ и др.].-Калининград: Издательство БГАРФ, 2021.- 9 Международный Балтийский морской форум, Т.2: Морская техника и технологии. Безопасность морской индустрии: 9 Международная научная конференция, Секция: Навигационная безопасность мореплавания и ведения промысла.-С.20-25.

## **READINESS OF EXISTING VESSELS AND THE INTERNATIONAL REGULATORY FRAMEWORK FOR CARRIAGE OF CARGOES BY UNMANNED SHIPS.**

<sup>1</sup>Guralnik Boris Samuilovich, Ph.D., Professor of the department

<sup>2</sup>Timofeev Vladimir Konstantinovich, Doctor of military sciences, Professor

<sup>3</sup>Sirota Alexander Konstantinovich, associate professor, master mariner

<sup>1,2,3</sup>BFFSA FSBEI Kaliningrad State Technical University,  
Kaliningrad, Russia, e mail: kaf-bm@bga.gazinter.net

*Nowadays specialists are working on projects of maritime autonomous systems (MAS – Maritime autonomous systems) including unmanned vessels that are controlled by an operator from a remote center ashore. In 2020-22, experimental cargo transportation was carried out in Europe and Japan by unmanned ships. This report discusses the readiness of today's ships in terms of design and compliance with the requirements of the IMO Conventions for use in operation of unmanned vessels carrying various cargoes.*

УДК 656.61.052

## **КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА НЕОДНОРОДНОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ В ПРЕДЕЛАХ ОБЪЁМА, ЗАНИМАЕМОГО МОРСКИМ СУДНОМ, В КОНТЕКСТЕ ПОЛОЖЕНИЙ ТЕОРИИ ДЕВИАЦИИ МАГНИТНОГО КОМПАСА**

<sup>1</sup>Ермаков Сергей Владимирович, канд. техн. наук, директор Морского института

<sup>2</sup>Морозова Светлана Юрьевна, ст. преподаватель кафедры судовождения и безопасности мореплавания

<sup>1,2</sup>Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ», Калининград, Россия, e-mail: <sup>1</sup>sv.ermakov@bgarf.ru; <sup>2</sup>nach\_uo@bgarf.ru

*В работе с использованием калькулятора магнитного поля Земли, построенного на математической модели магнитного поля WMM, проведена количественная оценка варибельности магнитной индукции (полного вектора, а также его горизонтальной и вертикальной составляющих) в объёме, занимаемом морским судном. Показано, что общепринятое в теории девиации магнитного компаса допущение об однородности магнитного поля Земли в указанном объёме справедливо.*

### **Введение**

«Занятие исследованием девиаций магнитных компасов весьма познавательно. Как сказал Парацельс: «Магнит – монарх всяческих тайн» [1]. Принимая эту цитату вместо эпитафии, уже в

качестве оптимальной преамбулы для работы, результаты которой представлены в настоящей статье, можно использовать другую цитату – из книги классика магнитно-компасного дела Николая Юльевича Рыбалтовского: «Магнитное поле Земли является неоднородным, но для разрешения различных вопросов теории девиации можно считать его однородным в пределах объёма, значительно превышающие размеры судна» [2].

Известно, что первичная задача исследования девиации магнитного компаса заключается в том, чтобы найти выражение магнитного поля в месте расположения компаса, связав его с судовыми железными массами и внешними намагничивающими судно силами. Однако для этого нужно знать характер намагничивания судна, т.е. закон, по которому распределяется вектор намагниченности внутри стального корпуса судна, машин и механизмов [3].

Судно со всем его оборудованием является телом весьма сложной формы и находится в неоднородном магнитном поле Земли, поэтому сложно рассчитывать на то, что оно намагничивается однородно. Формально неоднородность намагничивания «ломает» в принципе всю теорию девиации, базирующуюся на теореме Пуассона об однородном намагничивании тел, но в магнитно-компасном деле практически изначально было принята соответствующее допущение, которое лингвистически формализуется либо так, как это сделано Н.Ю. Рыбалтовским, либо строго в отношении объёма, занимаемого судном.

В общем, чтобы считать намагничивание однородным, необходимо, чтобы выполнялись следующие условия [4]:

- материал тела должен быть однородным в магнитном отношении;
- внешнее намагничивающее поле должно быть однородным;
- поверхность тела – поверхность второго порядка.

В случае судна эти условия можно записать следующим образом [5]:

- магнитное поле Земли в объёме, занимаемом судном, является однородным;
- части набора судна являются линейными брусками;
- судно находится в прямом положении.

Цель же настоящей работы – отнюдь не поставить под сомнение допущение об однородности намагничивания судна, а дать некоторую простую количественную иллюстрацию справедливости этого допущения или, точнее, обоснованности принятия за существующее одного из его условий, касающегося однородности магнитного поля Земли.

### **Метаматематические модели магнитного поля Земли. Калькулятор магнитного поля**

В настоящее время наиболее распространены и используются следующие четыре модели магнитного поля Земли:

- глобальная модель геомагнитного поля BGGM (The BGS Global Geomagnetic Model), которая разработана Британским геологоразведочным обществом (The British Geological Survey, BGS);

- всемирная модель геомагнитного поля Земли WMM (World Magnetic Model), разработанная Национальным агентством США по обработке пространственных геоданных (The U.S. National Geospatial-Intelligence Agency, NGA), Национальным центром геофизических данных США (The U.S. National Geophysical Data Center, NGDC) и Британским геологоразведочным обществом;

- международное геомагнитное аналитическое поле IGRF (International Geomagnetic Reference Field), разработанная Международной ассоциацией геомагнетизма и аэронавтики (The International Association of Geomagnetism and Aeronomy, IAGA);

- расширенная магнитная модель EMM (Enhanced Magnetic Model), разработанная Национальным центром информации об окружающей среде США (National Centers for Environmental Information, NCEI).

Перечисленные математические модели построены на одном и том же принципе, в соответствии с которым вектор индукции магнитного поля Земли определяется через градиент некоторого скалярного потенциала, заданного в геоцентрических координатах, где орты направлены в сторону увеличения широты, долготы и к центру Земли. В свою очередь потенциал определяется разложением по сферическим гармоникам, включающим в себя среди прочего так называемые коэффициенты

Гаусса. Коэффициенты Гаусса определяются по данным наземных и космических измерений. Совокупность этих коэффициентов полностью описывают модель магнитного поля Земли.

Современные модели ограничиваются округлением до 0,1 нТл. Модель не учитывает локальные магнитные аномалии.

Калькулятором магнитного поля Земли, основанном на математических моделях, пользуются многие организации, занимающиеся геомагнитными исследованиями, в частности, Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН).

На рисунке 1 представлен предназначенный для ввода исходных данных интерфейс калькулятора магнитного поля Земли, размещённого на сайте Национального управления океанических и атмосферных исследований США (National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA).

Для того чтобы отобразить этот интерфейс, необходимо на странице калькулятора перейти на вкладку «Magnetic Field». Далее следует ввести исходные данные. Широта и долгота вводятся либо с десятичными долями градусов (через точку), либо в формате «градусы минуты секунды» (с разделением посредством пробелов). Наименование широты и долготы вводится справа от текстового поля.

Описываемый калькулятор поддерживает три модели магнитного поля Земли – WMM, IGRF и EMM, при этом всегда используются актуальные версии модели.

При запуске калькулятора по умолчанию устанавливается модель WMM (она и была использована для расчётов, выполненных в рамках настоящей работы) и текущая дата.

Результат может быть выведен в одном из четырех форматах: HTML, XML, CSV и JSON (по умолчанию установлено HTML). Пример отображения результата представлен на рисунке 2.

**Calculate Magnetic Field**

Latitude:   S  N

Longitude:   W  E

Elevation:  GPS  Mean sea level

Model:  WMM (2019-2024)  IGRF (1590-2024)

EMM (2000-2019)

Start Date: Year  Month  Day

End Date: Year  Month  Day

Step size:

Result format:  HTML  XML  CSV  JSON

Рис. 1. Интерфейс исходных данных калькулятора магнитного поля Земли

Magnetic Field							
Model Used:	WMM-2020						
Latitude:	0° N						
Longitude:	40° W						
Elevation:	0.0 km Mean Sea Level						
Date	Declination ( + E   - W )	Inclination ( + D   - U )	H	North Comp ( + N   - S )	East Comp ( + E   - W )	Z	T
2022-09-11	-19.7112°	-12.3012°	26,463.4 nT	24,912.8 nT	-8,925.6 nT	-5,770.5 nT	27,085.3 nT
Change/year	0.0840°/yr	-0.4666°/yr	-38.2 nT/yr	-22.9 nT/yr	49.4 nT/yr	-217.4 nT/yr	9.0 nT/yr
Uncertainty	0.34°	0.21°	128 nT	131 nT	94 nT	157 nT	145 nT

Рис. 2. Результаты работы калькулятора магнитного поля Земли

В столбцах на рисунке 2 представлены значения, годовые изменения и погрешности характеристик магнитного поля Земли (выделены же наименования столбцов и значения горизонтальной H, вертикальной Z составляющих индукции и полное T значение индукции). При этом необходимо заметить несвойственное русскому языку изображение чисел, где запятая разделяет тысячи сотни, а точка – единицы и десятые. Кроме того, единица измерения индукции (наноТесла) обозначается как nT, а не как нТл.

Таким образом, калькулятор магнитного поля Земли является удобным способом определения его характеристик.

### Методика и результаты проведения количественной оценки вариабельности характеристик магнитного поля Земли

Оценка вариабельности характеристик магнитного поля Земли проводилась для восьми географических широт (от 0° до 70°N с дискретностью 10°) и одной долготы 40°W. В целях исследования было условлено, что судно направлено по истинному курсу N, а корма располагалась точно на параллели, широта которой кратна десяти. Таким образом, место расположение кормы было можно считать опорной точкой, и в первую очередь именно для этой точки при помощи калькулятора магнитного поля определялись значения H, Z и T. После чего расчётная точка поочередно перемещалась на расстояние 100, 200, 300 и 400 м от кормы и после предварительного вычисления широты точек для каждой из них были получены значения характеристик магнитного поля. В итоге, все полученные значения были занесены в таблицу 1, далее в которой проведены вычисления изменений H, Z и T в расчётных точках по отношению к опорной (в абсолютном выражении и в ppm).

Таблица 1

### Результаты расчётов вариабельности характеристик магнитного поля Земли

φ, °	Параметр	Отстояние точки от кормы судна, м					
		0	100	200	300	400	
0	H	nTл	26463,4	26463,8	26464,2	26464,6	26465,0
		Δ	0	0,4	0,8	1,2	1,6
		ppm	0	15,12	30,23	45,35	60,46
	Z	nTл	-5770,5	-5769,8	-5769,0	-5768,2	-5767,4
		Δ	0	0,7	1,5	2,3	3,1
		ppm	0	121,31	259,94	398,58	537,22
	T	nTл	27085,3	27085,5	27085,7	27085,9	27086,1
		Δ	0	0,2	0,4	0,6	0,8
		ppm	0	7,38	14,77	22,15	29,54



φ, °	Параметр		Отстояние точки от кормы судна, м				
			0	100	200	300	400
10	Н	нТл	29711,9	29712,1	29712,3	29712,5	29712,7
		Δ	0	0,2	0,4	0,6	0,8
		ppm	0	6,73	13,46	20,19	26,93
	Z	нТл	4303,7	4304,7	4305,7	4306,7	4307,8
		Δ	0	1,0	2,0	3,0	4,1
		ppm	0	232,36	464,72	697,07	952,67
	Т	нТл	30022,0	30022,3	30022,7	30023,0	30023,3
		Δ	0	0,3	0,7	1,0	1,3
		ppm	0	9,99	23,32	33,31	43,30
20	Н	нТл	30351,5	30351,4	30351,4	30351,3	30351,3
		Δ	0	0,1	0,1	0,2	0,2
		ppm	0	3,29	3,29	6,59	6,59
	Z	нТл	16121,1	16122,2	16123,3	16124,3	16125,4
		Δ	0	1,1	2,2	3,2	4,3
		ppm	0	68,23	136,47	198,50	266,73
	Т	нТл	34367,2	34367,6	34368,1	34368,5	34369
		Δ	0	0,4	0,9	1,3	1,8
		ppm	0	11,64	26,19	37,83	52,38
30	Н	нТл	28508,7	28508,5	28508,2	28508,0	28507,7
		Δ	0	0,2	0,5	0,7	1,0
		ppm	0	7,02	17,54	24,55	35,08
	Z	нТл	27725,0	27726,0	27727,0	27728,0	27729,0
		Δ	0	1,0	2,0	3,0	4,0
		ppm	0	36,07	72,14	108,21	144,27
	Т	нТл	39767,2	39767,7	39768,2	39768,7	39769,2
		Δ	0	0,5	1,0	1,5	2,0
		ppm	0	12,57	25,15	37,72	50,29
40	Н	нТл	24833,1	24832,7	24832,3	24831,9	24831,5
		Δ	0	0,4	0,8	1,2	1,6
		ppm	0	16,11	32,22	48,32	64,43
	Z	нТл	37856,2	37857,0	37857,9	37858,7	37859,5
		Δ	0	0,8	1,7	2,5	3,3
		ppm	0	21,13	44,91	66,04	87,17
	Т	нТл	45274,4	45274,9	45275,4	45275,8	45276,3
		Δ	0	0,5	1,0	1,4	1,9
		ppm	0	11,04	22,09	30,92	41,97
50	Н	нТл	19947,6	19947,1	19946,6	19946,1	19945,7
		Δ	0	0,5	1,0	1,5	1,9
		ppm	0	25,07	50,13	75,20	95,25
	Z	нТл	45797,1	45797,1	45798,3	45798,9	45799,5
		Δ	0	0,0	1,2	1,8	2,4
		ppm	0	0,00	26,20	39,30	52,41
	Т	нТл	49952,7	49953,1	49953,5	49953,2	49954,2
		Δ	0	0,4	0,8	0,5	1,5
		ppm	0	8,01	16,02	10,01	30,03



φ, °	Параметр		Отстояние точки от кормы судна, м				
			0	100	200	300	400
60	Н	нТл	14531,6	14531,1	14530,6	14530,1	14529,6
		Δ	0	0,5	1,0	1,5	2,0
		ppm	0	34,41	68,82	103,22	137,63
	Z	нТл	51095,8	51096,2	51096,5	51096,9	51097,2
		Δ	0	0,4	0,7	1,1	1,4
		ppm	0	7,83	13,70	21,53	27,40
	Т	нТл	53122,0	53122,2	53122,4	53122,6	53122,8
		Δ	0	0,2	0,4	0,6	0,8
		ppm	0	3,76	7,53	11,29	15,06
70	Н	нТл	9494,7	9494,3	9493,8	9493,4	9493,0
		Δ	0	0,4	0,9	1,3	1,7
		ppm	0	42,13	94,79	136,92	179,05
	Z	нТл	53825,2	53825,4	53825,5	53825,7	53825,8
		Δ	0	0,2	0,3	0,5	0,6
		ppm	0	3,72	5,57	9,29	11,15
	Т	нТл	54656,2	54656,3	54656,4	54656,5	54656,6
		Δ	0	0,1	0,2	0,3	0,4
		ppm	0	1,83	3,66	5,49	7,32

#### Анализ результатов количественной оценки вариабельности характеристик магнитного поля Земли

Обобщая представленный в табл. 1 результаты расчётов, можно сделать выводы, что максимальная изменчивость составляет:

- для горизонтальной составляющей индукции 2,0 нТл в абсолютном выражении (широта 60°) и 179 ppm (0,0179%) в относительном (широта 70°);
- для вертикальной составляющей индукции 4,3 нТл в абсолютном выражении (широта 20°) и 953 ppm (0,0953%) в относительном (широта 10°);
- для полного вектора индукции 2,0 нТл в абсолютном выражении (широта 30°) и 53 ppm (0,0053%) в относительном (широта 20°).

Очевидно, что максимальная изменчивость для горизонтальной составляющей приходится на высокие широты, для вертикальной – на широты ближе к экватору, для полного вектора – на средние широты. Кроме того, функция изменчивости рассматриваемых характеристик по длине судна имеет линейный характер.

Оптимальным результатом настоящей работы следовало бы считать вывод о том, какие погрешности вызывает неоднородность магнитного поля Земли при оценке существующими способами намагниченности судового железа и определения девиации. Иными словами, при одинаковых условиях необходимо было определить девиацию как традиционным способом (т.е. рассматривая магнитное поле постоянным), так и с учётом неоднородности магнитного поля и сложной конфигурации судового железа. Однако реализуемой в условия судна методик оценки намагниченности и определения девиации, учитывающей указанные условия неоднородности, не существует. Использование же в этих целях теоремы Пуассона некорректно, так как эта теорема, как было сказано ранее, может быть применена исключительно для случая однородного намагничивания. Таким образом, анализируя результаты количественной оценки вариабельности характеристик магнитного поля Земли, можно сделать только интуитивный вывод, о том, что неоднородность магнитного поля в пределах объёма, занимаемого морским судном, не значима, и поддержать этот вывод следующими двумя тезисами:

- в относительном выражении (в процентах) изменчивость характеристик магнитного поля Земли в худшем случае определяется вторым или третьим знаком после запятой;
- изменчивость характеристик магнитного поля Земли близка к чувствительности приборов для их измерения; так у магнитометра EM2 [6] чувствительность составляет 1 нТл.

### Заключение

Известно, что научная задача представляет пару, включающую предмет исследования и цель исследования, при этом подразумевается, что, по крайней мере, один метод решения задачи (достижения научной цели исследования) известен (опубликован). Решение же научной задачи образуется конкретизацией метода решения [7]. Научная задача, решению которой посвящена настоящая работа, несмотря на свою кажущуюся простоту, отнюдь не является тривиальной. Более того, простой является не сама научная задача как таковая, а метод её решения, основанный на использовании математических моделей магнитного поля Земли и калькулятора магнитного поля, в основе которого лежат эти математические модели. Таким образом, в представленной работе доступными и простыми средствами была обоснована справедливость гипотезы об однородности магнитного поля Земли в объёме, занимаемом морским судном.

Вместе с тем, следует заметить, что результаты решения по некоторым причинам имеют несколько частный характер. Во-первых, все вычисления на калькуляторе проводились для уровня моря и без отклонения от плоскости истинного меридиана, т.е. по сути все точки измерений располагались на линии пересечения плоскости действующей ватерлинии и диаметральной плоскости судна. В связи с этим корректным упоминать в названии и тексте работы объём, занимаемым судном, можно только в том случае, если считать, что в ней обоснован метод количественной оценки, а результаты расчётов являются только некоторой частью результатов решения более широкой задачи.

Во-вторых, в соответствии с начальными условиями судно располагалось истинным курсом N. Для полноты и большей чистоты эксперимента желательно, чтобы расчёты были выполнены для некоторого набора курсов судна, причём не истинных, а магнитных.

В любом случае частный характер результатов настоящей работы являются хорошим поводом продолжить её в рамках дипломного проектирования курсантами и студентами специальности 26.05.05 «Судовождение»

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев Н. Нельзя допустить, чтобы магнитный компас стал изгоем на морском флоте / Григорьев Н., Сигида Н., Степанов В. // Морской флот. – 2020. №2 // Электрон. дан. Режим доступа URL: <http://www.morvesti.ru/themes/1696/88589/> (дата обращения 17.09.2022).
2. Рыбалтовский Н.Ю. Магнитно-компасное дело / Н.Ю. Рыбалтовский. – Л.: Государственное издательство водного транспорта. Ленинградское отделение, 1954. – 492 с.
3. Кожухов В.П. Девиация магнитного компаса / В.П. Кожухов, В.В. Воронов, В.В. Григорьев. – Л.: Транспорт, 1971. – 224 с.
4. Бажанкин Ю.В. Лекции по магнитно-компасному делу / Ю.В. Бажанкин // Электрон. дан. Режим доступа URL: <https://studfile.net/preview/4597203/page:4/> (дата обращения 17.09.2022).
5. Нечаев П.А. Магнитно-компасное дело / П.А. Нечаев, В.В. Григорьев. – М.: Транспорт, 1986. – 238 с.
6. Магнитометр EM2 (прибор для измерения магнитного поля Земли) // Электрон. дан. Режим доступа URL: <https://ndtrade.ru/izmeriteli-magnitnogo-polya/magnitometry-i-gaussmetry/magnitometr-em2/> (дата обращения 17.09.2022).
7. Долгов А.И. Научная задача и проблема / А.И. Долгов // Электрон. дан. Режим доступа URL: <https://mydocx.ru/5-28544.html> (дата обращения 17.09.2022).

# QUANTITATIVE ASSESSMENT OF THE EARTH'S MAGNETIC FIELD HETEROGENEITY WITHIN THE OCCUPIED BY A VESSEL VOLUME IN THE CONTEXT OF THE THEORY OF MAGNETIC COMPASS DEVIATION

<sup>1</sup>Ermakov Sergey Vladimirovich, PhD, Nautical Institute Director

<sup>2</sup>Morozova Svetlana Yurievna, senior lecturer of Navigation and Safety of Navigation Department

<sup>1,2</sup>Baltic Fishing Fleet State Academy FSBEI HE "KSTU",  
Kaliningrad, Russia, e-mail: <sup>1</sup>sv.ermakov@bgarf.ru; <sup>2</sup>nach\_uo@bgarf.ru

*In this work, using the Earth's magnetic field calculator, built on the mathematical model of the magnetic field WMM, a quantitative assessment of the variability of magnetic induction (total vector, as well as its horizontal and vertical components) in the volume occupied by a sea vessel was carried out. It is shown that the generally accepted assumption in the theory of magnetic compass deviation about the uniformity of the Earth's magnetic field in the indicated volume is correct.*

УДК 656.61.052:527(075)

## ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ МОРЕХОДНОЙ АСТРОНОМИИ

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

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

*На основе анализа опыта разработки и эксплуатации астронавигационных систем в отечественном ВМФ показаны основные направления развития методов и средств мореходной астрономии в целях обеспечения навигационной безопасности судовождения. Рассмотрена история развития автоматизированных астронавигационных и радиоастронавигационных систем в ВМФ и показана возможность и насущная необходимость создания таких систем для судов гражданского флота.*

Последние десятилетия развитие судовождения связано в первую очередь со спутниковой навигацией.

В целом существующие в настоящее время глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) зарекомендовали себя как высокоточные и надежные, а отказы судовой аппаратуры происходят достаточно редко.

Несомненные успехи спутниковой навигации привели к выводу из эксплуатации наземных радиотехнических средств, таких как РНС Лоран-С, Декка, Омега, большинства круговых и секторных радиомаяков.

Однако существует определенная вероятность выхода ГНСС из строя, или невозможности ее применения в тех или иных условиях.

Причинами этого могут быть:

- технические неполадки;
- аномальная солнечная активность;

- помехи от работающих мощных радиопередающих и телевизионных станций вблизи побережья;
- преднамеренное подавление или сознательное искажение сигналов от ГНСС в военных или в террористических целях.

Следовательно, если по какой-либо причине допустить вероятность отказа глобальной СНС в целом или на обширной акватории в течение значительного промежутка времени, то это резко повысит вероятность навигационных аварий.

Это вызван, прежде всего, тем, что очень многие судоводители, привыкшие всецело полагаться исключительно на ГНСС, будут захвачены врасплох, поскольку других (дублирующих) средств радионавигации на борту современных судов практически нет, и единственно возможным резервным способом определения места судна остался астрономический.

Более того, только астрономическим способом в открытом море представляется возможным достоверно определить поправку курсоуказания.

Кроме того, у многих судоводители, привыкших всецело полагаться исключительно на глобальную СНС, навыки использования методов «классической мореходной астрономии» в значительной мере утрачены.

Вышеперечисленные причины приводят к обоснованному выводу об объективном возрастании места и роли мореходной астрономии в целях обеспечения навигационной безопасности судовождения, что было отмечено в итоговых документах Манильского протокола, предусматривающих внесение изменений в ПДМНВ, ужесточающих требования к судоводительскому составу по умению использовать астрономические способы определения места судна и поправки курсоуказания.

Около 300 лет единственным астронавигационным измерительным прибором на судах всех типов являлся, и в настоящее время является навигационный секстан. Несмотря на заслуженную любовь многих поколений судоводителей к этому замечательному прибору, он обладает рядом существенных недостатков:

- позволяет измерять только один астронавигационный параметр - высоту светила;
- для измерения высоты светила необходимо одновременно визуально наблюдать как собственно светило, так и линию видимого горизонта, что делает невозможным получение астронавигационного параметра ночью, в условиях сильной облачности и ограниченной видимости;
- процесс измерения высот светил требует определенных умений и навыков, что достигается только регулярными тренировками;
- в дневной время суток можно получить астронавигационный параметр только по наблюдениям Солнца;
- действия судоводителя по измерению астронавигационного параметра можно отнести к чисто «ручной» технологической операции, которая в настоящее время никак не автоматизирована.

Перечисленные недостатки привели к созданию в начале 50-х годов на Свердловском оптико-механическом заводе по трофейным немецким образцам первых отечественных секстанов с искусственным горизонтом – гироскопических интегрирующих марки ГИМС-3.

Требования по определению координат места подводных лодок из перископного положения привели к необходимости создания зенитных перископов с астроизмерительными устройствами, в основу которых была положена конструкция ГИМС-3. Первый такой отечественный перископ ПЗНГ с астронавигационной приставкой был разработан в середине 50-х годов в ЛОМО.

Появление в составе флота подводных ракетноносцев, вооруженных баллистическими ракетами, потребовало более точного определения места и курсоуказания, что заставило по-новому оценить роль астронавигационных средств. Эта задача могла быть решена только с помощью специализированных астронавигационными перископов, входящих в состав навигационных комплексов (НК).

Первыми образцами таких специализированных средств стали астронавигационные системы (АНС) «Лири-I» (в составе НК «Плутон-I») и «Лири-II» (в составе НК «Север-N» и НК «Сила-N»), принятые на вооружение ВМФ в 1960 г.

В начале 60-х годов была выполнена модернизация системы «Лири». Доработанная АНС получила шифр «Сегмент». После успешных государственных испытаний в 1964 г. АНС «Сегмент» была принята на вооружение в составе НК «Сигма».

Эксплуатация АНС «Сегмент» показала как несомненные достоинства этой системы, так и определенные недостатки. Так было выявлено, что традиционные оптические средства астронавигации огра-

ниченны невысокой возможностью (в среднем по земному шару за год менее 40%) наблюдения астроориентиров (из-за облачности, тумана, дождя, снега, а также интенсивной засветки в дневное время).

Принятие на вооружение баллистических ракет большой дальности потребовало более точных средств выработки координат места и курса и, как следствие, более точных средств астрокоррекции. В связи с этим в 1964–1969 годах в ЛОМО для первого инерциального НК «Тобол» был разработан первый прецизионный оптический перископный астрокорректор (АК) «Волна» (принят на вооружение в 1972 г.). Опыт испытаний первых его образцов позволил обосновать направления дальнейшего совершенствования АК этого типа.

Существенные изменения претерпели методы навигационных определений в оптическом диапазоне. Так использование телевизионных приемных систем (а впоследствии - цифровых телевизионных систем) обеспечило пеленгование звезд днем, в условиях интенсивной солнечной засветки в разрывах облаков, а ночью - весьма слабых звезд (до 4-й звездной величины). В итоге средняя вероятность навигационного определения возросла до 74%. В 1974 г. ЛОМО начал разработку такой системы под шифром «Заря» для НК «Шлюз».

Параллельно с оптическими средствами развивались радиоастронавигационные системы, разрабатываемые ЦНИИ «Электроприбор». Такие принципиально новые разработки выполнялись в интересах повышения вероятности навигационных определений. Идея заключалась в использовании радиоастрономических методов, мало зависящих от метеоусловий освещенности.

По существу, сформировалось новое направление прикладной радиоастрономии. Метод выделения полезного сигнала известен: прием в максимально возможной полосе частот и получение сигнала на выходе приемника в узкой полосе вблизи частоты модуляции.

В 1965 г. на вооружение был принят радиосекстан (РС) «Самум», в 1972 г. – радиооптический секстан (РОС) «Сайга», в 1976 г. – радиоастронавигационная система (РАНС) «Снегирь».

В дальнейшем был развит метод пространственно-частотной фильтрации, позволивший уменьшить влияние собственного радиоизлучения атмосферы и подстилающей поверхности.

В 1980 г. был принят на вооружение прецизионный радиоастронавигационный комплекс (РАНК) «Салют» для инерциального НК «Симфония-0102». В 80 – 90-е годы началась разработка более совершенных РАНК «Мачта-3» и «Мачта-3.1» для НК «Симфония-3» и «Симфония-3.1».

В отличие от подводных лодок, для надводных кораблей работы по созданию АНС не носили столь направленного и последовательного характера. В основном без существенных изменений на них устанавливались АНС подводных лодок. Специально для кораблей по заданию ГНИНГИ был разработан НК «Альтаир», в составе которого были установлены два РОС «Сура». Испытания этого радиосекстана были проведены в 1967 – 1968 гг.

Также для надводных кораблей в 1976 г. была принята на вооружение РАНС «Нарва», установленная на ТАКР «Киев» в составе НК «Салгир-1143». В 1990 г. на ТАВКР «Адмирал Кузнецов» был принят на вооружение оптический астропеленгатор ОАП «Чакон-Б» в составе НК «Бейсур-4342М». В 1996 г. на ТАРКР «Петр Великий» был установлен РАНК «Салют».

Характеризуя современный уровень использования АНС ВМФ РФ, следует отметить, что в настоящее время в состав штурманского вооружения подводных лодок и надводных кораблей входят:

- радиоастронавигационные комплексы (РАНК), работающие в радиодиапазоне (на длине волны  $\lambda = 2$  см) и оптическом ТВ-канале;

- оптические астронавигационные системы (АНС), в том числе оптические астропеленгаторы (ОАП) для надводных кораблей.

Лучшими существующими АНС 3-го поколения, не имеющими аналогов за рубежом, являются:

- РАНК «Салют» для подводных лодок и надводных кораблей;

- АНС «Заря» для подводных лодок;

- ОАП «Чакон-Б» для надводных кораблей.

К перспективным АНС 4-го поколения можно отнести РАНК «Мачта-3» и «Мачта-3.1» (разработчик ФГУП ЦНИИ «Электроприбор») и АК «Град» (разработчик АО «ЛОМО»).

Ведутся исследования по возможности применения для измерения астронавигационных параметров инфракрасного диапазона, что позволит обеспечить полную всепогодность применения мореходной астрономии в любом районе Мирового океана.

Развитие методов и средств мореходной астрономии осуществляется по нескольким направлениям.

Первое направление заключается в увеличении количества принимаемой и обрабатываемой астронавигационной информации.

В «классической» мореходной астрономии основным методом получения астронавигационной информации является так называемый высотный метод, в котором измеряемым астронавигационным параметром является высота светила.

Недостатком метода применительно к «классической» мореходной астрономии является необходимость одновременного визуального наблюдения светила и линии морского горизонта, что не всегда возможно.

Помимо высотного метода, могут применяться и другие методы, такие как:

– Азимутальный метод, в котором измеряемым астронавигационным параметром является азимут светила. Основным недостатком данного метода является то, что для его реализации необходимо иметь на судне курсоуказатель, моделирующий плоскость истинного меридиана с высокой точностью и соответствующее измерительное устройство, а достоинством – отсутствие необходимости моделирования плоскости истинного горизонта.

– Разностно-высотный метод, в котором измеряемым астронавигационным параметром является разность высот светил. Достоинством данного метода является то, что разность высот обладает важным достоинством - в ней исключается постоянная погрешность измерения высот светил, а также другие повторяющиеся погрешности измерения и исправления высот, а недостатком - необходимость измерения высот как минимум трех светил.

– Разностно-азимутальный метод, в котором измеряемым астронавигационным параметром является разность азимутов светила. Достоинством данного метода является то, что разность азимутов обладает важным достоинством - в ней исключается погрешность поправки системы курсоуказания и погрешность установки измерительного устройства в диаметральной плоскости судна, а также другие повторяющиеся погрешности измерений и исправлений азимутов. Недостатком является необходимость наличия на судне специального измерительного устройства для измерения разности азимутов светил.

– Скоростно-высотный метод, в котором измеряемым астронавигационными параметрами являются высота светила и скорость ее изменения. Достоинством данного метода является то, что при измерении высоты и скорости изменения высоты одного светила можно получить обсервованное место судна. Недостатком данного метода является то, что его использование предполагает наличие специального устройства, измеряющего с достаточно высокой точностью скорость изменения высоты светила в течение достаточно короткого промежутка времени.

– Скоростно-азимутальный метод, в котором измеряемым астронавигационными параметрами являются азимут светила и скорость его изменения. Достоинством данного метода является то, что при измерении азимута и скорости изменения азимута одного светила можно получить обсервованное место судна.

Недостатком данного метода является то, что его использование предполагает наличие специального устройства, измеряющего с достаточно высокой точностью как сам азимут светила, так и скорость его изменения в течение достаточно короткого промежутка времени.

– Высотно-азимутальный метод, в котором измеряемым астронавигационными параметрами являются одновременно измеренные высота и азимут светила. Для полноценной реализации данного метода необходимо наличие специального измерительного устройства, позволяющего одновременно измерить как высоту светила, так и его азимут.

– Разностно-высотно-азимутальный метод, в котором измеряемым астронавигационными параметрами являются разность высот и разность азимутов двух и более светил. Для полноценной реализации данного метода необходимо наличие специального измерительного устройства, позволяющего одновременно, или в быстрой последовательности, измерить как высоты, так и азимуты как минимум двух и более светил.

Второе направление заключается в совершенствовании математических методов обработки астронавигационной информации.

Наиболее предпочтительными в данном случае являются такие известные методы, как метод наименьших квадратов и метод оптимальной линейной динамической фильтрации Калмана.

Третье направление заключается в разработке новых и совершенствовании существующих технических средств измерения астронавигационных параметров.

К таким техническим средствам относятся:

– Средства измерения астронавигационных параметров в оптическом диапазоне. Наиболее перспективным в данном случае представляется замена традиционных систем линз, применяемых в астронавигационных системах первого и второго поколений, применение так называемых оптронных измерительных устройств, реализованных в современных автоматизированных астронавигационных системах ВМФ, таких, как «Сигнал-3». Это телескопическая мачта, на вершине которой установлен оптический блок. Но внутри это совершенно новое устройство, где привычная система преломляющих изображение линз заменена на электронику. Ключевым элементом оптронного измерительного устройства является новейшая панкратическая оптическая система, с помощью которого можно плавно и без потери четкости менять угол обзора, приближая изображение надводных и небесных объектов. Проще говоря, это оптический зум, который сейчас есть во всех видеокамерах и фотоаппаратах. Изображение с оптронного измерительного устройства транслируется на специальный пульт управления.

– Средства измерения астронавигационных параметров в радиодиапазоне (радиосекстан). Радиосекстан состоит из стабилизированной направленной антенны в виде параболического зеркала, диаграмма направленности - узкий главный лепесток. Энергия, отражаемая зеркалом, направляется в фокус, где находится смещенный облучатель, с помощью которого создается вращение диаграммы направленности и ось главного лепестка описывает в пространстве коническую поверхность с углом сканирования. Технически это может быть реализовано либо путем механического вращения оси, на которой находится смещенный облучатель, либо путем электронного сканирования. Путем сравнения сигналов от двух симметричных положений главного лепестка относительно истинного направления на центр эффективного излучения светила по методу равноточной зоны должно достигаться точное определение направления на центр излучения. При работе радиосекстана антенна совершает конический обзор с определенной угловой частотой. Принимаемые сигналы модулируются по амплитуде и имеют две составляющие. Амплитуда одной из них пропорциональна отклонению оси диаграммы направленности антенны по азимуту относительно светила, а другой - отклонению по его высоте. После усиления в приемнике эти составляющие напряжения разделяются на синхронных детекторах, куда одновременно поступает опорное напряжение, вырабатываемое генератором. С выхода детекторов напряжения через усилители подаются на электродвигатели, которые с помощью приводов поворачивают антенну до устранения рассогласования. Величины азимута и высоты светила преобразуются в напряжения, пропорциональные значениям отсчитываемых координат, или в двоичный код и поступают в вычислительное устройство. Использование диапазона сверхвысокой частоты (длина волны 0,87-2 см) позволяет применять малогабаритные антенны с высокой направленностью и повысить мощность сигналов, поступающих на вход приемника радиосекстана. Главным преимуществом радиосекстана является независимость его работы от влияния погодных условий, что позволяет проводить измерения астронавигационных параметров в любых метеоусловиях.

– Средства измерения астронавигационных параметров в инфракрасном диапазоне. Для получения астронавигационной информации в данном случае может быть использована высокочувствительная высокоточная электронная матрица. Главным преимуществом такого приемного устройства является независимость его работы от влияния погодных условий, что позволяет проводить измерения астронавигационных параметров в любых метеоусловиях.

– Средства ориентирования измерительного устройства в пространстве. К таким устройствам можно отнести гиригоризонты, гировертикали, инерциальные навигационные системы, системы гироскопической стабилизации на базе ортогональной триады акселерометров и другие. Применение современных оптоволоконных и лазерных гироскопов позволяет решить задачу ориентирования измерительного устройства в пространстве с очень высокой точностью.

Четвертое направление заключается в совершенствовании эфемередного, программного и вычислительного обеспечения. Под эфемередным обеспечением понимается повышение точности предвычисления экваториальных координат светил, что достаточно успешно выполняется Институтом прикладной астрономии Академии наук Российской Федерации. Существующее в настоящее время программное и вычислительное обеспечение вполне позволяет решать любые задачи по вычислению координат места судна и поправки курсоуказания астрономическими способами.

Следует отметить, что в конце 80-х годов по заказу Министерства Морского флота СССР проводились исследования возможности разработки астронавигационной системы для судов гражданского флота, однако последовавший за этим развал Советского Союза и общая деградация науки и производства привела к полному сворачиванию научных исследований и технических разработок по данной тематике. Кроме того, основными причинами, сдерживавшими разработку и внедрение автоматизированных АНС для судов гражданского флота являлись:

- ограничения по возможности использования в зависимости от гидрометеорологических условий (для АНС, работающих в традиционном оптическом диапазоне);

- сложность конструкции;

- значительные массогабариты;

- большие финансовые затраты на разработку и создание;

- определенная закрытость всей информации, связанной с разработкой и эксплуатацией АНС

Однако в настоящее время развитие техники и технологии, в первую очередь вычислительной, телевизионной и гироскопической, вполне позволяет разработать и создать высокоэффективную автоматизированную АНС (или серии АНС) для судов гражданского флота. Объективными условиями для этого являются:

- очевидная необходимость наличия на судне эффективного резервного средства определения места судна в любом районе Мирового Океана и при любых гидрометеорологических условиях;

- очевидная необходимость наличия на судне эффективного средства определения поправки курсоуказания в любом районе Мирового Океана и при любых гидрометеорологических условиях;

- очевидная необходимость совершенствования существующих в настоящее время средств и методов решения задач мореходной астрономии на базе современных достижений науки и техники;

- существующий огромный опыт разработки и эксплуатации Различных типов АНС в Военно-морском флоте;

- рассекречивание многих аспектов теории и устройства АНС, особенно для АНС предыдущих поколений;

- готовность отечественных предприятий и институтов, имеющих огромный опыт разработки АНС для ВМФ, участвовать в этой работе при наличии соответствующих заказов от заинтересованных государственных структур и судоходных компаний.

Таким образом в настоящее время в силу возрастания роли и места мореходной астрономии в целях обеспечения безопасности судоходства возникла объективная необходимость разработки и создания автоматизированных высокотехнологичных астронавигационных систем для судов гражданского флота. Обоснование с учетом уже накопленного опыта эксплуатации таких систем в ВМФ технических требований к ним, их структуры, соответствующего математического обеспечения и методики практического применения является крайне актуальной научной задачей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев С.П. Современное состояние и перспективы развития фундаментальной и прикладной астрономии для обеспечения навигации подвижных объектов различного назначения. Материалы научной школы «Астронавигация –2000», СПб, ГНИНГИ МО РФ, 2000, с. 7–13.

2. Кириллов Н.О. Современные средства и методы мореходной астрономии. – Калининград: Издательство БГА РФ, 2017 – 108 с.

3. Кириллов Н.О. Мореходная астрономия. – Калининград: Издательство БГА РФ, 2010 – 390 с.

4. Костин В.Н. История развития отечественных морских астронавигационных систем. «Навигация и океанография» № 11, СПб ГНИНГИ МО РФ, 2000, с. 133–137.

5. Костин В.Н. Современное состояние и перспективы развития морской астронавигации. Материалы научной школы «Астронавигация –2000», СПб, ГНИНГИ МО, с. 106–115.

6. Песков Ю. А. Морская навигация с ГЛОНАСС/GPS – М.: МОРКНИГА, 2010 – 344 с

7. Пешехонов В.Г. Навигационные системы. Вестник Российской Академии наук, том 67 № 1.: М., РАН, 1997, с. 43–48.



## MAIN DIRECTIONS OF DEVELOPMENT OF METHODS AND MEANS OF MARINE ASTERONOMY

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, e-mail: kaf\_sbm@bgarf.ru

*Based on the analysis of experience in the development and operation of astronavigation systems in the Russian Navy, the main directions in the development of methods and means of nautical astronomy in order to ensure the navigational safety of navigation are shown. The history of the development of automated astronavigation and radio astronavigation systems in the Navy is considered, and the possibility and urgent need to create such systems for civil fleet ships is shown.*

УДК 656.614

### О НЕОБХОДИМОСТИ УЧЁТА ФАКТОРА ВРЕМЕНИ ПРИ ОЦЕНКЕ БЕЗОПАСНОСТИ БАЛКЕРА В СЛУЧАЕ РАЗЖИЖЕНИЯ ГРУЗА В ТРЮМАХ

<sup>1</sup>Кубрин Сергей Сергеевич, д-р техн. наук, профессор

<sup>2</sup>Гуральник Борис Самуилович, канд. техн. наук, профессор кафедры

<sup>3</sup>Ковалишин Павел Юрьевич, канд. филол. наук, доцент

<sup>1</sup>ИПКОН РАН, ФГОУ Московская государственная академия водного транспорта,  
Москва, Россия, e-mail: <sup>1</sup>s\_kubrin@mail.ru

<sup>2,3</sup>БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ», Калининград, Россия, e-mail: <sup>2</sup>boris.guralnik@mail.ru

*Аварии, связанные с разжижением груза, часто заканчиваются гибелью судна и большинства членов экипажа. Это связано с отсутствием фактической информации о физических процессах, происходящих в грузе в случае наступления разжижения, что не позволяло капитанам своевременно дать команду об оставлении судна. В этой ситуации предлагается на основе анализа временных интервалов первой и второй стадий развития аварий оценить вероятность опрокидывания судна за заданный промежуток времени.*

За последние десять лет произошли ряд резонансных аварий и аварийных происшествий с судами после разжижения навалочных грузов в трюмах. Большинство данных происшествий связано с гибелью части или всего экипажа судов. Названные аварии произошли при перевозке железорудного концентрата, никелевой руды в разной форме, флюорита и некоторых других навалочных грузов.

При исследовании причин данных инцидентов и аварий специалисты преимущественно рассматривали хронологию развития аварий, вид перевозимого груза и возможность контроля его состояния во время рейса, состояние погоды, поведение судна и последовательность действий судовой администрации и экипажа во время аварии.

Представляется, что причинами катастрофических последствий и очень важным в таких авариях является не учёт временного фактора, который в значительной степени определяет возможность благополучного выхода из аварийной ситуации и спасения экипажа. В случае разжижения

груза аварийные суда опрокидывались, если не смогли укрыться в порту-убежище, т.е данные аварии связаны с потерей судном остойчивости. Своевременная подача команды «оставить судно» позволила бы спасти многих погибших членов экипажа.

На сегодня удалось подобрать 49 отчётов и описаний аварийных случаев с судами, на которых произошло разжижение перевозимого груза. Все эти аварии и аварийные происшествия случились в период с 1960 по 2021 годы, т.е за последние 60 лет. Не смотря, на такое продолжительное время, реальных результатов в решении этой проблемы, по нашим данным, не получено.

Сегодня можно утверждать, что:

- разжижение груза, как правило, происходит при значительном превышении влажности загруженного на судно груза над транспортабельным пределом влажности;
- в случае разжижения происходит опрокидывание судов, от потери остойчивости;
- нарастание крена и гибель шести судов при разжижении груза происходило, как показано на графике на рис. 1.

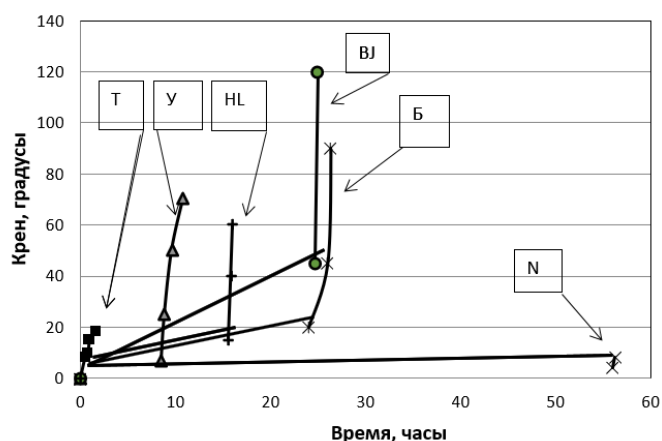


Рис. 1 схема развития аварии при разжижении груза

В этой связи следует заметить, что процесс опрокидывания судов с разжиженным грузом никак не коррелируется с общепринятой схемой опрокидывания судна, испытывающего качку, на которое с наветренного борта налетает шквал.

Во всех рассмотренных авариях, как видно на рис. 1, суда независимо от размеров, в нормальных или штормовых условиях плавания, вдруг получали начальный крен, после чего крен монотонно возрастал до опрокидывания судна. В настоящее время у специалистов сложилось мнение, что вследствие фильтрации влаги внутри груза штабель приобретает трёхфазную структуру. В результате, на поверхности штабеля и в углах трюмов скапливается выделившаяся вода с взвесью из лёгких частиц груза, на поверхности штабеля образуется насыщенный влагой вязкий текучий слой и оставшийся скелет из твёрдых частиц груза.

Свободные поверхности от выделившейся воды с взвесью, скатившиеся в трюмах судов на один борт, являются причиной образования у судов начального крена.

Далее, начинается вторая стадия развития аварии, когда насыщенный влагой вязкий текучий слой начинает перетекать в сторону опущенного борта. Если в начале второй стадии аварии, получается повернуть судно опущенным бортом на ветер и принять балласт, совместно с другими операциями борьбы за живучесть, то в некоторых случаях удаётся предотвратить аварию и благополучно укрыться в порту убежище.

К сожалению, детальная фактическая информация о процессе разжижения отсутствует или очень отрывочная и противоречивая, т.к многие суда пропали без вести со всем экипажем, по другим есть только качественная информация отдельных спасшихся моряков.

Опыты на образцах груза, теоретические работы не дали прорыва в исследованиях процесса разжижения.

Другими словами имеющаяся информация не позволяет делать какие-то количественные выводы о происходящих при разжижении процессах.

Одной из первоочередных задач сегодня является определение момента времени, когда капитан должен остановить работы по борьбе за живучесть и дать команду покинуть судно.

Поэтому, на данном этапе на первый план выходят разработки рекомендаций по действиям экипажей по обеспечению безопасности судна, в случае наступления разжижения груза в трюмах, основывающиеся на статистическом анализе времени развития аварии и гибели аварийных судов.

Для этого необходимо оценить, на основе имеющейся статистики, продолжительности первой и второй стадии развития аварий и выявить факторы, определяющие продолжительности этих этапов.

Цель данной статьи – используя [1], [2], [3] оценить среднюю продолжительность первой и второй стадии аварий, связанных с разжижением грузов и построить законы распределения времени этих временных периодов.

На Рис. 2 приведены эмпирические частоты времени образования начального крена и сделана оценка методом наибольшего правдоподобия возможности представления опытных данных некоторыми теоретическими распределениями.

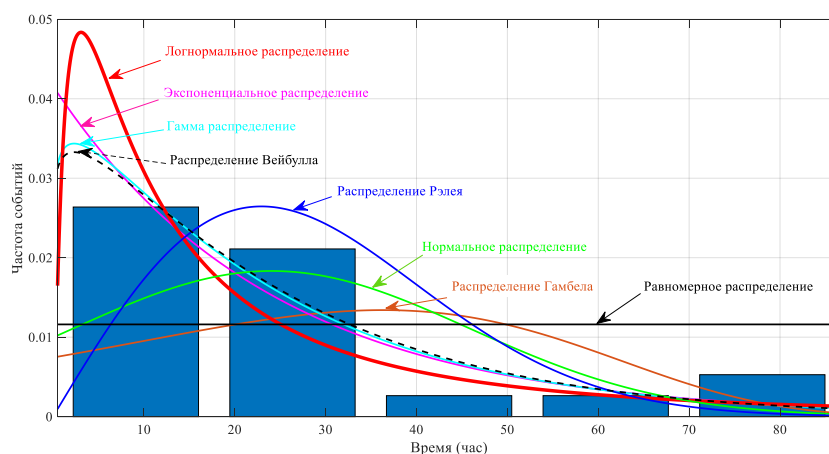


Рисунок 2. Эмпирическое и теоретические распределения функций плотности вероятности, построенные для выборки с временными интервалами получения судном первоначального крена.

При обработке данных были определены моменты эмпирического распределения и подобраны параметры теоретических распределений (равномерного, нормального, логнормального, экспоненциального, гамма распределения и распределений Рэля, Вейбулла, Гамбеля).

Аналогичным образом были обработаны данные по временным интервалам до опрокидывания судов. На Рис. 3 приведены эмпирические частоты временных интервалов до опрокидывания судна и соответствующие опытным данным теоретические распределения - равномерное, нормальное, логнормальное, экспоненциальное, гамма распределение и распределения Рэля, Вейбулла, Гамбеля.

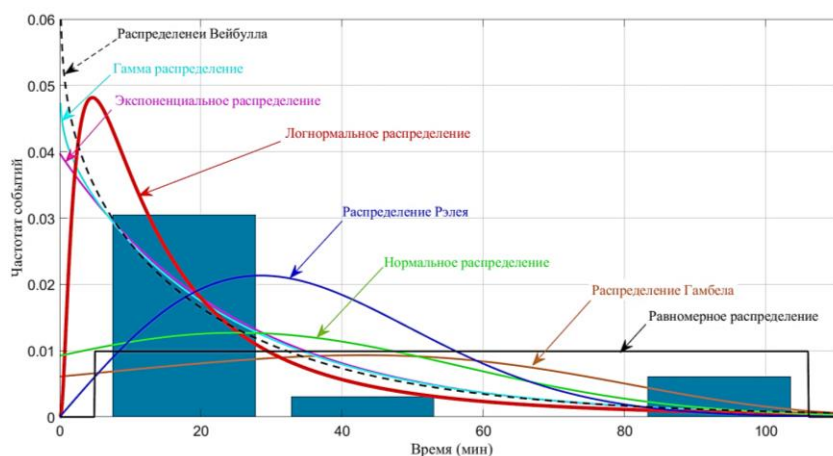


Рисунок 3. Эмпирическое и теоретические распределения функции плотности вероятности, построенные для выборки с временными интервалами до опрокидывания судна.

Для проверки гипотезы о принадлежности эмпирических выборок временных интервалов до получения судном крена и временных интервалов до опрокидывания судна тому или иному теоретическому закону распределения случайного события для каждого из них вычислен критерий согласия Колмогорова. Наибольшее значение критерия согласия Колмогорова (0,4401) для выборки временных интервалов до получения судном крена соответствует логнормальному распределению. Для выборки временных интервалов до момента опрокидывания судна наибольшее значение критерия согласия Колмогорова (0,5968) тоже относится к логнормальному распределению.

Полученные результаты исследования показывают, что учитывая специфику развития аварий в случае разжижения груза, необходимо рассматривать не просто состояния судов на разных стадиях аварий, но и продолжительности перехода судна из одного состояния в другое, т.е. оценка безопасности судна должна учитывать фактор времени.

Например, для определения отрезка времени, в течение которого судно, получит постоянный начальный крен, в случае разжижения на судне груза, необходимо задаться некоторым уровнем вероятности наступления этого неблагоприятного события. Тогда, этот временной интервал определяется с помощью теоретического логнормального распределения с помощью графика (рис. 4). К примеру, с вероятностью 70%, постоянный крен при перевозке навалочных и насыпных грузов с повышенной влажностью, судно получит в течении 27 часов 30 минут (черная пунктирная линия на рисунке 4).

То есть с вероятностью 30% судно не получит первоначальный крен из-за разжижения груза в течении 27 с половиной часов.

Если задаться уровнем вероятности в 90%, то постоянный крен судно с разжиженным грузом в трюмах получит после 70 часов плавания (на рисунке показано бледной пунктирной линией).

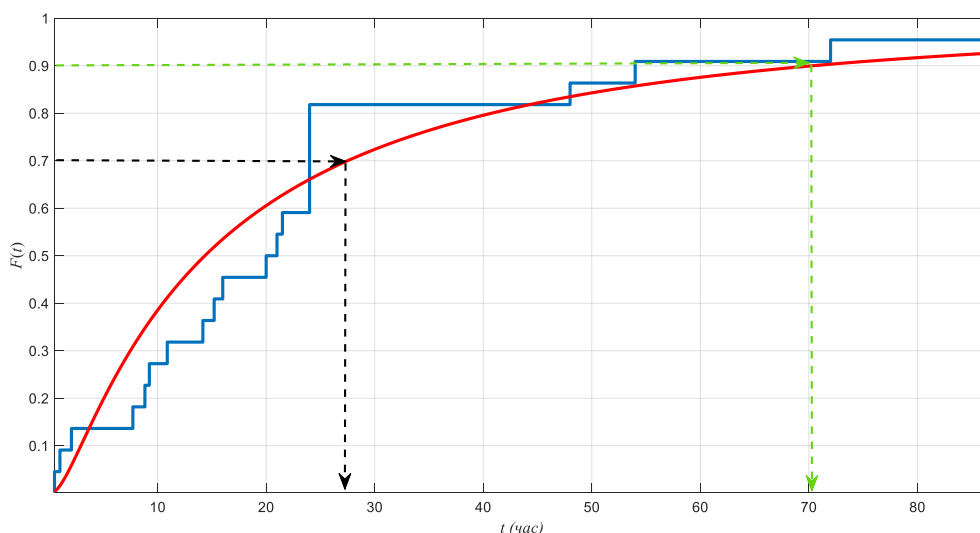


Рисунок 4. График для определения промежутка времени до получения постоянного крена судном, перевозящего насыпные грузы с повышенной влажностью.

- при 70% вероятности судно получит постоянный крен в течении 27,5 часов;
- при 90% вероятности судно получит постоянный крен в течении 70 часов.

С ростом промежутка времени вероятность возникновения инцидента увеличивается. То есть, вероятность не получить крен в течении 70 часов у судна перевозящем насыпной груз с повышенной влажностью меньше 10%.

Аналогично необходимо поступить для определения промежутка времени, за который может произойти кораблекрушение – опрокидывание судна при смещении разжиженного груза.

Для этого следует воспользоваться графиком, представленным на рис. 5. На нем нанесены экспериментальное распределение времен до опрокидывания судна (ступенчатая линия) и теоретическое логнормальное распределение.

Черным горизонтальным пунктиром показан процесс определения промежутка времени, за который с вероятностью 70% произойдет кораблекрушение. Согласно эмпирическому распределе-

нию опрокидывание произойдет в течение 20 минут (бледный вертикальный пунктир), согласно логнормальному распределению в течение 22 минут (черный вертикальный пунктир). При значительной вероятности - 90% кораблекрушение неминуемо произойдет в течение 50 минут (логнормальное распределение) и в течении 82 минут (эмпирическое распределение).

Таким образом, вероятность гибели судна, определенная описанным выше способом, может выступать в качестве критерия риска в авариях такого рода. С использованием критерия риска может быть разработана нормативная база для определения момента времени, когда капитан может сделать объективный выбор о возможности дальнейшей борьбы за живучесть аварийного судна или принять решение об оставлении судна.

Используя полученный в работе график (рис. 5) можно оценивать вероятность удержания гибнущего судна на плаву в течение заданного времени, необходимого для эвакуации экипажа.

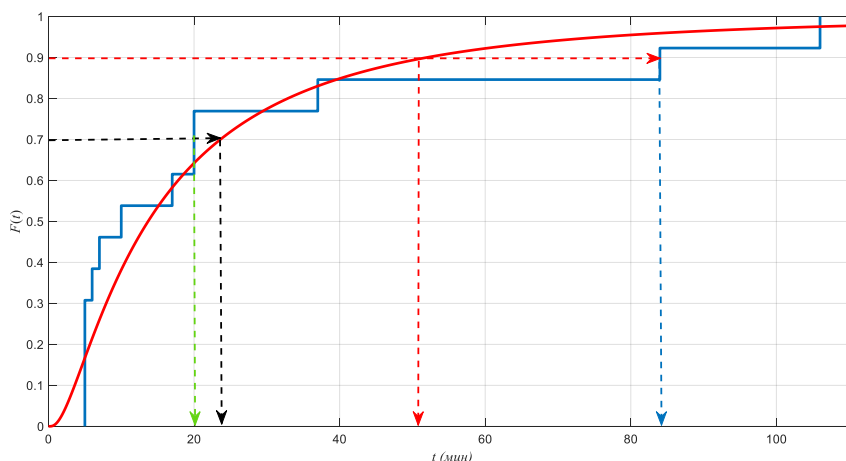


Рисунок 5. График для определения промежутка времени до кораблекрушения судна, перевозящего насыпные грузы с повышенной влажностью в результате смещения груза.  
 - при 70% вероятности гибель судна произойдет за 20 минут (эмпирическое распределение, вертикальная пунктирная стрелка), за 22 минуты (логнормальное распределение, вертикальная черная пунктирная стрелка);  
 - при 90% вероятности гибель судна произойдет за 50 минут (логнормальное распределение, вертикальная пунктирная стрелка) и за 82 минуты (эмпирическое распределение, вертикальная пунктирная стрелка).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксютин Л.Р., Благовещенский С.Н. Аварии судов от потери остойчивости. – Л.: Судостроение, 1975. – 197 с.
2. Michael C. Munro and Abbas Mohajerani. Liquefaction Incidents of Mineral Cargoes on Board Bulk Carriers. *Advances in Materials Science and Engineering*, Volume 2016, Article ID 5219474.20 p. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/5219474>.
3. Гуральник Б.С., Кубрин С.С., Сирота А.К., Якута И.В. Оценка вероятности успешной эвакуации экипажа балкера в случае разжижения груза. *Всероссийский институт научной и технической информации РАН (Москва), журнал «Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций», №4, 2019.- с. 66-72.*

# TO TAKE INTO ACCOUNT THE TIME FACTOR WHEN ASSESSING THE SAFETY OF A BULK CARRIER IN CASE OF CARGO LIQUEFACTION IN HOLDS

<sup>1</sup>Kubrin Sergey Sergeyevich, Doctor (Tech.), Professor,

<sup>2</sup>Guralnik Boris Samuilovich, PhD, Associate Professor,

<sup>3</sup>Kovalishin Pavel Yur'yevich, Associate Professor

<sup>1</sup>IPKON RAN, Moscow State Academy of Water Transport (MSAWT),  
Moscow, Russia, e-mail: s\_kubrin@mail.ru

<sup>2,3</sup>Kaliningrad State Technical University, Baltic Fishing Fleet State Academy,  
Kaliningrad, Russia, e-mail: kaf-bm@bga.gazinter.net

*Accidents connected with cargo liquefaction often result in wreck of a vessel and most of the crew. This is connected with lack of actual information on physical processes taking place in cargo in case of liquefaction that does not allow masters to give timely command to abandon ship. In this situation, based on the analysis of time intervals of the first and second stages of accidents development, it is proposed to estimate the probability of the vessel not to capsize within a given time interval.*

УДК 656.61.052

## ВЛИЯНИЕ УВЕЛИЧЕНИЯ ГЛАВНЫХ РАЗМЕРЕНИЙ КОНТЕЙНЕРОВОЗОВ НА ИХ МОРЕХОДНЫЕ КАЧЕСТВА

Якута Ирина Владимировна, канд. техн. наук, доцент кафедры судовождения и безопасности мореплавания

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

*Проведено исследование влияния увеличения соотношений главных размерений контейнеровозов разных годов постройки на их мореходные качества. Анализ показал, что отношение главных размерений новейших контейнеровозов практически равно этому отношению для судов постройки конца прошлого века. Возможности увеличения главных размерений контейнеровозов не безграничны. Морские проливы, каналы с ограниченными размерами шлюзов и порты с ограниченными глубинами на фарватерах и у причалов накладывают ограничения на рост главных размерений контейнеровозов, поэтому можно полагать, что контейнеровозы, вероятно, достигли максимальных размеров.*

Самый динамично развивающийся сегмент морских перевозок сегодня – это контейнерные перевозки. Постоянное увеличение контейнерного грузопотока требует дальнейшего развития контейнерного флота. С момента появления первого контейнеровоза и по настоящее время наблюдается устойчивый рост количества этого типа судов, с постоянным увеличением контейнеровместимости. За последние 60 лет вместимость морских контейнеровозов увеличилась с 400 до 24000 TEU (двадцатифутовый эквивалент, единица измерения вместимости контейнеровозов). Стоимость крупнейших современных контейнеровозов доходит до 180 миллионов долларов, а цена перевозимых на них грузов может составлять миллиарды долларов [1].

22 июня 2022 года в Китае был сдан в эксплуатацию самый большой в мире контейнеровоз «Ever Alot». Длина судна составляет почти 400 м, площадь палубы – 24 тыс. м<sup>2</sup>, примерно как три с половиной футбольных поля, вместимость – 24 тыс. TEU. Всего в 2022 году на воду будет спущено 12 таких гигантов [2,3]. С увеличением размеров и контейнеровместимости судов прямо пропорционально растет и вероятность возникновения аварий.

Анализ причин аварий контейнеровозов показывает, что примерно 40% их происходит из-за плохой упаковки грузов, 27% – из-за недостоверного декларирования, 4% – из-за нарушения обработки контейнеров, 2% – из-за их неправильного размещения на судне [1,4].

23 марта 2021 года гигантский контейнеровоз MV «Ever Given», принадлежащий японской компании Shoei Kisen Kaisha Ltd, вошел в Суэцкий канал в 23-й раз с момента своего спуска на воду, но в этот день что-то пошло не так. До сих пор ведутся споры по поводу причин аварии (скорость ветра была зафиксирована на уровне 40 узлов, а видимость была плохой). Так или иначе, но 400-метровое судно увязло в грязи и песке у южного входа в канал, почти полностью его перегородив.

Следующие шесть дней аварийно-спасательных работ стоили мировой экономике 9,6 млрд. долларов в день и создали беспрецедентную пробку в истории судоходства, 450 судов ждали прохода по каналу [5,6].

Чтобы снять с мели «Ever Given», власти Суэцкого канала использовали 14 буксиров, экскаваторы, дноуглубительное судно и подъемный кран. Ущерб от блокировки Суэцкого канала составил 400 млн. долларов в час. Общий ущерб оценивается в 41,4 млрд. долларов [6].

В морских контейнерных перевозках, как и в любом коммерческом предприятии, финансовая выгода часто выходит на первый план по отношению к безопасности. В каждой судоходной компании декларируется политика безопасности и защиты окружающей среды, которая провозглашает эти два аспекта деятельности компании как самые приоритетные. Однако в реальности коммерческие задачи нередко преобладают над задачами обеспечения безопасности.

Как известно, мореходные качества существенно зависят от условий плавания (высоты, длины и периода волн, скорости ветра), линейных размеров и веса судна, а также от его архитектуры, формы обводов, нагрузки и других параметров [7, 8].

Для исследования мореходных качеств контейнеровозов были произведены расчеты основных соотношений главных размерений:  $L/B$ ,  $B/T$ ,  $L/H$ ,  $H/T$ ,  $L/T$  контейнеровозов постройки 1979-1990 годов, контейнеровозов 2000-2010 годов постройки и новых контейнеровозов постройки 2011-2021 годов, которые позволяют определить тенденции изменения рассматриваемых параметров. Для анализа взято 112 судов разных годов постройки.

Сравнение изменения соотношений главных размерений контейнеровозов показывают пути развития судостроения для достижения оптимальных мореходных качеств, которые улучшают эксплуатационно-технические характеристики современных судов.

В табл.1 для примера выбраны по 4 судна разных годов постройки, для которых построены гистограммы соотношения главных размерений.

Таблица 1

### Характеристики контейнеровозов

Название судна	Год постройки	DW, т	L, м	B, м	T, м	H, м
ADDIRIYAH	1979	24272	183,2	27,5	11,0	13,0
BESTSEA	1981	21203	177,2	28,4	10,7	13,2
CMA CGM POTOMAC	1980	28782	214,9	31,0	12,0	16,0
DELMAS KISSAMA	1982	26287	175,8	28,1	11,4	13,4
RISE SHINE	2000	5580	101,0	19,0	5,5	8,4
SINGAPORE BRIDGE	2002	50953	260,0	32,0	12,6	19,3
FESCO ASKOLD	2004	13806	147,87	23,25	8,51	11,5
EMMA MAERSK	2006	174239	398,0	56,0	13,5	30,2
CMA CGM RIGOLETTO	2006	114004	349,0	43,0	12,5	27,3
ELEONORA MAERSK	2007	115000	398,0	56	16	29,3
CMA CGM THALASSA	2008	130700	346,5	43,2	15,5	28,8
COSCO PACIFIC	2008	111315	348,5	45,6	14,5	27,2
MSC DANIT	2009	165517	365,5	51,2	16	29,1
FRANKFURT EXPRESS	2010	104400	335,0	42,8	14,5	24,6
CSCL STAR	2011	150853	366,0	52,0	13,1	29,9
CMA CGM MARCO POLO	2012	187625	396,0	53,6	16,0	29,9
MAERSK MC KINNEY MOLLER	2013	165000	399,0	59,0	15,5	39,3
MSCL GLOBE	2014	155200	400,0	58,6	16,0	30,5
MSC OSCAR	2015	199273	395,4	59,0	16,0	30,3
MSC ANNA	2016	185503	399,98	58,6	16,0	33,2
OOCL HONG KONG	2017	191422	400,0	59,0	16,0	33,2
EVER GOLDEN	2018	219079	400,0	58,8	16,0	32,2

Название судна	Год постройки	DW, т	L, м	B, м	T, м	H, м
MAASTRICHT MAERSK	2019	214286	399,0	58,6	16,5	33,2
HMM HAMBURG	2020	228283	399,9	61,0	16,525	33,2
EVER ACE	2021	235579	399,9	61,5	16,5	33,2

Отношение длины судна к ширине ( $L/B$ ) характеризует ходкость судна, чем оно больше, тем быстрее судно. Скоростные качества улучшаются в связи с тем, что главной составляющей сопротивления движению судна становится сопротивление трения, зависящее от величины площади смоченной поверхности, а она уменьшается с уменьшением отношения  $L/B$ .

Произведенные расчеты показали, что среднее значение отношения  $L/B$  контейнеровозов постройки 80-ых годов прошлого века равно 6,52; контейнеровозов постройки 2000-2010 года – 7,28; контейнеровозов постройки 2011-2021 года – 6,82.

На рис.1 представлена диаграмма изменения соотношения длины к ширине  $L/B$  контейнеровозов постройки 80-ых годов прошлого века и начала XXI века (2000-2006 год). Для примера из представленных для анализа судов взято по 4 судна этих годов постройки.

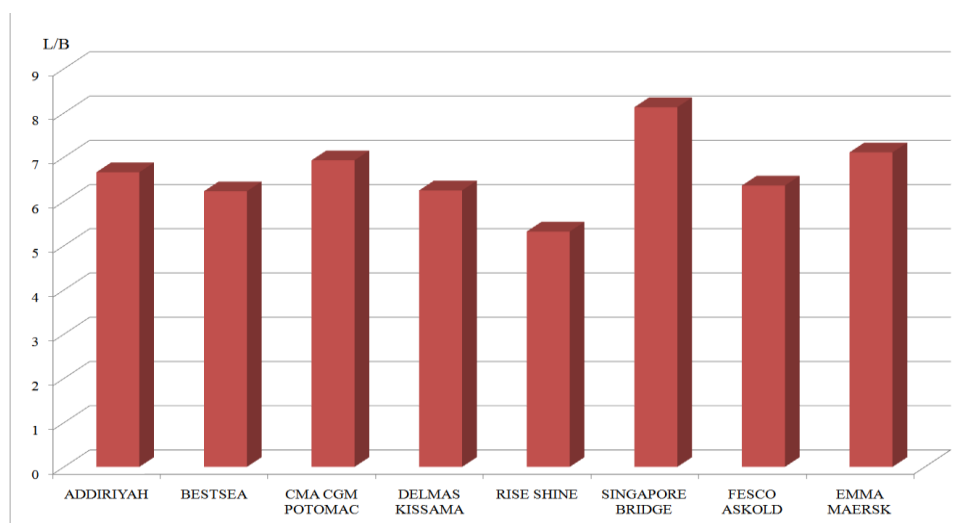


Рис.2. Диаграмма соотношений размеров  $L/B$  контейнеровозов постройки 80-ых годов XX века и начала XXI века

На рис. 2 показана диаграмма изменения соотношения  $L/B$  для контейнеровозов постройки 2000-2010 и 2011-2021 годов. Первые 4 судна на диаграмме относятся к 2000-2010 годам постройки, вторые 4 судна – к постройке 2011-2021 годов.

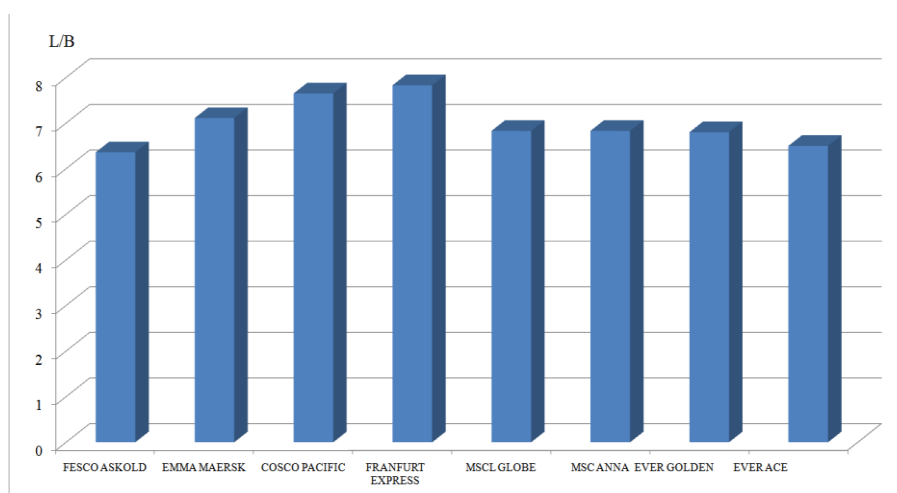


Рис. 2. Диаграмма соотношений размеров  $L/B$  контейнеровозов постройки 2000-2010 и 2011-2021 годов



Анализ проведенного исследования показывает, что у судов 2000-2011 года постройки отношение  $L/B$  на 12% больше чем у «старых» контейнеровозов, это позволяет утверждать, что новые контейнеровозы более быстроходные, и оправдано увеличение длины и ширины этих судов. Однако отношение  $L/B$  контейнеровозов постройки 2011-2021 года практически равно этому отношению для «старых судов».

С увеличением отношения ширины к осадке ( $B/T$ ) остойчивость судна улучшается, хотя качка делается более порывистой. Расчеты отношения  $B/T$  показали, что среднее значение отношения  $B/T$  контейнеровозов постройки 80-ых годов XX века равно 2,55; контейнеровозов постройки 2000-2010 года – 3,19; контейнеровозов постройки 2011-2021 года – 3,68.

На рис.3 представлена диаграмма изменения соотношения ширины к осадке  $B/T$  контейнеровозов постройки 80-ых годов прошлого века и начала XXI века (2000-2006 годы). Также для примера из представленных для анализа судов взято по 4 судна этих годов постройки.

На рис.4 показана диаграмма изменения соотношения  $B/T$  контейнеровозов постройки 2000-2010 и 2011-2021 годов.

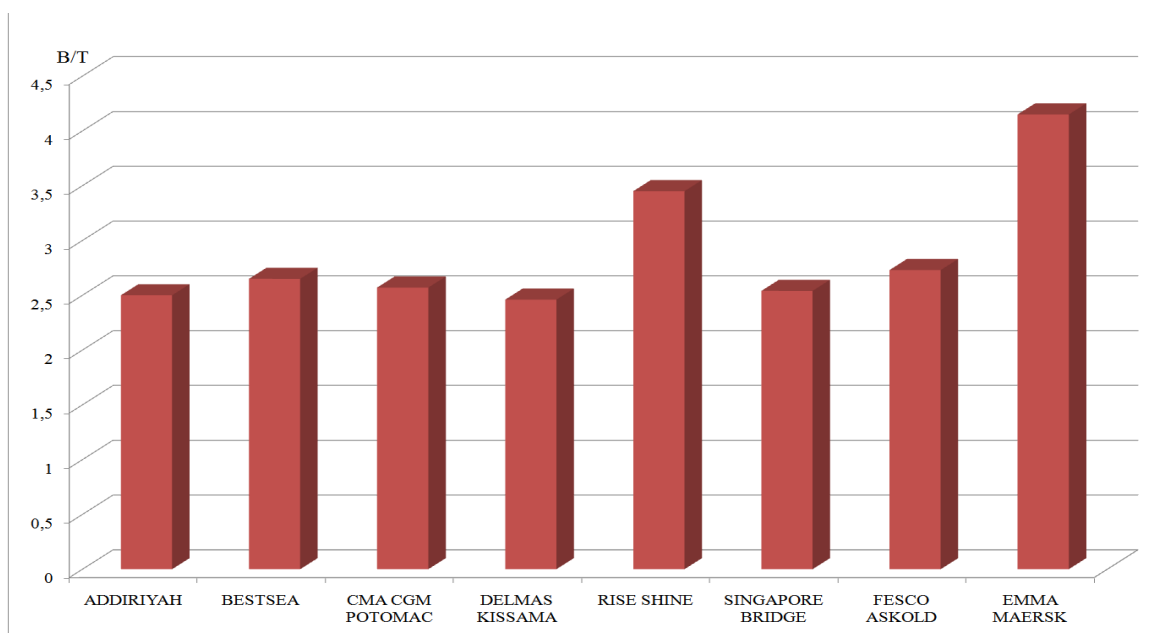


Рис.3. Диаграмма соотношений размеров  $B/T$  контейнеровозов 80-ых годов XX века и постройки начала XXI века

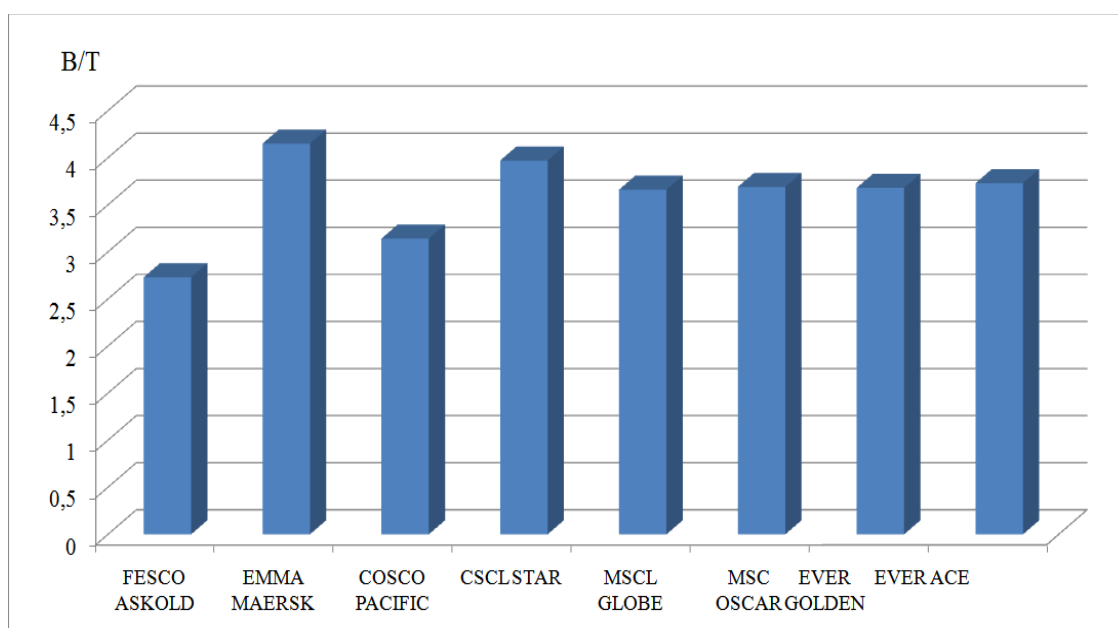


Рис.4. Диаграмма соотношений размеров  $L/B$  контейнеровозов постройки 2000-2010 и 2011-2021 годов

Произведенные расчеты показывают, что у судов постройки 2011-2021 года отношение  $V/T$  на 15% выше, чем у контейнеровозов постройки 2000-2010 года и на 44 % больше, чем у контейнеровозов 80-ых годов XX века постройки, это позволяет утверждать, что у контейнеровозов остойчивость улучшилась. Большие значения  $V/T$  связаны с обеспечением остойчивости при перевозке значительной части контейнеров на верхней палубе.

Отношение длины судна к высоте борта ( $L/H$ ) характеризует прочность корпуса судна, чем выше это отношение, тем сложнее обеспечить общую продольную прочность судна. Среднее значение отношения  $L/H$  контейнеровозов 80-ых годов XX века постройки равно 13,78; контейнеровозов постройки 2000-2010 года – 12,93; контейнеровозов постройки 2011-2021 года – 12,22.

На рис.5 представлена диаграмма изменения соотношения длины к высоте борта  $L/H$  контейнеровозов постройки 80-ых годов прошлого века и начала XXI века (2000-2006 годы). На рис.6 представлена диаграмма изменения соотношения  $L/H$  контейнеровозов постройки 2000-2010 и 2011-2021 годов.

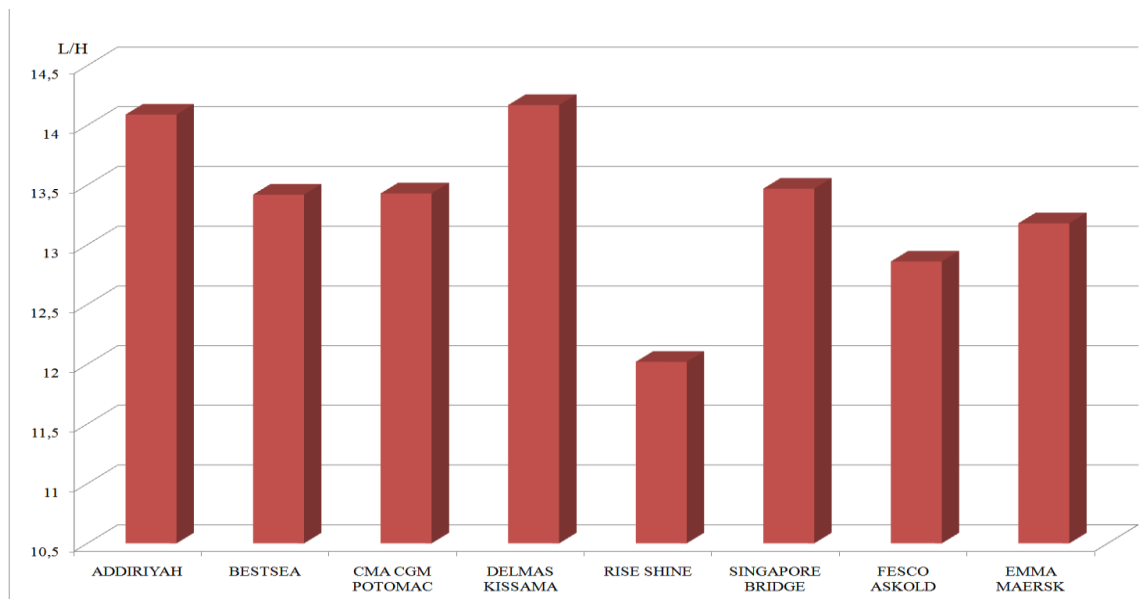


Рис.5. Диаграмма соотношений размеров  $L/H$  контейнеровозов постройки 80-ых годов XX века и начала XXI века

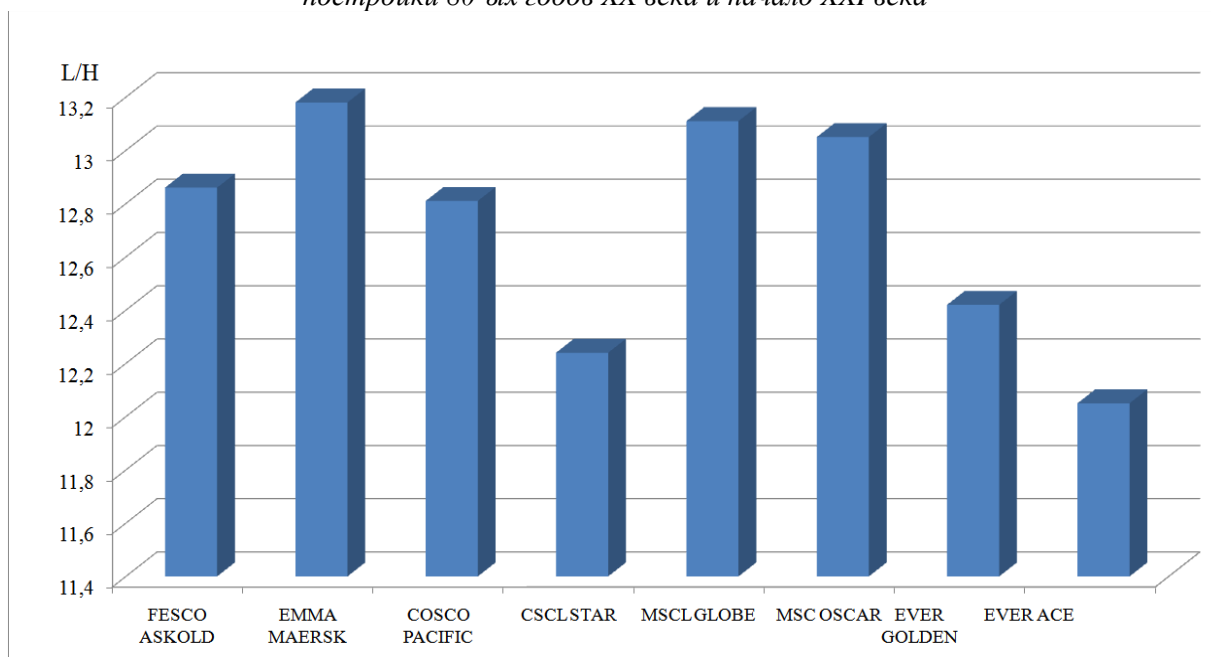


Рис.6. Диаграмма соотношений размеров  $L/H$  контейнеровозов постройки 2000-2010 и 2011-2021 годов

Проведенные расчеты показали, что отношение  $L/H$  снижается, что говорит о том, что обеспечить общую продольную прочность судна стало легче. У контейнеровозов постройки 2011-2021 года отношение  $L/H$  на 11% меньше чем у «старых» и на 6% меньше, чем у контейнеровозов постройки 2000-2010 года.

Отношение высоты борта к осадке ( $H/T$ ) определяет остойчивость на больших углах крена и непотопляемость судна, рост благоприятно влияет на эти качества. Среднее значение отношения  $H/T$  контейнеровозов постройки 80-ых годов XX равно 1,25; контейнеровозов постройки 2000-2010 года – 1,79; контейнеровозов постройки 2011-2021 года – 2,06.

На рис.7 представлена диаграмма изменения соотношения высоты борта к осадке  $H/T$  контейнеровозов постройки 80-ых годов прошлого века и начала XXI века (2000-2006 годы).

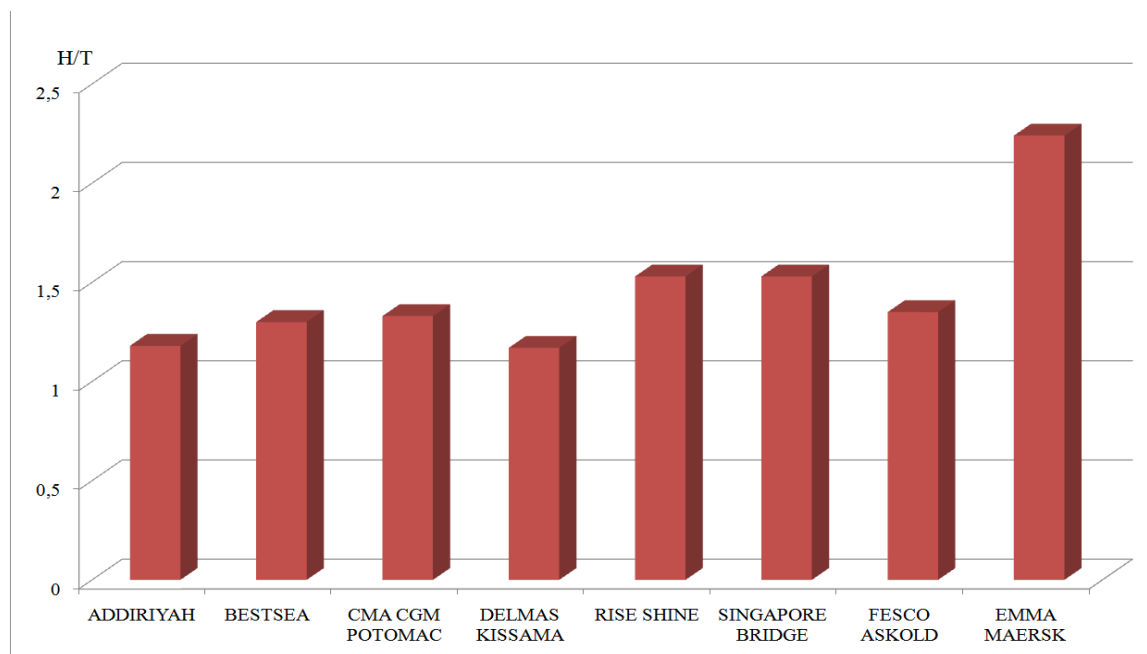


Рис.7. Диаграмма соотношений размеров  $H/T$  контейнеровозов 90-ых годов XX века и начала XXI века постройки

На рис.8 показана диаграмма изменения соотношения  $H/T$  контейнеровозов постройки 2000-2010 и 2011-2021 годов.

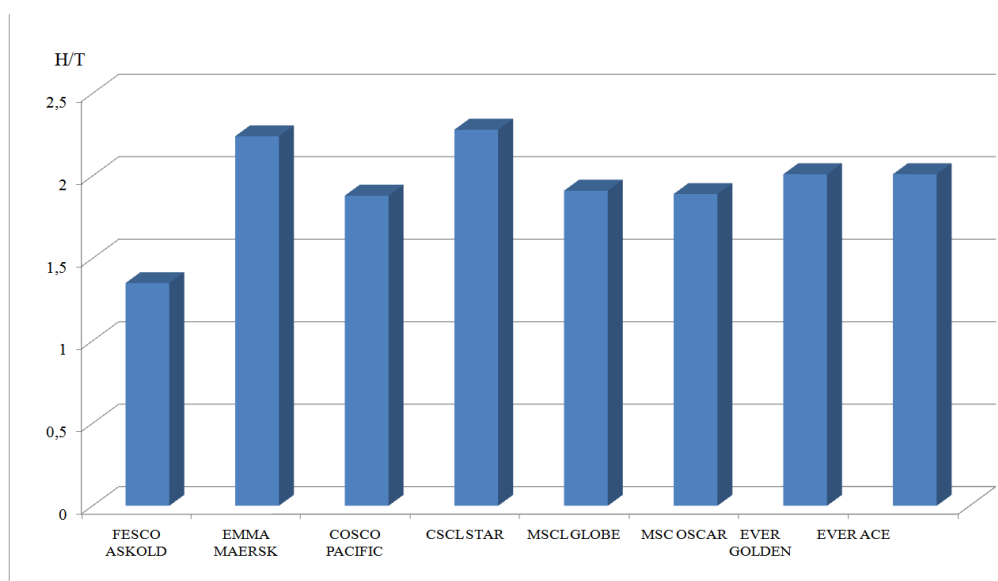


Рис.8. Диаграмма соотношений размеров  $H/T$  контейнеровозов постройки 2000-2010 и 2011-2021 годов

Произведенные расчеты показывают, что у контейнеровозов постройки 2011-2021 года отношение  $H/T$  на 39% больше, чем у контейнеровозов постройки 80-ых годов XX и на 15% больше, чем у контейнеровозов постройки 2000-2010 год. Это позволяет констатировать, что у нового поколения судов лучше остойчивость и это оправдывает стремление увеличивать высоту борта и осадку.

Чем больше отношение длины к осадке ( $L/T$ ), тем больше повышается устойчивость на курсе и ухудшается поворотливость. Среднее значение отношения  $L/T$  контейнеровозов постройки 80-ых годов XX века равно 16,63; контейнеровозов постройки 2000-2010 года – 23,10; контейнеровозов постройки 2011-2021 года – 25,07.

На рис.9 представлена диаграмма изменения соотношения длины судна к осадке  $L/T$  контейнеровозов постройки 80-ых годов прошлого века и начала XXI века (2000-2006 годы). На рис.10 показана диаграмма изменения соотношения  $L/T$  контейнеровозов постройки 2000-2010 и 2011-2021 годов.

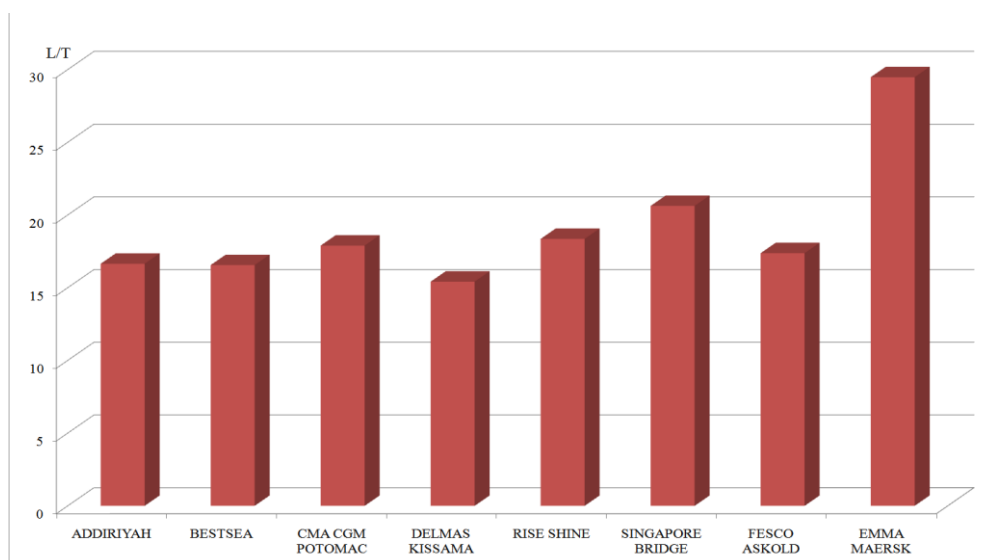


Рис.9. Диаграмма соотношений размеров  $L/T$  контейнеровозов 80-ых годов XX века и начала XXI века постройки

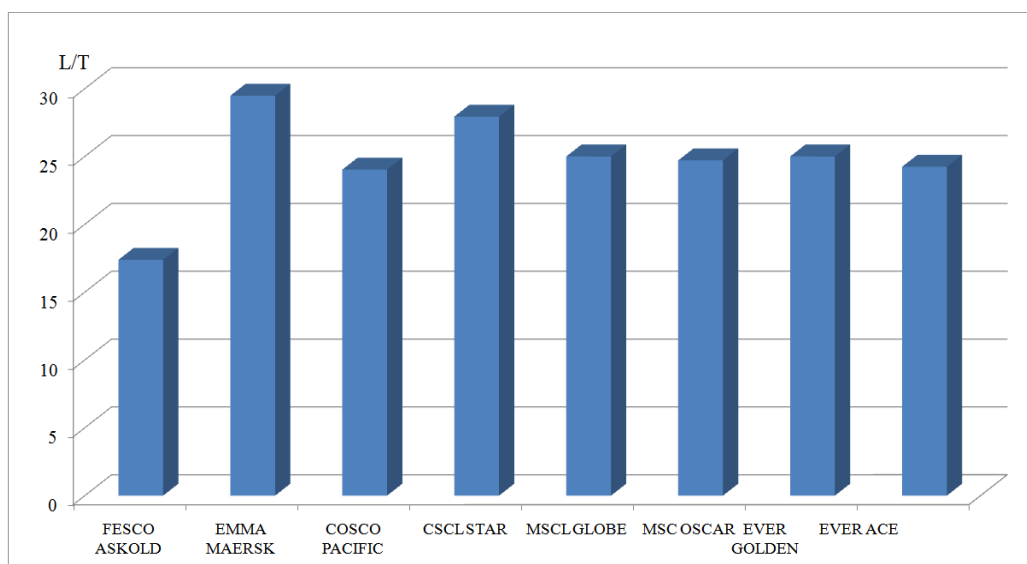


Рис.10. Диаграмма соотношений размеров  $L/T$  контейнеровозов постройки 2000-2010 и 2011-2021 годов

Произведенные расчеты показывают, что отношения  $L/T$  у контейнеровозов постройки 2011-2021 года на 34% выше, чем контейнеровозов постройки 80-ых годов XX и на 9% выше, чем у контейнеровозов постройки 2000-2010 года. Чем больше коэффициент управляемости, тем лучше устойчивость судна на курсе и наоборот. Чувствительность к изменению курса лучше у судов с меньшим коэффициентом, поэтому крупные контейнеровозы ограничены в маневренности при стесненных условиях плавания.

В табл.2 представлены сводные данные по соотношениям главных размерений контейнеровозов в зависимости от года постройки.

Таблица 2

### Соотношение главных размерений контейнеровозов

Соотношения главных размерений	Средние значения по годам постройки контейнеровозов		
	1980-2000	2000-2010	2011-2021
<i>L/B</i>	6,52	7,28	6,82
<i>B/T</i>	2,55	3,19	3,68
<i>L/H</i>	13,78	12,93	12,22
<i>H/T</i>	1,25	1,79	2,06
<i>L/T</i>	16,63	23,10	25,07

Проведенный анализ зависимости соотношений *L/B*, *B/T*, *L/H*, *H/T*, *L/T*, определяющих мореходные качества, показал оптимальное нахождение этих коэффициентов в определенных диапазонах с одними значениями, характерными для малых судов, и другими значениями, характерными для контейнеровозов с большой контейнеровместимостью.

Полученные расчетным путем коэффициенты, определяющие мореходные качества по эксплуатируемым контейнеровозам, позволяют подобрать наилучшие главные размерения – длину, ширину, осадку, высоту надводного борта и их соотношение при постройке контейнеровозов новых типов, которые обеспечат безопасные мореходные качества при необходимой контейнеровместимости.

Однако необходимо учитывать, что возможности увеличения контейнеровместимости не безграничны. Морские проливы, каналы с ограниченными размерами шлюзов и порты с ограниченными глубинами на фарватерах и у причалов накладывают ограничения на рост главных размерений контейнеровозов.

Для успешной эксплуатации все более крупных контейнеровозов создаются региональные межнациональные порты, возводятся крупные терминалы с мощной погрузо-разгрузочной техникой. В качестве таких портов можно назвать Роттердам в Европе, Сингапур и Гонконг в Азии, Лонг-Бич и Лос-Анджелес на западном побережье США и Нью-Йорк на восточном побережье. В целом обработкой контейнеров занимается более 800 портов, в мире насчитывается 2400 контейнерных причалов с суммарной длиной причальных стенок более 600 км. Но далеко не все эти порты могут принимать для обработки современные крупнотоннажные суда. Порты должны поспевать за развитием мировой торговли и мировых перевозок. В настоящее время эта проблема реально решается только в Китае. В других странах многие порты практически не готовы к принятию огромных объемов контейнеров.

Целесообразность гигантских размеров контейнеровозов неоднократно подвергалась сомнениям, в особенности после инцидента в Суэцком канале. Некоторые в этом увидели знак, что слишком большие суда ставят под угрозу надежность цепочек поставок, качество и безопасность судоходства.

Так, по Суэцкому каналу могут пройти суда осадкой не более 20 метров или дедвейтом до 240 тыс. тонн, над поверхностью воды они могут возвышаться не более чем на 68 метров (канал пересекают несколько мостов); их ширина не может быть больше 77,5 метра. Суда, размеры которых находятся вблизи этих параметров, но не превышают их, называются Suezmax. Все, что значительно крупнее идет в обход Африки [9,10].

С учетом опыта эксплуатации судов других типов и ограничений, касающихся подходов каналов, портовой инфраструктуры и судостроительных предприятий, можно полагать, что контейнеровозы, вероятно, достигли максимальных размеров.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аварии с контейнерами // Электрон. дан. Режим доступа URL: <https://news.ati.su/article/2016/01/25/avarii-s-kontejnerami-651531/> (дата обращения 02.06.2022).
2. Обзор морского транспорта, 2020 год // Электрон. дан. Режим доступа URL: [https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2020summary\\_ru.pdf](https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2020summary_ru.pdf). (дата обращения 12.05.2022).

3. Обзор морского транспорта, 2018 год // Электрон. дан. Режим доступа URL: [https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2018\\_ru.pdf](https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2018_ru.pdf) (дата обращения 02.03.2022).
4. Самые большие корабли в мире 2021 // Электрон. дан. Режим доступа URL: <https://maritime-zone.com/news/view/samyebolshiekorabli-v-mire-2019> (дата обращения 23.03.2022).
5. Главные морские происшествия 2021 года // Электрон. дан. Режим доступа URL: <https://maritime-zone.com/news/view/glavnyemorskiesproisshestvija-2021-goda> (дата обращения 23.03.2022).
6. Авария контейнеровоза «Эвер Гивен» // Электрон. дан. Режим доступа URL: <https://ru.wikipedia.org/> (дата обращения 23.05.2022).
7. Кулагин В.Д. Теория и устройство промысловых судов: Учебник. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Судостроение, 1986. – 392 с.
8. Коваленко Б.П. Основы остойчивости судна. Пособие для судоводителей – СПб.: Судостроение, 2005. – 36 с.
9. Логачев С.И., Чугунов В.В., Горин Е.А. Мировое судостроение современное состояние и перспективы развития. – СПб.: Мор Вест, 2009 год.– 538 с.
- 10 Проблемы ультрабольших контейнеровозов. Морской флот №6 (2016) // Электрон. дан. Режим доступа URL: <http://www.morvesti.ru/analitika/1689/64693/> (дата обращения 14.06.2022) .

## **NFLUENCE OF INCREASING THE MAIN DIMENSIONS OF CONTAINER CARRIERS ON THEIR SEA-KEEPING PROPERTIES**

Yakuta Irina Vladimirovna, candidate of technical sciences, associate professor department of navigation and safety of navigation

Baltic Fishing Fleet State Academy FSBEI HE "KGTU",  
Kaliningrad, Russia, e-mail: yakuta@bgarf.ru

*The article studies the influence of increasing the ratio of the main dimensions of container ships of different years of construction on their seaworthiness. Analysis showed that the ratio of the main dimensions of the new container ships is almost equal to this ratio for ships built at the end of the last century. Possibilities of increasing main dimensions of container ships are not unlimited. Sea straits, channels with limited locks and ports with limited depth in the fairways and berths impose restrictions on the growth of the main dimensions of container ships, so we can assume that container ships probably reached the maximum size.*

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

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

УДК 623.827.6

### ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПОДВОДНОМ КОМПОЗИТНОМ КОРАБЛЕСТРОЕНИИ

<sup>1</sup>Дектярев Александр Владимирович, специалист по менеджменту качества, внешнему аудиту поставщиков, развитию производственной системы и инновациям

<sup>2</sup>Петров Сергей Афанасьевич, д-р техн. наук, главный научный сотрудник

<sup>3</sup>Зобов Павел Геннадьевич, магистрант

<sup>4</sup>Морозов Владимир Николаевич, канд. техн. наук, проф. кафедры кораблестроения

<sup>1,2</sup>АО СПМБМ «Малахит», Санкт-Петербург, Россия, e-mail: <sup>1</sup>nwasanches@mail.ru

<sup>3</sup>Институт судостроения и морской арктической техники, Северодвинск, Россия, e-mail: <sup>3</sup>pavelzobov98@mail.ru

<sup>4</sup>ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет», Калининград, Россия, e-mail: <sup>4</sup>mvn3613@gmail.com

*Целью работы является исследование перспектив применения аддитивных технологий при проектировании и изготовлении подводной техники из полимерных композиционных материалов (пластмасс). В качестве методов исследований использованы: инструмент бенчмаркинг, анализ имеющихся публикаций, опыт работы с аддитивными технологиями в судостроительной отрасли, наблюдения, опросы и пр. Рассмотрены примеры использования традиционных полимерных композиционных материалов в подводном кораблестроении, примеры полимерной 3D-печати корпуса подводной лодки, корпусов и элементов автономных подводных аппаратов и т. д.*

#### Введение

Аддитивные технологии являются важной составляющей перехода к Индустрии 4.0, в направлении которой движется отрасль тяжелого машиностроения. В судо- и кораблестроении, как секторах гражданского и военного строительства сложных технических сооружений, сдерживание аддитивных технологий и материалов аддитивного производства происходит за счет проблем их стандартизации и сертификации в отрасли [1, 2].

Полимерные композиционные материалы также занимают важную часть в современном кораблестроении. На данный момент имеются примеры использования аддитивных технологий, работающих с подобными материалами, при изготовлении, как изделий (частей) судовой машиностроительной части [3, 4], судовых систем и механизмов [5, 6], моделей для гидродинамических испытаний [7], так и корпусов маломерных судов [8]. Однако, большинство примеров сосредоточено, в основном, на надводном судо- и кораблестроении, что оставляет вопрос о применимости аддитивных технологий и полимерных композиционных материалов при изготовлении подводных объектов морской техники открытым.

# 1. Примеры использования полимерных композиционных материалов в подводном кораблестроении

## 1.1 Корпусные конструкции подводных лодок [9]

Известно, что полимерные композиционные материалы в подводном кораблестроении впервые были применены в 1954 году в США в рамках программы по увеличению сроков эксплуатации подводных лодок. На подлодках из подобных материалов выполняются элементы надстроек, обтекатели акустических антенн и выдвижных устройств, рули, стабилизаторы, гребные винты, фрагменты линий валов, ракетные шахты, емкости для хранения сжатого воздуха и пр.

Примеры изделий, изготовленных из композитных материалов, показаны на рисунках 1 и 2. В частности, на рисунке 1 представлен стеклопластиковый носовой обтекатель атомной подводной лодки США «Virginia». Обтекатель выполнен без ребер жесткости, обладает длиной 6 м, опорным диаметром 8 м и массой около 25 т. Также, на «Virginia» из композитных материалов изготовлен комплекс бортовой антенны LWVAA, состоящий из двух боковых обтекателей и центральной части (обтекателя и фундамента-пластины).

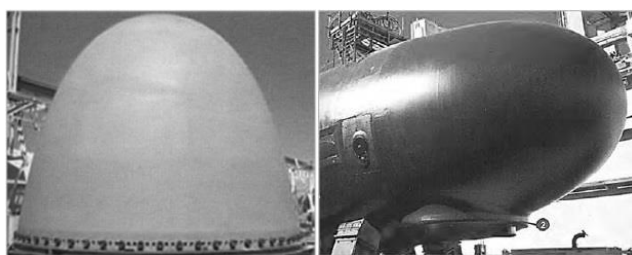


Рис.1. Носовой обтекатель атомной подводной лодки «Virginia» [9]

Начиная с «Virginia», где из полимерных композиционных материалов были изготовлены носовой обтекатель, кормовой конический обтекатель мортиры вала, крыльчатки центробежного циркуляционного насоса, крышки лючков, решетки забортных отверстий и циркуляционных трасс, применение подобных материалов, ввиду их экономической целесообразности, легкости, прочности, было растрежировано на другие проекты подводных лодок. Так, на рисунке 2 показан пример использования полимерных композиционных материалов при изготовлении палубы надстройки и обтекателя выдвижных устройств проекта 209/1400 ВМС Бразилии. Вся надстройка, а также носовая и кормовая части ограждения выдвижных устройств выполнены из стеклопластика и обладают толщиной 40 мм в носовой секции, 100 мм в горизонтальной части.



Рис.2. Носовая секция надстройки подводной лодки проекта 209/1400 ВМС Бразилии

## 1.2 Системы, механизмы (устройства) подводных лодок [9, 10]

Первый гребной винт из углепластика, который был разработан фирмой HDW для подводной лодки типа 206А ВМС Германии, показан на рисунке 3. Винты этой серии, на испытаниях демонстрировали хорошие акустические характеристики, и пример винта, более усовершенствованный и габаритный, был поставлен на подводную лодку типа 212А.



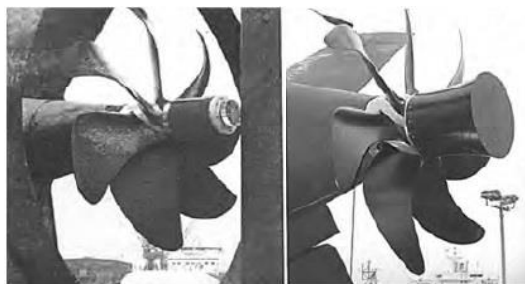


Рис.3. Гребные винты из углепластика подводной лодки проекта 206А (слева) и 212А (справа) [9]

В АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» конструкционные материалы используются при изготовлении аварийно-спасательных буй (рисунок 4), которые устанавливаются на подводные лодки и в случае аварийной ситуации, всплывают на поверхность для подачи сигнала. Корпус данного устройства изготовлен из сферопластика, обладает малой плотностью и высокой прочностью, что позволяет снизить массу и увеличить плавучесть.



Рис.4. Аварийно-спасательный буй [10]

### 1.3 Подводные автономные необитаемые аппараты [11-14]

В РФ, одной из структур, занимающихся исследованиями, проектированием некоторых систем и опытной эксплуатацией автономных необитаемых подводных аппаратов является АО «Концерн НПО «Аврора» [11]. В 2018-2019 г.г. подводные аппараты, изготовленные в АО «Концерн НПО «Аврора», прошли полный цикл функционирования на собственных стендах концерна, гидродинамические испытания в опытовом бассейне АО «Концерн «Океанприбор», полигонные испытания на Ладужском испытательном полигоне Карельского филиала АО «Концерн «Океанприбор» и Черноморском полигоне на базе ВЧ 80367. Результаты испытаний показали высокие мореходные качества аппарата, подтверждена правильность основных принятых технических и конструкторских решений.

В работе [12] собран отчет об испытаниях (преимущественно – в США) многочисленных наработок по полимерным композитным корпусам необитаемых автономных аппаратов. Выделяется опыт создания автономного подводного аппарата «Seaglider» из углеродного волокна/эпоксидной смолы, способный опускаться до 6000 м и выдерживать нагрузку до 70 МПа [12]. Стоит отметить и другие разработки, например, автономный подводный робот из ПТФЭ с толщиной корпуса в 10 мм [13] и автономный подводный робот производства Загребского университета с габаритами 1,05x0,5x0,21 м, максимальной глубиной погружения 150 м и давлением 1,5 МПа [14] (рисунок 5).

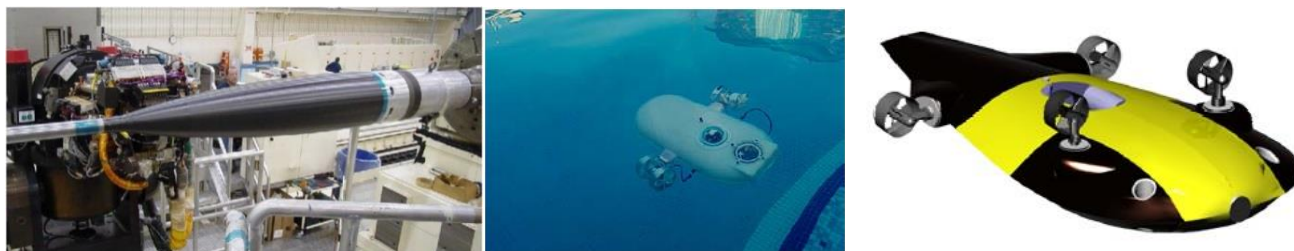


Рис.5. Примеры композитных подводных аппаратов: слева-направо – формирование корпуса «Seaglider» [12], испытания аппарата из ПТФЭ [13], аппарат из Загребского университета [14]

### 1.4 Двухсредные автономные необитаемые аппараты [15, 16]

Известен опыт создания необитаемых аппаратов, способных двигаться как в водной, так и в воздушной средах. Первые проекты подобного типа были изготовлены в середине 20-го века и получили название летающих подводных лодок (летающая подводная лодка Ушакова, американский RFS-1 и пр.). На сегодняшний день, серийного выпуска подобных аппаратов нет, а к самым известным моделям можно отнести аппараты типа «Naviator», «SubMurre», «Loon Copter» (рисунок 6).



Рис.6. Примеры двухсредных беспилотных летательных аппаратов – слева-направо: «Naviator», «SubMurre», «Loon Copter» [15, 16]

## 2. Примеры использования аддитивных технологий в полимерном подводном кораблестроении

### 2.1 Корпус подводной лодки [17, 18]

Имеется опыт 3D-печати корпуса композитной подводной лодки [17, 18] (рисунок 7). Корпус длиной более 9 м изготовлен из углеродного волокна из 6 деталей по технологии крупногабаритной 3D-печати (big area additive manufacturing, BAAM) и предназначен для перевозки «морских котиков» армии США. Традиционные методы изготовления такого корпуса требуют 600-800 тыс. долл. США и 3-5 месяцев работы. 3D-печать позволила сократить время производства до нескольких недель и снизить себестоимость примерно в 10 раз.



Рис.7. Корпус напечатанной подводной лодки [17]

### 2.2 Подводные автономные необитаемые аппараты [11, 19]

На вышеупомянутом предприятии АО «Концерн НПО «Аврора» при создании современных автономных подводных аппаратов активно применяется физическое моделирование и прототипирование технических решений с использованием 3D-принтеров, для чего был создан специальный технологический участок. Создание подобного участка способствовало тому, что для описанных в [11] энергоустановок, которые поставляются на подводные аппараты, отсутствует зависимость от импортных комплектующих.

В примере [19] методом послойного наплавления (FDM) из полилактида (PLA) были изготовлены отдельные части автономного необитаемого подводного аппарата (рисунок 8), такие как герметизирующие крышки и конструкции механических элементов и корпусов, в которых расположены электронные компоненты и системы питания. Конструкция аппарата прошла циклы испыта-

ний на герметичность и численно-экспериментальные исследования устойчивости при всестороннем трехосном сжатии.

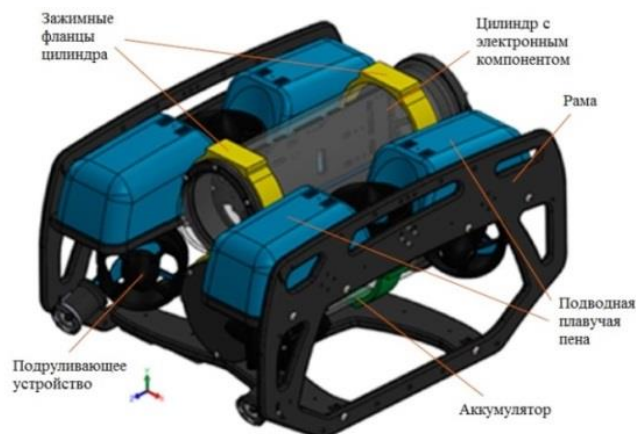


Рис.8. 3D-модель автономного подводного робота с частями из PLA [18]

### 2.3 Двухсредные автономные необитаемые аппараты [15, 16]

При создании двухсредных автономных необитаемых подводных аппаратов также активно используются аддитивные технологии. В примерах [15, 16] корпус аппарата, консоли, крышки и крепёжные детали изготавливались методом FDM из PLA ввиду его нетоксичности, минимальной усадки, гладкой поверхности, легкоокрашиваемости, подверженности механической обработке и стойкости к большинству растворителей.

Данный аппарат состоит из герметичного корпуса, выполненного в форме профиля крыла с переменной высотой, переходящего в два профиля, которые образуют два крыла и консолей, имеющих возможность поворота вокруг поперечной оси, снабженные электродвигателями с воздушными винтами.

Корпус аппарата был разделен на 12 деталей, крышки – на 2 детали, консоли – единая деталь, все соединения – клеевые (рисунок 9).

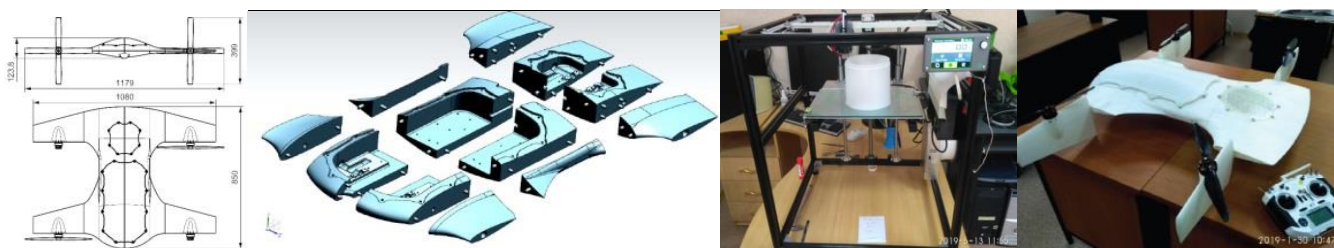


Рис.9. Двухсредный беспилотный аппарат: срез по жизненному циклу от проектирования до изготовления [15, 16]

### 2.4 Изделия судовой машиностроительной части [20]

В настоящее время вопрос применения композитных изделий, полученных методами аддитивного производства, прорабатывается в АО «ПО «Севмаш». В рамках опытной работы на предприятии установлены 3D-принтеры, работающие по технологии MJM и FDM. MJM-принтер используется конструкторской службой предприятия для создания масштабных моделей сложных механизмов (рисунок 10), что помогает в наглядной демонстрации их работы на предмет выявления отклонений [20]. Помимо функций моделирования технология также используется для создания прототипов деталей сложных механизмов. Использование прототипирования позволяет сократить сроки проектирования сложных механизмов на 10-12%.

Технология FDM в свою очередь штатно используется композитным производством предприятия. Основное направление работ – создание вспомогательной оснастки и импортозамещение



элементов зарубежного производственного оборудования. Проработка вопросов изготовления изделий для основных заказов ведется, однако ограничена отсутствием требуемой нормативной базы для внедрения данных изделий.



*Рис.10. Пример 3D-модели изделия, разработанного специалистами АО «ПО «Севмаш», для последующего аддитивного производства*

### *2.5 Организация 3D-печати деталей на борту [9, 17, 20]*

Пример печати на борту корабля, а также развернутое описание печати деталей двигателей описан в [17]. На борту были напечатаны торцевые сопла порошкового огнетушителя, рукоятки токарных станков, крепления предохранителей на DIN-рейке, кронштейны поручней для поста управления двигателем (рисунок 11).



*Рис.11. Компоненты, напечатанные на борту корабля [17]*

В аналитическом представлении работы 3D-принтера на борту подводного корабля [21], являющегося схожим по анализу возможностей работы аддитивных технологий на борту надводных кораблей и судов [22-24], приводится пример, когда у условной подводной лодки во время разведывательной миссии происходит отказ двигателя. Предполагается, что запасных частей не имеется, а оперативная помощь других кораблей не представляется реальной. Тогда, теоретически, возможно осуществление взаимодействия аддитивных технологий (печать деталей на борту), IT-технологий (сигнал о местонахождении/координатах корабля) и автономных аппаратов (для доставки необходимых деталей с суши). Данный пример интересен тем, что изучение приведенного вероятного сценария может привести к пониманию того, как высокотехнологичные технологии, такие как робототехника, 3D-печать и цифровизация, могут существенно повысить живучесть корабля.

### **3. Анализ применяемости аддитивных технологий в подводном композитном кораблестроении**

Исходя из представленных примеров, аддитивные технологии применимы при изготовлении корпусных конструкций небольших подводных лодок, корпусов подводных и двухсредных автономных необитаемых аппаратов, деталей механизмов и систем, а также при возможной печати изделий непосредственно на борту для осуществления ремонта.

Относительно последнего, стоит отметить, что при выполнении ремонтных работ методами аддитивных технологий, нужно понимать, в первую очередь, характер возникновения причины поломки. Например, повреждение компонентов судовых двигателей может быть вызвано трибологическими, эрозионными или коррозионными факторами [25]. В силу условий работы устройства такие повреждения чаще всего затрагивают узлы, работающие при высоких температурах, давлении, в агрессивных средах, взаимодействующие с другими деталями. К ним относятся гильзы и головки цилиндров, поршни, подшипники скольжения, шестерни, шейки валов, компоненты насосов, клапаны и пр. Также, необходимо учитывать, что срок службы восстановленных (отремонтированных) деталей судового двигателя должен соответствовать сроку службы новых деталей, причем, деталь должна выдерживать до шести процессов по ее восстановлению [26]. Обосновано выбирая материал и технологию 3D-печати, возможно воспроизведение представленных изделий методами аддитивных технологий. Однако анализ целесообразности ремонта методами 3D-печати зависит от его экономической эффективности (экономического эффекта), места выполнения, времени ремонта и срока службы изготавливаемого изделия. Эти параметры вызывают сомнения относительно реализации 3D-печати на борту ввиду необходимости наличия заранее подготовленной специализированной электронной базы данных деталей, сопутствующих подготовительных работ, наличия специализированного персонала по работе с устройством [27] и пр. Кроме того, реализация 3D-печати на борту подводного корабля связана с ограниченным пространством, колебаниями температур и воздействию вибраций. С учетом этого, инвестиции в дорогостоящие модели 3D-принтеров для поставки на борт корабля могут быть экономически не оправданы.

Исходя из анализа материалов, в настоящее время, для реализации концепции бортовой 3D-печати (бортовых 3D-принтеров) наиболее целесообразным представляется использование максимум двух известных устройств (3D-принтеров) закрытого типа, предпочтительно работающих по технологии FDM. Это является наиболее дешевым, универсальным и устойчивым решением при внедрении 3D-печати на борту с учетом ограничивающих факторов подобного процесса.

### **Заключение**

Использование инновационных конструкторских и технологических решений при проектировании и изготовлении объектов морской техники, в том числе, подводных аппаратов, позволяет достичь минимальных рисков при их эксплуатации.

При взаимодействии подводного кораблестроения и аддитивных технологий выделяется область небольших автономных подводных аппаратов. Использование аддитивных технологий при изготовлении автономных подводных аппаратов вкупе с развитием материаловедения на основе полимерных композиционных материалов делает их производство быстровоспроизводимым и способным к конструкторской трансформации. Также, аддитивные технологии перспективны при изготовлении единичных изделий, в том числе для оперативной замены составных частей аварийного оборудования. Разработка функционирующих образцов подводной техники, а также их компонентов с применением аддитивных технологий позволяет значительно расширить возможности изделия, упростить форму конечного объекта и повысить рентабельность его производства при единичном (несерийном) изготовлении.

С учетом вопросов стандартизации, сертификации и правового регулирования аддитивных технологий в отрасли кораблестроения, достаточно низких, по сравнению с полимерными композиционными материалами традиционного формования, прочностных характеристик, в настоящее время аддитивные технологии могут эффективно дополнять или заменять стандартные процессы в той или иной точке жизненного цикла, что позволяет перейти на инкрементное производство.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дектярев А.В., Морозов В.Н., Яфасов А.Я. Аддитивные технологии в судостроении: тенденции и правовое регулирование // Морские интеллектуальные технологии. 2019. Т.4, №4(46). С. 38-49.
2. Ferraris S. Aluminum alloys in third millennium shipbuilding: materials, technologies, perspectives // The 5<sup>th</sup> International Forum on Aluminum Ships. – Tokyo, 2005. – P. 1-11.
3. Дектярев А.В., Гришин П.Р., Морозов В.Н. Анализ применимости элементов объектов морской техники к аддитивному производству и их дальнейшие перспективы развития. Часть 2 // Материалы VII Международного Балтийского морского форума: Калининград, 2019. С. 111-118.
4. Дектярев А.В., Зобов П.Г., Гришин П.Р., Морозов В.Н. Анализ применимости элементов объектов морской техники к аддитивному производству и их дальнейшие перспективы развития (Часть 3) // Материалы IX Международного Балтийского морского форума: Калининград, 2021. С. 104-116.
5. Дорохов А.Ф., Абачараев М.М. Аддитивные технологии в производстве корабельной энергетики // Вестник АГТУ, сер. Морская техника и технология. 2015. №2. С. 42-47.
6. Киселева, А.Е. Применение аддитивных технологий при решении конструкторских задач в судостроении // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2017. №48-49. С. 84-88.
7. Зобов П.Г., Дектярев А.В., Морозов В.Н. Современные методы 3D-сканирования при размерном анализе судовых моделей с учетом их аддитивного изготовления // Известия КГТУ. 2019. №53. С. 151-161.
8. Дектярев А.В., Зобов П.Г. Технология изготовления корпуса маломерного судна методами аддитивного производства // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2022. Т.14 (4). С. 571-582.
9. Никитин В.С., Половинкин В.Н. Современное состояние и перспективы применения композитов в зарубежном подводном кораблестроении // Труды Крыловского государственного научного центра. 2017. Т.4 (382). С. 57-74.
10. Воронов А.С., Кондрашкин Г.Е. Перспективы применения композиционных материалов в приборах навигации // Альманах научных работ молодых ученых XLVII научной и учебно-методической конференции Университета ИТМО. 2018. Т.1. С. 138-141.
11. Мусатов Е.А., Рожков Ю.Е., Сурин С.Н. Создание в АО «Концерн «НПО «Аврора» перспективных морских робототехнических комплексов – автономных необитаемых подводных аппаратов // Системы управления и обработки информации. Вып. 1 (48). 2020. С. 21-35.
12. T.J. Osse, T.J. Lee. Composite pressure hulls for autonomous underwater vehicles. Oceans 2007. IEEE. 2007. P. 1-14.
13. A. Jebelli, C. Yagoub, S. Dhillon. Design and implementation of autonomous underwater vehicle (AUV) with PTEE. Advances in Robotics & Automation. 2018. Vol. 7 (1). P. 1-7.
14. S. Rudan, L. Drobilo. NFEM analysis of a composite made hull of autonomous underwater submersible. Brodogradnja/Shipbuilding. 2014. Vol. 65 (3). P. 101-115.
15. Солецкий В.В., Нюняйкина М.С., Перевалов А.А., Куриный В.В. Двухсредный беспилотный летательный аппарат // Науки и природе и технике. 2019. №II – 1 (38). С. 4-15.
16. Куриный В.В., Солецкий В.В., Лю Бинь. Особенности технологии изготовления корпусов двухсредных беспилотных аппаратов методом послойного наплавления FDM (fused deposition modeling) // Морские интеллектуальные технологии. 2021. №2. Т. 2. С. 34-41.
17. Ziółkowski M., Dyl T. Possible applications of additive manufacturing technologies in shipbuilding: a review. Machines. Vol. 8 (84). 2020. 34 p.
18. Radulov N. Additive technology and security 4.0. International Scientific Journal «Industry 4.0». Is. 6. 2019. P. 317-318.
19. A.G. Stefan, L.S. Grigore, S. Marzavan, I. Priescu, I. Oncioiu. Theoretical and experimental aspects regarding the forced mounting of a cylinder containing the electronics of a mini submarine. Journal of Marine Science and Engineering. 2021. Vol. 9 (855). P. 1-15.

20. Киселева А. Е. Применение аддитивных технологий при решении конструкторских задач в судостроении // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2017. №. 48-49. С. 84-88.
21. Dilipraj E. Inevitable warfare technologies: pragmatic role of robotics, 3D printing and super-computers in future wars. Asian Defence Review. 2016. P. 215-243.
22. Jha S.K. Emerging technologies: Impact on shipbuilding // Maritime Affairs: Journal of the National Maritime Foundation of India. 2016. Vol. 12, is. 2. P. 78-88.
23. Appleton R.W. Additive manufacturing overview for The United States Marine Corp // RWAppleton&Company. 2014. 26 p.
24. Шмелев, А.С. Экономическая эффективность использования аддитивных технологий в судостроении // Социально-экономические аспекты устойчивого развития бизнеса в будущем: сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции. – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью «Агентство международных исследований», 2018. – С. 134-136.
25. Bielawski P., Raunmiagi Z. Naprawy wybranych elementów okretowego silnika spalinowego // Problemy eksploatacji. 2007. P. 33-40.
26. Naak W. Reconditioning of Diesel Engine Components is it worth considering // Seminarium WSM w Szczecinie; Archbishop Seminary: Szczecin, Poland, 2001. P. 77–82.
27. Жернаков П.Б., Цыбин С.М. Особенности внедрения аддитивных технологий в систему войскового ремонта // Известия ТулГУ. Технические науки. 2017. Вып.6. С. 316-320.

## **PROSPECTS FOR THE USE OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN UNDERWATER COMPOSITE SHIPBUILDING**

<sup>1</sup>Dektyarev Alexander Vladimirovich, specialist in quality management, external audit of suppliers, development of the production system and innovation

<sup>2</sup>Petrov Sergey Afanas'evich, Doctor of Technical sciences, Chief Researcher

<sup>3</sup>Zobov Pavel Gennadievich, undergraduate

<sup>4</sup>Morozov Vladimir Nikolaevich, Candidate of Technical science, Professor

<sup>1,2</sup>St. Petersburg Marine Design Bureau "Malachite",  
St. Petersburg, Russia, e-mail: <sup>1</sup>nwasanches@mail.ru

<sup>3</sup>Institute of Shipbuilding and Arctic Marine Engineering,  
Severodvinsk, Russia, e-mail: <sup>3</sup>pavelzobov98@mail.ru

<sup>4</sup>Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia, e-mail: <sup>4</sup>mvn3613@gmail.com

*The purpose of the article is to study the prospects for the use of additive technologies in the design and manufacture of underwater equipment from polymer composite materials (plastics). The following research methods were used: a benchmarking tool, analysis of existing publications, experience with additive technologies in the shipbuilding industry, observations, surveys, etc. Examples of the use of traditional polymer composite material in underwater shipbuilding, examples of polymer 3D printing of a submarine hull, hulls and elements of autonomous underwater vehicles, etc.*

## ОПТИМИЗАЦИЯ ФУНДАМЕНТА ЦИСТЕРНЫ СУДНА МЕТОДОМ ГЕНЕРАТИВНОГО АНАЛИЗА

<sup>1</sup>Пинчук Владислав Игоревич, студент

<sup>2</sup>Романюта Дмитрий Александрович, аспирант кафедры кораблестроения

<sup>3</sup>Дмитриев Дмитрий Николаевич, студент

<sup>1,2,3</sup>ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,

Калининград, Россия, e-mail: <sup>1</sup>vladislav.pinchuk.kgtu@gmail.com; <sup>2</sup>dmitrij.romanyuta@klgtu.ru;

<sup>3</sup>dima-kola@bk.ru

*Использование аддитивных технологий, в совокупности с генеративным анализом, позволяет проектировать и создавать оптимизированные конструкции, с точки зрения весовых и прочностных параметров. Представлены примеры применения генеративного анализа в судостроительной отрасли. На примере фундамента цистерны пресной воды продемонстрированы процесс и результаты оптимизации исходной конструкции.*

### Введение

Современный подход к проектированию предполагает рациональное использование материалов в конструкции, обеспечивающее заданную прочность. В настоящее время широко применяются методы автоматизированного проектирования, позволяющие сократить время разработки изделия и более широко использовать возможности изготовления, как традиционными способами, так и с помощью аддитивных технологий.

Одним из таких способов является генеративный дизайн, позволяющий получить оптимальную форму изделия в заданных условиях эксплуатации.

Генеративное проектирование – это итеративный процесс проектирования. Инженер определяет входные данные, и накладывает ограничения. Геометрия детали не обязательна, но может использоваться как область, в рамках которой метод будет вести расчет. Результатом будет оптимизированная геометрия под заданные нагрузки (рис.1).

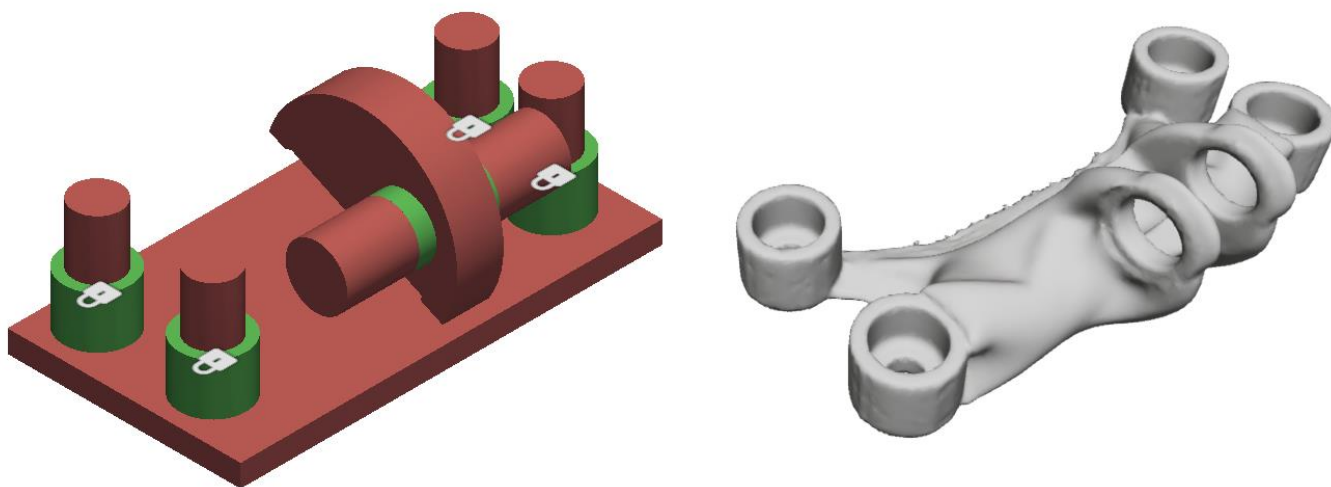


Рис. 1. Результат генеративного проектирования

С помощью генеративного анализа имеется возможность проектировать различные конструкции с оптимальными прочностными характеристиками, без существенных коэффициентов за-



паса. В этом случае, при выполнении анализа необходимо предусмотреть все возможные эксплуатационные и аварийные варианты нагружения.

Применения генеративного дизайна в судостроительной отрасли на данный момент практически не наблюдается, что обусловлено рядом причин: случайный характер внешних нагрузок, обеспечение водонепроницаемости основного корпуса, технология изготовления и др.

### Постановка задачи

Целью данной работы является оценка возможности использования генеративного анализа в судостроительной области, на примере оптимизации фундамента цистерны пресной воды на проектируемом судне пр. 19411.

### Исходные данные

Габаритный чертеж фундамента представлен на рис. 2. Материал фундамента - сталь А ГОСТ 5521-93[1]. Фундамент крепится к основному корпусу в местах, показанных на 3D модели ранее спроектированного фундамента под цистерну пресной воды, массой 1,0 т. - рис.3,4. Далее в расчете, эти места будут рассматриваться как жестко защемленные.

В качестве расчётной нагрузки рассматривается масса устанавливаемой цистерны (1,0 т) и собственный вес самого фундамента (97,0 кг). Масса цистерны равномерно распределена по верхней опорной части фундамента.

### Выполнение проверочного расчета

Конечно-элементный расчет исходной конструкции фундамента показал, что максимальные возникающие напряжения в конструкции составляют 25,4 МПа, а максимальные перемещения – 0,119 мм (рис.4).

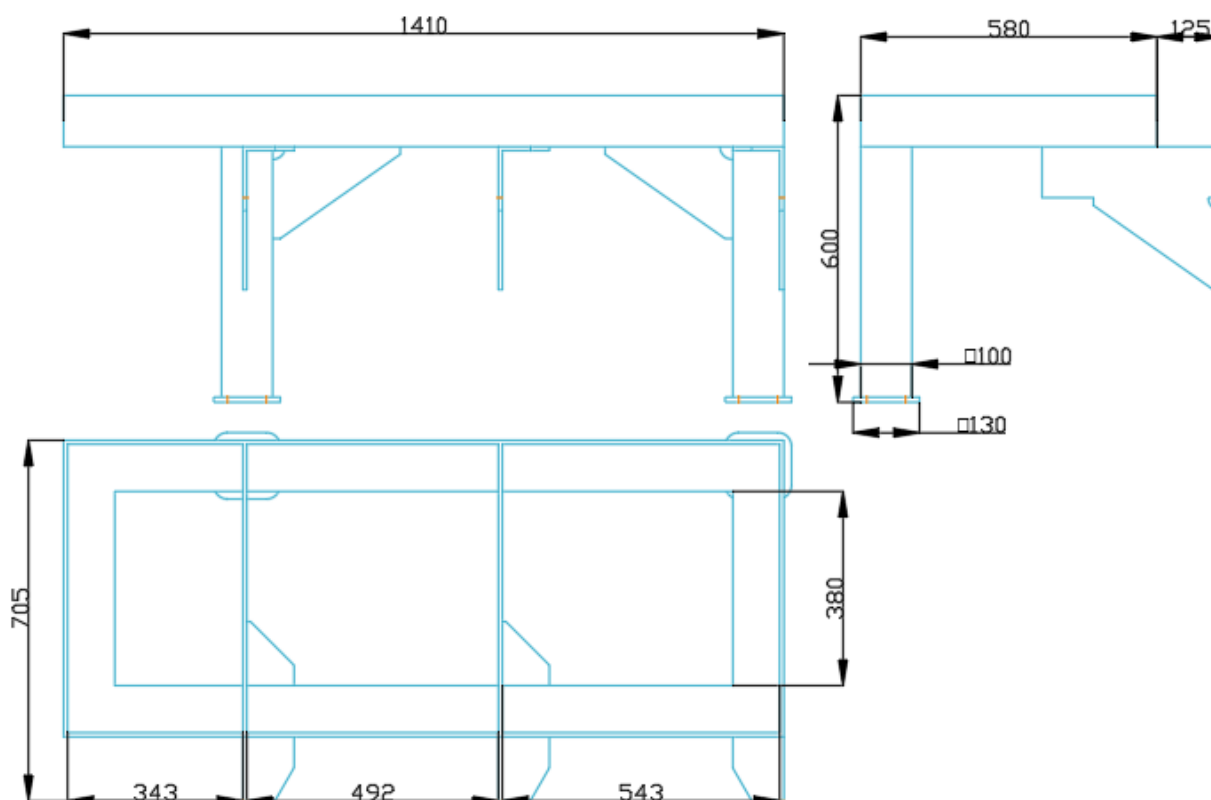


Рис. 2. Габаритный чертеж рассчитываемого фундамента

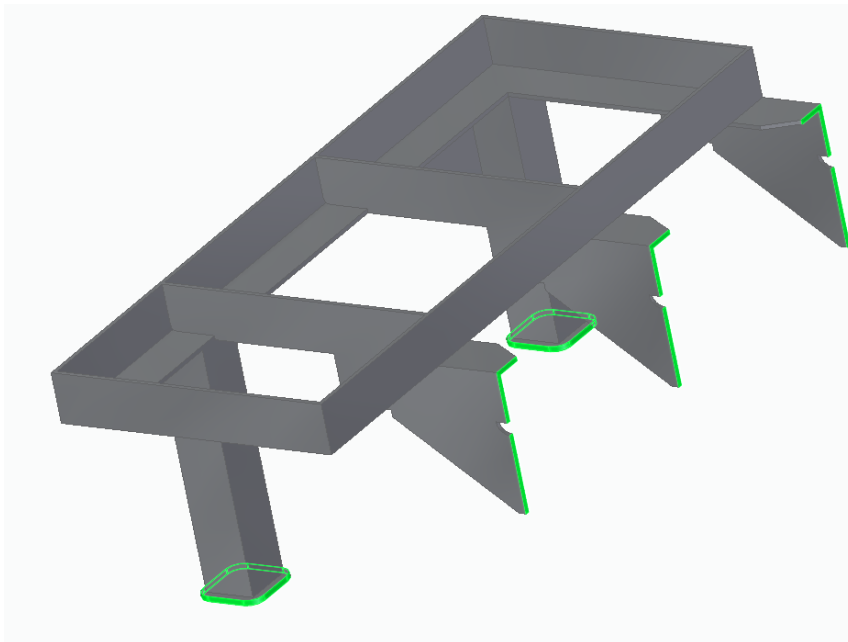


Рис. 3. Места крепления фундамента к основному корпусу

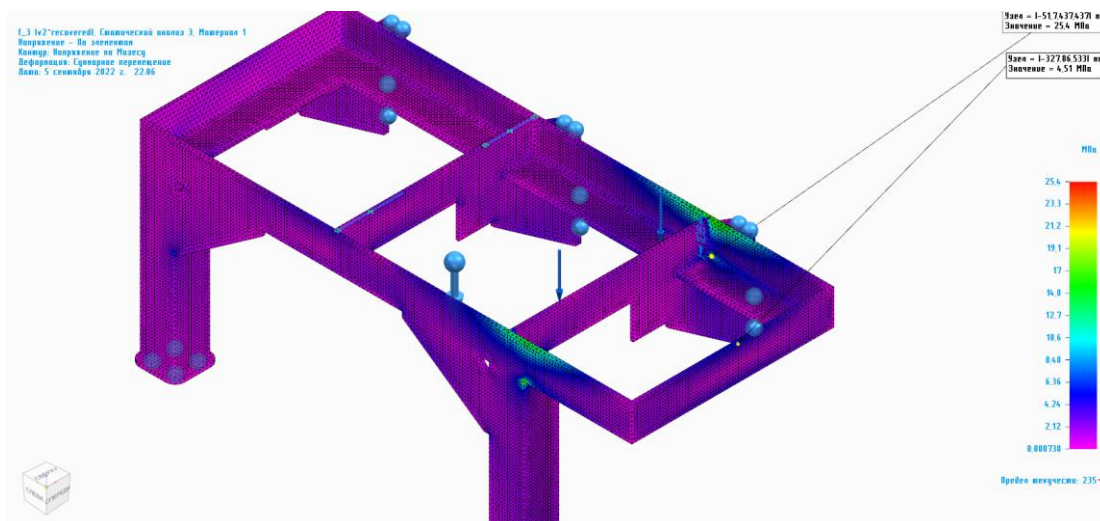


Рис. 4. Максимальные напряжения исходной конструкции

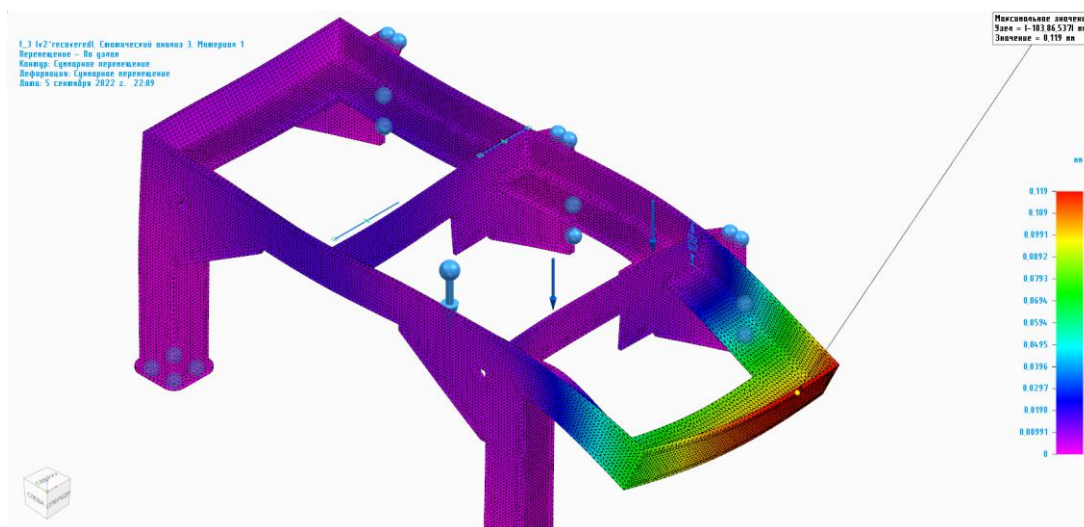


Рис. 5. Максимальные перемещения исходной конструкции

## Выбор критериев оптимизации

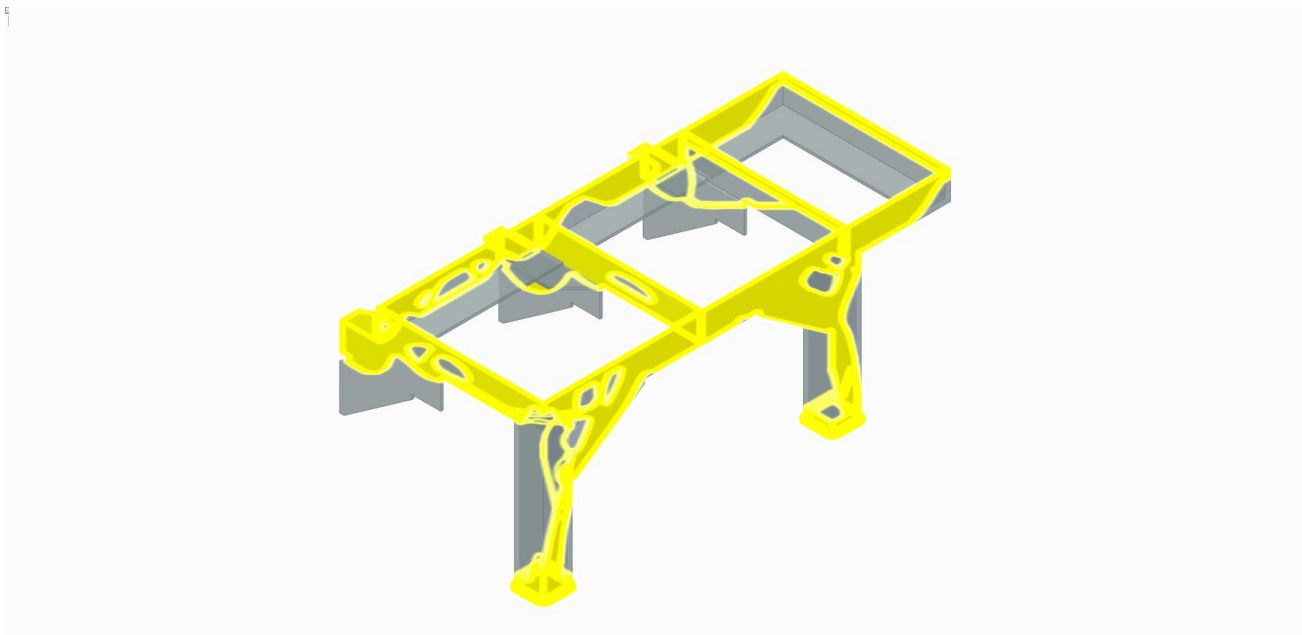
В качестве параметров оптимизации, при генеративном проектировании могут выступать допускаемые напряжения в конструкции или процент уменьшения массы. Как показывает опыт, при оптимизации по напряжениям полученные модели зачастую имеют нарушения в целостности геометрии, вследствие чего возникает невозможность построения корректной сетки для проверки прочности конечно-элементным расчетом. По этой причине оптимизация фундамента велась по критерию уменьшения массы. При этом учитывалось, что максимальные фактические напряжения в конструкции не должны превышать максимальных допускаемых по Правилам Российского Морского Регистра Судоходства (РМРС) - 140 МПа [2]. Были получены 3 варианта фундамента с уменьшением массы в 25, 50 и 75 процентов. Для построения модели и выполнения анализа использовалась система Solid Edge [3].

## Оптимизация рассматриваемого фундамента

Для моделей с уменьшением массы в 25 и 50 процентов рис.6,9 проводился конечно-элементный расчет, результаты которого представлены на рис.6-8 и 9-11.

Последующее увеличение параметра оптимизации до 75% привело к нарушению целостности полученного фундамента, как можно наблюдать на рис.12-13. В связи с тем, что использование подобной конструкции не представляется возможным, проверка ее прочности отдельным расчетом не проводилась.

Размер вокселя в генеративном анализе составлял 5,58 мм для всех моделей. Размер сетки для конечно-элементного анализа 11 мм.



*Рис.6. Сравнение геометрии модели с уменьшением массы на 25% по сравнению с исходной*

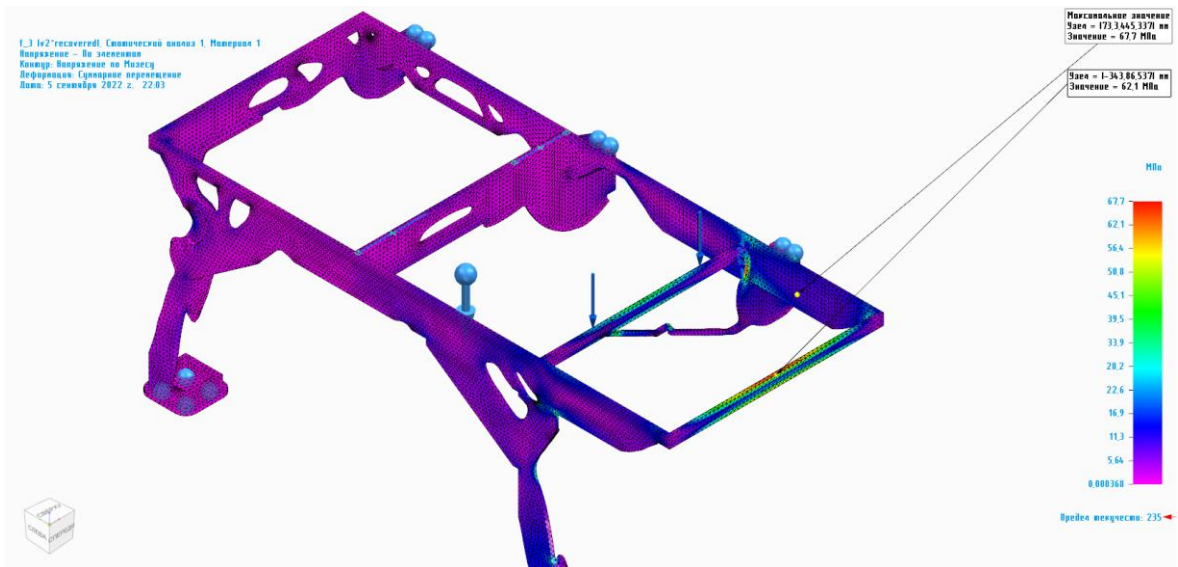


Рис. 7. Максимальные напряжения при уменьшении массы на 25%

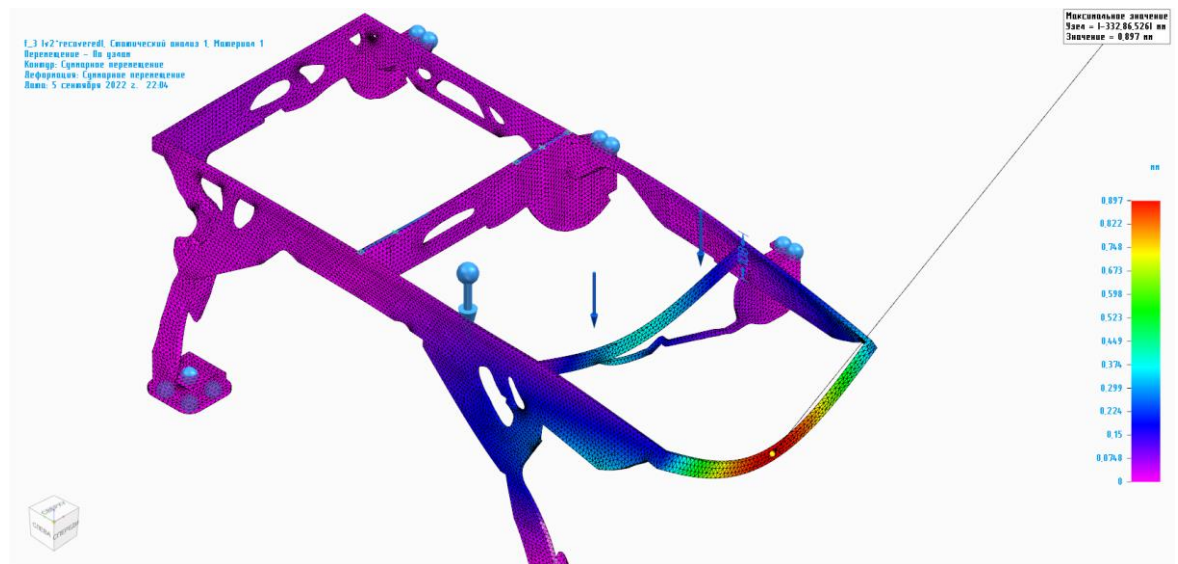


Рис. 8. Максимальные перемещения при уменьшении массы на 25%

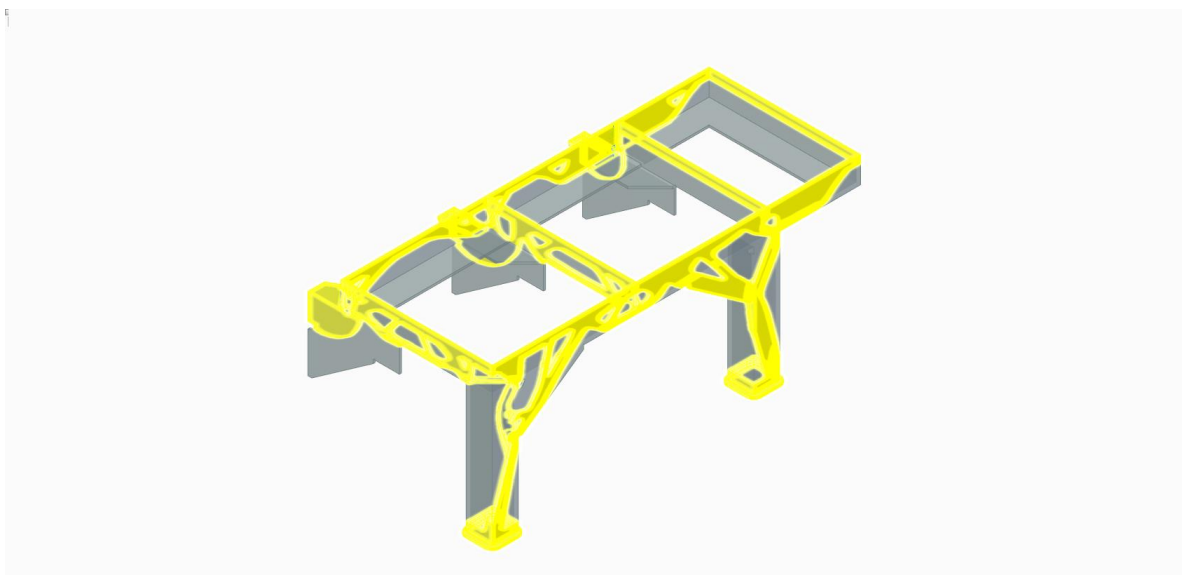


Рис.9. Сравнение геометрии модели с уменьшением массы на 50% по сравнению с исходной

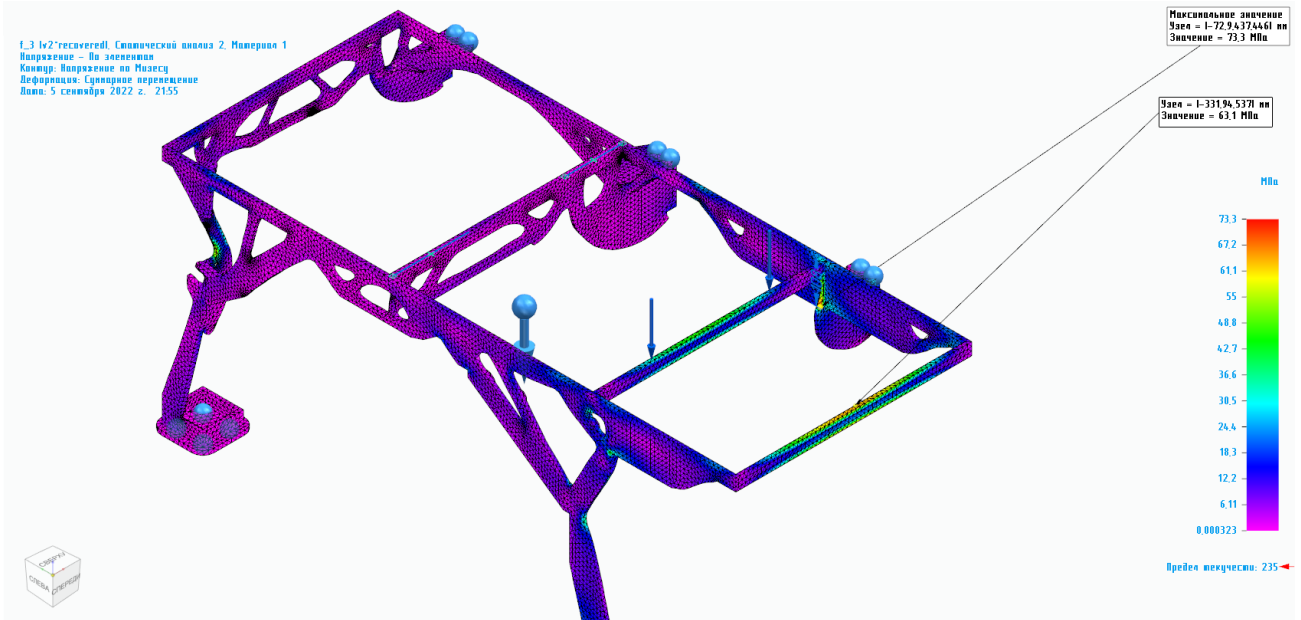


Рис. 10. Максимальные напряжения при уменьшении массы на 50%

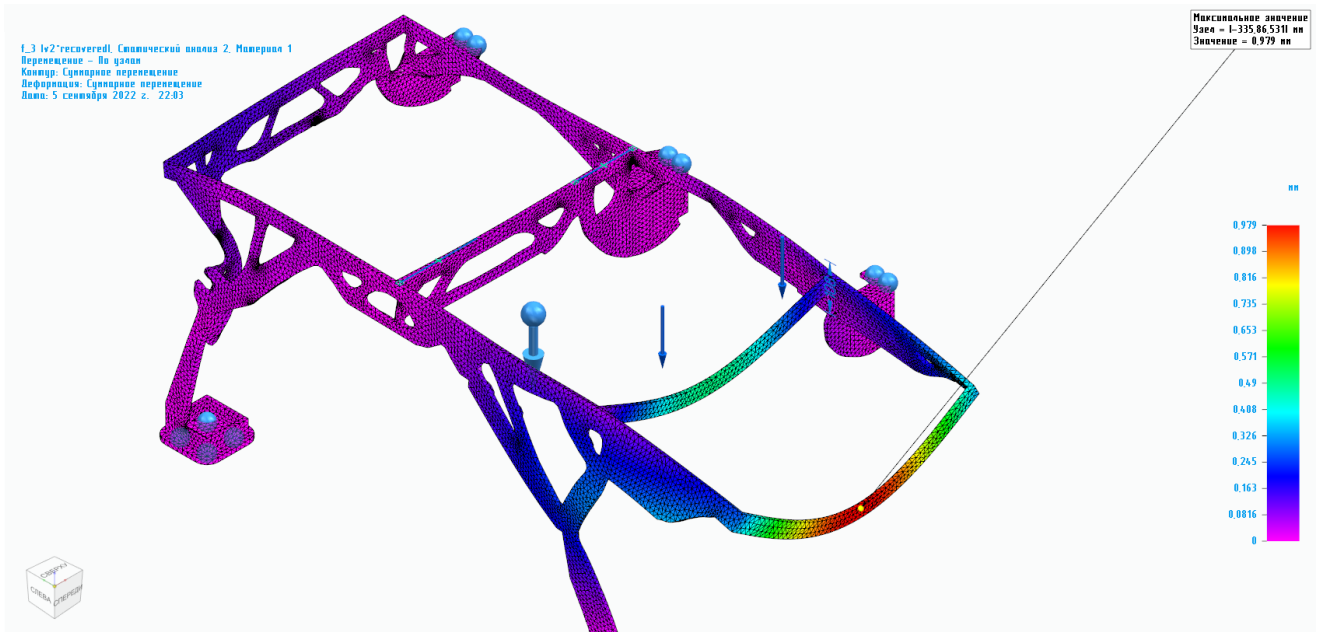


Рис. 11. Максимальные перемещения при уменьшении массы на 50%

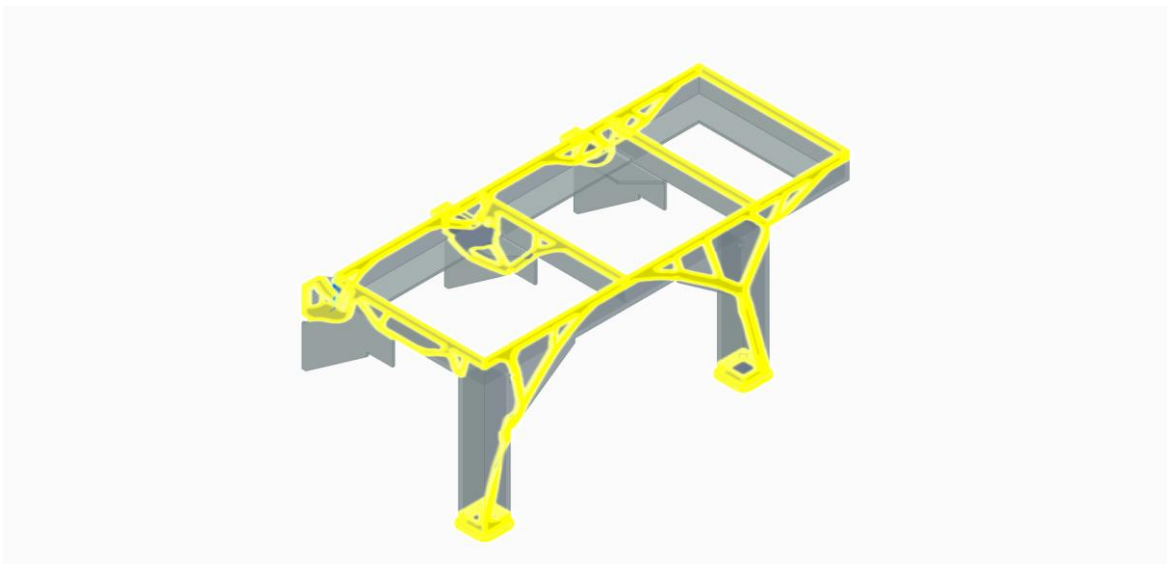


Рис.12. Сравнение геометрии модели с уменьшением массы на 75% по сравнению с исходной



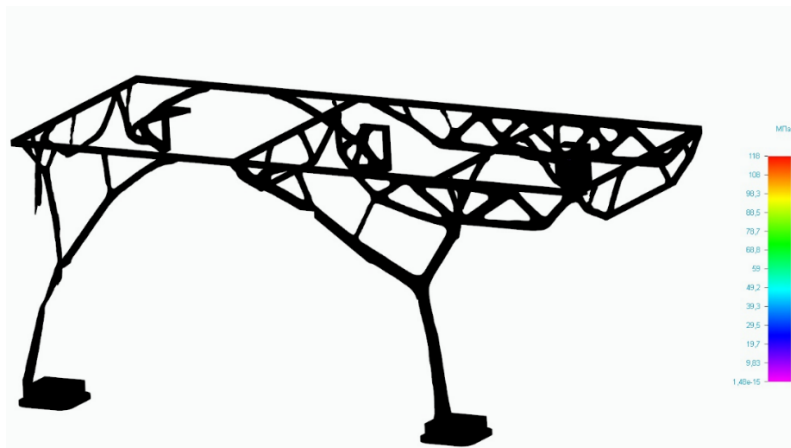


Рис. 13. Результат генеративного анализа при уменьшении массы в 75%

### Анализ полученных результатов

Результаты оптимизации представлены в таблице №1. При выборе точек максимального напряжения исключались точки сингулярности. Наибольшая нагрузка приходилась на консольный участок конструкции.

Таблица 1

### Результаты расчетов и оптимизации

Уменьшение массы	0%	25%	50%	75%
Максимальное напряжение, МПа	25,4	62,1	63,1	118,0
Максимальное перемещение, мм	0,119	0,897	0,979	-
Масса конструкции, кг	97,0	72,7	48,5	24,2

### Заключение

В результате работы была построена 3D модель фундамента под цистерну пресной воды для судна пр. 19411. Проведен проверочный прочностной расчет методом конечных элементов. Проверочный расчет показал, что спроектированный фундамент имеет большой запас прочности.

Выполнена оптимизация конструкции, исходя из допустимых напряжений, согласно [2].

При оптимизации конструкции с уменьшением массы в 25% и 50% полученная конструкция лишена разрывов и нарушений в геометрии.

При оптимизации конструкции с уменьшением массы в 75% наблюдается нарушение целостности геометрии, что не позволяет рассматривать полученную конструкцию, как вариант реального изделия.

Таким образом данный метод можно использовать для различных неответственных судовых конструкций испытывающие статические нагрузки. Однако, необходимо отметить, что для окончательного заключения о возможности использования полученной конструкции следует провести дополнительный расчёт стоек фундамента на потерю устойчивости.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ 5521 – 93 Прокат стальной для судостроения
- ОСТ5.1011 – 83 Фундаменты. Правила и нормы проектирования
- Основы конструирования в Solid Edge. Пособие по проектированию изделий в приборостроении. – М.: ДМК Пресс, 2014. – 272 с.: ил.
- Гришин Александр Владимирович Технология селективного лазерного спекания (SLS) // Научные исследования. 2017. №7 (18). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologiya-selektivnogo-lazernogo-spekaniya-sls-1> (дата обращения: 09.08.2022).

# OPTIMIZATION OF A SHIP TANK FOUNDATION BY THE METHOD GENERATIVE ANALYSIS

<sup>1</sup>Pinchuk Vladislav Igorevich, student

<sup>2</sup>Romanyuta Dmitry Alexandrovich, post-graduate student of the department of shipbuilding

<sup>3</sup>Dmitriev Dmitry Nikolaevich, student

<sup>1,2,3</sup>FSBEI HE "Kaliningrad State Technical University",  
Kaliningrad, Russia, e-mail: <sup>1</sup>vladislav.pinchuk.kgtu@gmail.com

*The use of additive technologies, in conjunction with generative analysis, makes it possible to design and create optimized structures in terms of weight and strength parameters. The paper presents examples of the application of generative analysis in the shipbuilding industry. On the example of the foundation of a fresh water tank, the process and results of optimizing the original design are demonstrated.*

УДК 629.5.015.4

## АНАЛИЗ КОЛЕБАНИЙ ОДНО- И ДВУХПРОЛЕТНЫХ БАЛОК НА УПРУГОМ ОСНОВАНИИ

Притыкин Алексей Игоревич, д-р техн. наук, профессор кафедры судостроения, судоремонта и морской техники

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

*В справочной литературе приводится расчетная зависимость для частот свободных колебаний однопролетных балок на упругом основании, но она относится только к шарнирно опертым балкам. В то же время в реальных конструкциях имеют место и другие виды закреплений. Проведен численный анализ методом конечных элементов свободных колебаний однопролетных и неразрезных балок с разным опиранием концов на упругом основании винклерового типа. Полученные данные позволили дополнить имеющуюся информацию по оценке частот свободных колебаний балок на упругом основании и показали высокую эффективность расчетов МКЭ по сравнению с аналитическим подходом, требующим последовательных приближений при расчете частот колебаний неразрезных балок.*

### 1. Расчет колебаний однопролетных балок

В справочниках [1, 2], как и в других публикациях [3 - 6] содержатся аналитические зависимости для собственных частот колебаний балок с разным видом закрепления концов только для балок без упругого основания. Для балок на упругом основании приводятся данные лишь для варианта шарнирного опирания. Это обусловлено трудностями аналитического решения задачи о колебаниях балки на упругом основании. Однако в судовых конструкциях возможны варианты различного сочетания граничных условий,

Целью данной работы было получение данных о частотах свободных колебаний балок на упругом основании с разным опиранием концов, а также неразрезных балок. Заодно ставилась задача оценить корректность имеющейся аналитической зависимости для частот свободных колебаний балок на упругом основании. Анализ проводился методом конечных элементов с использованием программного комплекса ANSYS, для чего была составлена программа на языке APDL, позволившая производить расчеты колебаний как однопролетных балок, так и неразрезных балок. Для

проверки надежности работы программы МКЭ были проведены контрольные расчеты однопролетных балок без упругого основания и при наличии его, для которых имеются теоретические решения.

### 1.1. Колебания балки без упругого основания

Балки являются наиболее часто применяемыми расчетными схемами при рассмотрении поперечных колебаний судовых конструкций. Рассмотрим призматическую балку симметричного коробчатого профиля, обозначаемую как  $l-h_w-t_w-b_f-t_f$ , где  $h_w$  - полная высота балки;  $b_f$  - ширина профиля;  $t_w$  и  $t_f$  - толщина стенок и полка соответственно. Для такой свободно опертой балки, как известно, частота собственных колебаний определяется зависимостью [1]

$$\omega_{c.o.}^{теор} = \frac{n^2 \pi}{2l^2} \sqrt{EI / m}, \quad (1)$$

где  $E$ ,  $I$ ,  $m$  - модуль Юнга, момент инерции сечения и погонная масса балки соответственно;  $n$  - номер тона колебаний. Для коробчатого сечения величину  $m$  можно представить в виде

$$m = b_f h_w (1 - (1 - 2t_f / h_w)(1 - 2t_w / b_f)) \rho, \quad (2)$$

где  $\rho$  - плотность материала балки. В дальнейших расчетах для стали будем принимать  $\rho = 7.8 \cdot 10^{-9} \text{ Нс}^2 / \text{мм}^4$ .

Момент инерции  $I$  коробчатой симметричной балки может быть подсчитан как

$$I = b_f h_w^3 (1 - (1 - 2t_w / b_f)(1 - 2t_f / h_w)^3) / 12. \quad (3)$$

Для свободно опертой коробчатой балки 5000-550-10-180-16мм расчет по (1) для первого тона колебаний, т. е. для  $n = 1$ , при величине модуля Юнга  $E = 210 \text{ ГПа}$  приводит к значению

$$\omega_{c.o.}^{теор} = \frac{3.14}{2 \cdot 5000^2} \sqrt{2.1 \cdot 10^5 \cdot 3.38 \cdot 10^8 / 6.41 \cdot 10^{-5}} = 66.1 \text{ Гц}. \quad (4)$$

Расчет МКЭ первого тона колебаний этой же балки с использованием конечных элементов типа Beam189 приводит к значению  $\omega_{c.o.}^{МКЭ} = 65.7 \text{ Гц}$  (рис.1а), что указывает на расхождение с  $\omega_{c.o.}^{теор} = 66.1 \text{ Гц}$  (4) в  $\delta = 0.6\%$ .

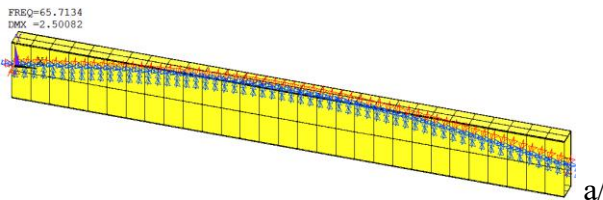
### 1.2. Колебания балки на упругом основании

#### 1.3.

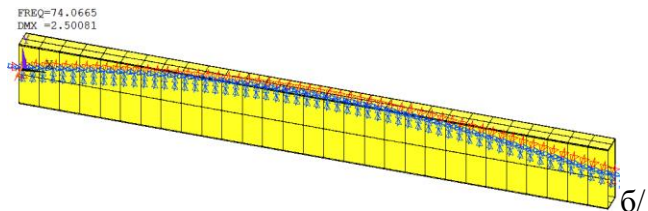
При наличии упругого основания зависимость для частоты колебаний шарнирно опертой балки примет вид [3]

$$\omega_{c.o.}^{упр} = \omega_{c.o.}^{теор} \sqrt{1 + kl^4 / (n^4 \pi^4 EI)}, \quad (5)$$

где  $\omega_{c.o.}^{теор}$  представляет собой частоту колебаний балки без упругого основания, определяемую по (1), а сомножитель в виде корня учитывает эффект упругого основания.



$$\omega_{c.o.}^{МКЭ} = 65.7 \text{ Гц}; \quad \omega_{c.o.}^{теор} = 66.1 \text{ Гц}; \quad \delta = 0.6\%$$



$$\omega_{c.o.}^{МКЭ} = 74.07 \text{ Гц}; \quad \omega_{c.o.}^{теор} = 74.6 \text{ Гц}; \quad \delta = 0.7\%$$

Рис.1. Частота колебаний шарнирно опертой балки размерами: 5000-550-10-180-16мм : а/ без упругого основания; б/ на упругом основании с коэффициентом жесткости  $k = 3 \text{ Н} / \text{мм}^2$

В выражении (5) величина  $k$  представляет собой коэффициент жесткости упругого основания, имеющий размерность модуля упругости. Для первой формы колебаний, т. е. для  $n = 1$ , при коэффициенте жесткости упругого основания  $k = 3 \text{ Н} / \text{мм}^2$  в соответствии с (5) получим



$$\omega_{c.o.}^{ymp} = 66.1 \sqrt{1 + 3 \cdot (5000^4 / 3.14)^4 / (2.1 \cdot 10^5 \cdot 3.38 \cdot 10^8)} = 74.6 c^{-1}. \quad (6)$$

При расчете МКЭ, в котором упругое основание описывалось конечными элементами SURF153, частота колебаний первого тона этой же балки приводит к значению  $\omega_{c.o.}^{MKЭ} = 74.07 Гц$  (рис.1,б), что указывает на расхождение с  $\omega_{c.o.}^{ymp} = 74.6 Гц$  (6) в  $\delta = 0.7\%$ . Проведенные выше расчеты фактически явились тарировочными, так как позволили убедиться в надежности работы программы МКЭ [7] как при отсутствии, так и наличии упругого основания, и показали, как это следует из (5), что наличие упругого основания повышает частоту колебаний, причем степень повышения, конечно же, зависит от жесткости упругого основания.

Рассмотрим теперь влияние граничных условий на частоту колебаний балки, размеры которой остаются неизменными, как и в предыдущих вариантах. При жесткой заделке на одном конце и свободном опирании на другом расчет МКЭ приводит к значению частоты колебаний первого тона  $\omega_{ж.ш.}^{MKЭ} = 103.1 Гц$  (рис.2,а). При наличии жестких заделок по концам получаем расчетом МКЭ величину  $\omega_{ж.ж.}^{MKЭ} = 137.1 Гц$  (рис.2,б). Из полученных результатов следует, что наличие жестких заделок на одном или двух концах балки приводит к повышению частоты колебаний балки на упругом основании примерно в 1.4-1.85 раза. Это расхождение существенно уменьшается с увеличением коэффициента жесткости упругого основания. Так, при  $k = 150 Н / мм^2$  расхождение в величинах частот при различных граничных условиях снижается до 3.5%, что сопоставимо с погрешностью инженерных расчетов.

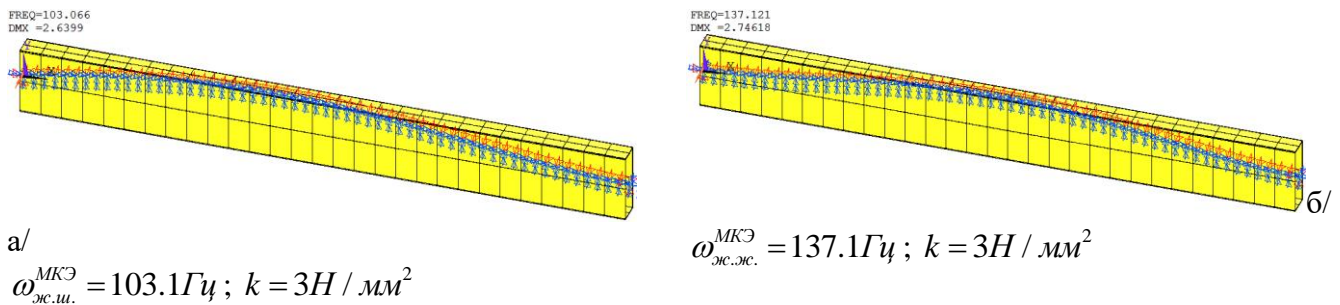


Рис.2. Частота колебаний балки на упругом основании размерами : 5000–550–10–180–16мм : а/ жесткая заделка на одном конце и шарнирная опора на другом; б/ жестко заделанная по концам

Следует отметить одну особенность расчетной зависимости (5). Для балок, лежащих на упругом основании с коэффициентом  $kl^4 / (\pi^4 EI) \geq 16$  расчетная зависимость (5) может быть упрощена путем отбрасывания единицы в подкоренном выражении. Тогда формула (5) для частоты свободных колебаний первого тона шарнирно опертой балки на упругом основании примет вид

$$\omega_{c.o.}^{теор} = 0.5 \sqrt{k / m} / \pi. \quad (7)$$

Характерно, что в этом случае частота колебаний не зависит ни от длины балки  $l$ , ни от формы сечения, определяемой моментом инерции  $I$ . Имеет значение только величина площади поперечного сечения, входящая в выражение  $m$ . Расчет по (7) приводит в этом случае к погрешности, не превышающей 3%.

Заметим, что в силу зависимости (5) соотношения между частотами однопролетных балок на упругом основании с разным опиранием концов будут зависеть от длины балки, хотя для балок без упругого основания это соотношение фиксировано. Так, произведя расчет колебаний балок на упругом основании удвоенной длины, получим данные, приведенные на рис.3, из которого видно, что соотношение частот первого тона при шарнирном опирании концов (рис,3а) шарнирном опирании одного конца и жесткой заделке другого (рис,3б) и при заделке обоих концов (рис,3в) будет равно 1:1,12:1,3.

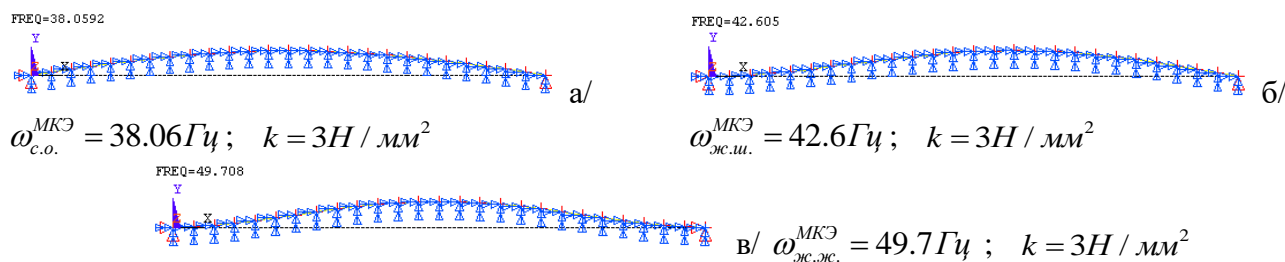


Рис.3. Частота колебаний балки на упругом основании размерами : 10000–550–10–180–16мм :  
 а/ шарнирное опирание по концам; б/ жесткая заделка на одном конце и шарнирная опора на другом; в/ жестко заделанная по концам

В то же время, для балки длиной в два раза меньше (рис.1б), (рис.2а) и (рис.2б) это соотношение будет 1:1,39:1,85. Для балки без упругого основания соотношение частот колебаний при аналогичном закреплении концов будет 1:1,54:2,19 [1] с небольшими отклонениями при изменении длин.

## 2. Колебания неразрезной балки на упругом основании

Большинство балок, работающих в составе судовых перекрытий, можно отнести к категории неразрезных, например, флоры, опирающиеся на стрингеры, или бимсы, опирающиеся на карленгсы. Аналитической зависимости для частот свободных колебаний неразрезных балок ни на упругом основании, ни без упругого основания нет. Дело в том, что решение уравнения частот указанной задачи производится методом последовательных приближений [3], что не позволяет получить решение в замкнутом виде.

Из численных методов решения можно отметить два метода: метод парциальных откликов [1] и метод конечных элементов [6]. В методе парциальных откликов для получения решения требуется также проводить 20-40 шагов численного интегрирования, что весьма неудобно. Гораздо более эффективным является метод конечных элементов, применение которого будет показано ниже.

Рассмотрим неразрезную двухпролетную балку, концевые опоры которой являются жесткими заделками, а промежуточная, расположенная посередине длины, является шарнирно неподвижной. Размеры поперечного коробчатого сечения такие же, как и в предыдущих случаях, а длина каждого из пролетов принята равной  $l = 5000\text{мм}$ . Коэффициент жесткости упругого основания  $k = 3\text{Н} / \text{мм}^2$ . Расчет МКЭ приводит к значению частоты первого тона, соответствующей кососимметричной форме изгиба, равной  $\omega_{ж.з.}^{МКЭ} = 100.2\text{Гц}$  (рис.4,а). Почти такую же частоту  $\omega_{ж.ш.}^{МКЭ} = 103.1\text{Гц}$  имеет однопролетная балка с жесткой заделкой на одном конце и шарнирной опорой на другом (рис.2,а).

Колебания неразрезной балки второго тона с частотой  $\omega_{ж.з.}^{МКЭ} = 133.4\text{Гц}$ , соответствующие симметричной форме изгиба (рис.4,б), близки к частоте колебаний однопролетной балки с  $l = 5000\text{мм}$ , жестко защемленной по концам  $\omega_{ж.ж.}^{МКЭ} = 137.1\text{Гц}$  (рис.2,б). Как видно из сопоставления полученных величин, расхождение в частотах не превышает 2.9%.

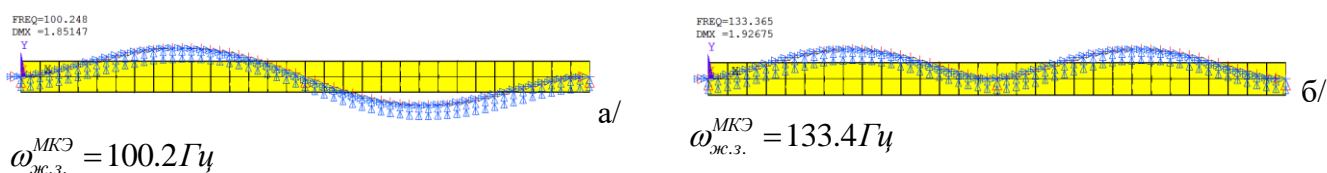


Рис.4. Частота колебаний неразрезной жестко заделанной балки на упругом основании размерами: 10000–550–10–180–16мм с промежуточной жесткой опорой посередине: а/ 1-ый тон; б/ 2-ой тон

Рассмотрим теперь колебания этой же неразрезной балки с жесткой заделкой концов при смещенной промежуточной опоре. Как видно из рис.5,а, при расположении промежуточной опоры

на относительном расстоянии  $\xi = x/l = 0.6$  частоты колебаний первого тона снижается с  $\omega_{0,5}^{МКЭ} = 100.2 Гц$  (рис.4,а) до  $\omega_{0,6}^{МКЭ} = 85.6 Гц$  (рис.5,а). При дальнейшем смещении опоры до  $\xi = 0.7$  частоты колебаний принимает значение  $\omega_{0,7}^{МКЭ} = 70.5 Гц$  (рис.5,б).

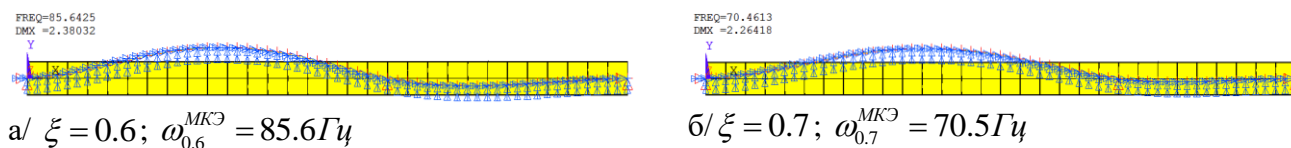


Рис.5. Частота колебаний первого тона неразрезной балки на упругом основании при разном положении промежуточной опоры: а/ при  $\xi = 0.6$ ; б/ при  $\xi = 0.7$

Дальнейшее смещение промежуточной опоры позволяет получить график изменения частоты первого тона в зависимости от расположения шарнирной опоры, показанный на рис.6,а, из которого видно, что частота изменяется по нелинейному закону, асимптотически приближаясь к форме колебаний однопролетной жестко защемленной балки длиной  $l = 10000 мм$ .

Приблизительно изменение этой частоты можно описать зависимостью

$$\omega_{ж.з.}^{унр} = f(\xi)\omega_{ж.з.}^{сред}, \quad (8)$$

где  $\xi$  - относительная абсцисса промежуточной опоры;  $\omega_{ж.з.}^{сред}$  - частота колебаний двухпролетной балки, жестко заделанной по концам с промежуточной опорой посередине пролета; функция  $f(\xi)$  имеет вид

$$f(\xi) = 1.76\xi^2 - 3.69\xi + 2.42, \quad 0.5 \leq \xi \leq 1. \quad (9)$$

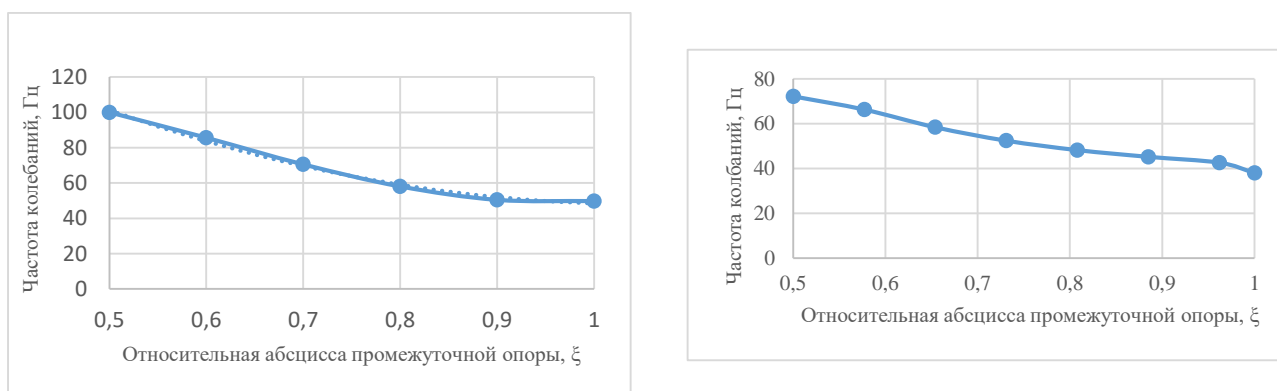


Рис.6. Изменение частоты колебаний первого тона неразрезной балки на упругом основании при смещении положения промежуточной опоры: а/ при жесткой заделке концов; б/ при шарнирном опирании

Для двухпролетной балки с тремя шарнирными опорами при смещении положения промежуточной опоры зависимость для частоты колебаний принимает вид, показанный на рис.6,б, характеризующийся тем, что при приближении промежуточной опоры к концу балки частота колебаний стремится к частоте балки с шарнирной и жестко защемленной опорой, а потом резко переходит к значению, соответствующему шарнирному опиранию обеих опор.

## Заключение

1. Полученные МКЭ результаты показали, что имеющиеся аналитические зависимости для частот свободных колебаний однопролетных шарнирно опертых балок определяют параметры колебаний с высокой точностью.
2. Влияние различных граничных условий на частоты свободных колебаний однопролетных

двухтавровых балок на упругом основании приводит к повышению частоты колебаний балки примерно в 1.4-1.85 раза в зависимости от жесткости основания. С увеличением коэффициента жесткости упругого основания эффект различия граничных условий снижается.

3. Анализ частот колебаний двухпролетной неразрезной балки с промежуточной опорой по середине пролета и с жесткой заделкой концов показал, что частота первого тона, соответствующая кососимметричной форме колебаний практически идентична частоте колебаний однопролетной балки с жесткой заделкой одного конца и шарнирным опиранием другого. Расхождение в частотах не превышает 3.5%. Колебания второго тона, соответствующие симметричной форме колебаний, практически совпадают с частотой колебаний однопролетной балки половинной длины, жестко заделанной по концам. Расхождение в частотах не превышает 2.9%.

4. При асимметричном расположении промежуточной опоры частоту колебаний жестко заделанной неразрезной балки можно определять по эмпирической зависимости (8).

5. При наличии соответствующей программы использование комплекса ANSYS позволяет эффективно оценивать частоты свободных колебаний неразрезных балок с любым характером опирания.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по строительной механике корабля: в 3 т. /Под ред. Паляя О.М. – Ленинград: Судостроение. 1982. – Т. 3. - 318с.

2. Прочность, устойчивость, колебания: справочник: в 3 т. /под ред. И.А. Биргера и Я.Г.Пановко. – Москва: 1968.– Т. 3. - 831с.

3. Курюмов А.А. Вибрация корабля. Ленинград. Судпромгиз. 1961. – 319с

4. Турищев Л.С. К определению собственных частот свободных колебаний неразрезных балок / Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Прикладные науки. Строительство. 2007. № 12. – С. 34-38.

5. Турищев Л.С. К определению собственных частот свободных колебаний балок / Вестник Полоцкого государственного университета. Серия Е. Прикладные науки. Строительство. 2015. № 8. – С. 40-44.

6. Притыкин А.И. Влияние перфорации на частоту свободных колебаний балок / А.И. Притыкин //В сборнике Балтийский морской форум, материалы IX Международного Балтийского морского форума: в 6 т. Калининград, 2021. С. 130-136.

7. Притыкин А.И. Программа Vibration-Grillage создания и расчета МКЭ параметров вибрации модели перекрытия со шпангоутами и стрингерами / А.И. Притыкин // Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ №2020666697 РФ от 21.12.2020г.

## ANALYSIS OF VIBRATION OF SINGLE AND TWO SPAN BEAMS ON ELASTIC FOUNDATION

Pritykin Alexej Igorevich, Dr. of Techn. Sci., professor of the shipbuilding, ship repair and marine equipment department

Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia, e-mail: prit\_alex@mail.ru

*In manual on the ship structural mechanics is giving analytical relation for determination of the natural frequencies of the single span beams on elastic foundation. But it is related only to simply supported beams. At the same time at real structures take place and other type of supports. In the article the numerical analysis by the finite element method is fulfilled for estimation of natural frequencies of single and two span beams on elastic foundation of Vinkler type with different boundary conditions. Obtained data allow to add information on evaluation of natural frequencies of beams on elastic foundation. Performed analysis show high efficiency of FEM compare with analytical one demanding of successive approximations for calculation of frequencies of many span beams.*

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДИК РАСЧЁТА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТРЕХСЛОЙНЫХ ПЛАСТИН ПРИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ИЗГИБЕ

<sup>1</sup>Романюта Дмитрий Александрович, аспирант кафедры кораблестроения

<sup>2</sup>Десяткин Родион Сергеевич, студент

<sup>3</sup>Князева Анна Игоревна, студентка

<sup>4</sup>Белоусов Виктор Андреевич, студент

<sup>1,2,3,4</sup>ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,  
Калининград, Россия, e-mail: <sup>1</sup>dmitrij.romanyuta@klgtu.ru

*Представлен сравнительный анализ расчета напряженно-деформированного состояния трехслойной панели при цилиндрическом изгибе в различных вариантах нагружения. Результаты расчета показывают, что методика, предлагаемая Правилами Российского морского регистра судоходства, в целом дает достоверные результаты за исключением некоторых значений, в определении которых допущены ошибки в самих Правилах.*

### Введение

В последние годы наблюдается рост использования композитных материалов в области судостроения. К примеру, в сегменте прогулочных судов, доля корпусов из композитных материалов составляет около 90 % [1].

В России одним из главных надзорных органов по проектированию судов из композитных материалов является Российский Морской Регистр Судоходства (далее - РМРС). Для данного типа судов РМРС разработал отдельные Правила классификации и постройки судов [2]. Согласно данным Правилам, конструкция корпуса судна должна быть набрана или по технологии однослойной обшивки с подкрепляющим набором, или с использованием трехслойных конструкций (п. 3.1.1, [2]).

Согласно ряду источников [1, 3, 4, 5], использование трехслойных конструкций более целесообразно по ряду причин: по характеристикам прочности, экономическим показателям и др.

В Правилах [2], представлены определенные указания по части проектирования конструкции корпуса судна в трехслойном исполнении. Кроме того, согласно п. 5.5.1 [2], основные конструкции корпуса судна (днище, борта, палуба, переборки и др.) должны быть рассчитаны на действие всех возможных нагрузок.

Многие композитные материалы являются ортотропными или анизотропными, поэтому для расчета их напряженно-деформированного состояния (далее – НДС) требуются отдельные схемы или методики расчета. В приложении 1 Правил РМРС [2], представлены определенные методы расчета НДС композитных элементов и конструкций, которые могут быть использованы для проектных или проверочных расчетов. Однако предлагаемые схемы представляются достаточно трудно-обрабатываемыми. В расчетах имеется большое количество введенных дополнительных коэффициентов и величин, что в совокупности делает расчет достаточно трудоемким.

### Постановка задачи

Целью работы является сравнение методик и результатов расчета НДС трехслойных конструкций, в соответствии с различными источниками. В работе рассматриваются следующие источники:

1. Правила Российского Морского Регистра Судоходства по композитным судам [2] – далее «Правила РМРС»;
2. Справочник «Расчет трехслойных конструкций» под редакцией д.т.н., проф. В.Н. Кобелева [6] – далее «Справочник Кобелева»;

3. Книга Говарда Аллена по расчету и проектированию конструкций из сэндвич-панелей [7] – далее «Книга Аллена»;
4. Отчет инженера Эдварда Куэнзи «Structural sandwich design criteria» [8] – далее «Отчет Куэнзи»;
5. Диссертация Анинды Мондал по проектированию и исследованию сэндвич-балок [9] – далее «Диссертация Мондал».

В качестве расчетных случаев, рассматривается цилиндрический изгиб трехслойных пластин в следующих вариантах:

1. Пластина шарнирно-оперта по периметру, нагрузка равномерно распределена по всей площади пластины – случай № 1;
2. Пластина шарнирно-оперта по периметру, нагрузка равномерно распределена в центральном сечении пластины вдоль ее короткой стороны – случай №2;
3. Пластина жестко закреплена по периметру, нагрузка равномерно распределена по всей площади пластины – случай №3.

Геометрические характеристики рассматриваемой пластины: длина пластины:  $a=3000$  мм, высота пластины  $b=900$  мм. Трехслойная конструкция выполнена из двух симметричных несущих слоев толщиной  $\delta = 4$  мм и заполнителя, толщиной  $c=35$  мм.

Физико-механические характеристики материалов приняты в соответствии с [10] и представлены в таблице 1.

Таблица 1

#### Физико-механические характеристики несущих слоев и заполнителя трехслойно пластины

Обозначение	Описание	Значение
$E_1$	модуль нормальной упругости несущего слоя в направлении основного армирования (направление $0^\circ$ )	$27 \cdot 10^9$ Па
$E_2$	модуль нормальной упругости несущего слоя в направлении $90^\circ$ к основному армированию	$27 \cdot 10^9$ Па
$E_u$	расчётный модуль упругости	$27 \cdot 10^{10}$
$G_u$	модуль сдвига несущих конструкций	$3,55 \cdot 10^9$
$\mu_u$	коэффициент Пуассона несущих слоев	0,14
$E_{core}$	модуль упругости изотропного заполнителя	$135 \cdot 10^9$
$G_{core}$	модуль сдвига изотропного наполнителя	$35 \cdot 10^6$
$\mu_{core}$	коэффициент Пуассона изотропного наполнителя	0,31

В случаях №1 и №3 расчетная нагрузка составляет  $q=500$  Н/м<sup>2</sup>, а в случае №2 –  $p=100$  Н/м. Схематично, описанные случаи нагрузки представлены на рис. 1-3.

#### Расчет напряженно-деформированного состояния пластин, в соответствии с Правилами РМРС

Расчет НДС трехслойной пластины при цилиндрическом изгибе представлен в п. 6, приложения 1 [2]. Схемы расчётов могут быть использованы, только при выполнении условий (1) – (4):

$$0,1 \leq \frac{\delta}{h} \leq 0,25; \quad (1)$$

$$\left(1 - \frac{E_2}{E_1}\right) \cdot 100 \leq 20\%; \quad (2)$$

$$2 \cdot 10^{-4} \leq \frac{G_{core}}{\bar{E}} \leq 2 \cdot 10^{-2}; \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{a}{b} > 3. \quad (4)$$

где  $\bar{E} = \frac{E_u}{1-\mu_u^2}$ ;

$h$  – половина толщины заполнителя, м;

$a$  – длинная сторона пластины, м;

$b$  – короткая сторона пластины, м.

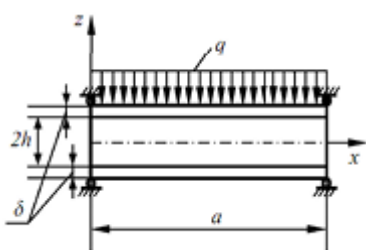


Рис. 1. Схема расчетного случая №1

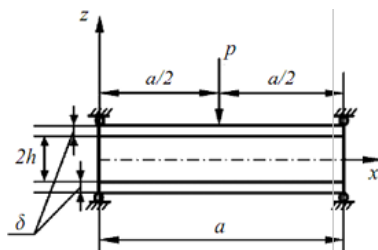


Рис. 2. Схема расчетного случая №2

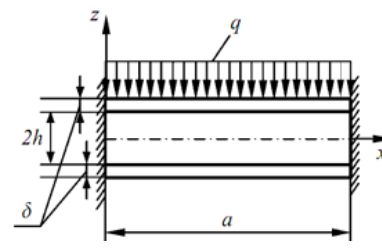


Рис. 3. Схема расчетного случая №3

Следует отметить, что Правила РМРС предлагают расчет только максимальных значений напряжений и перемещений в каждом расчетном случае. По предлагаемым схемам расчета определить значения напряжений и перемещений в произвольном сечении по длине пролета не представляется возможным.

После определения всех дополнительных вспомогательных величины, были определены максимальные нормальные напряжения в несущих слоях трехслойной пластины, максимальные касательные напряжения в заполнителе и значения максимальных прогибов. Результаты расчета представлены в таблице 2.

Таблица 2

### Результаты расчета случаев №1-№3 по Правилам РМРС

№ п/п	Случай №1	Случай №2	Случай №3
Максимальные нормальные напряжения в несущих слоях, МПа	$2,09 \cdot 10^{46}$	0,778	2,62
Максимальные касательные напряжения в заполнителе, МПа	0,0190	$1,552 \cdot 10^{43}$	0,0192
Максимальный прогиб, мм	6,60	7,13	1,62

Значения нормальных напряжений в несущих слоях в случае №1 и касательных напряжений в заполнителе в случае №2 многократно завышены и не представляются реалистичными.

В результате анализа расчетных формул было установлено, что полученный результат связан с некорректным значением коэффициента « $m_2$ », определяемого, согласно [2], по формуле (5):

$$m_2 = 1 - \frac{4 \cdot k}{\pi^2} \cdot \left( \frac{\delta}{h_{long}} + \frac{4 \cdot Du \cdot \eta}{D_{pl}} - \frac{2 + \frac{\delta}{h_{long}}}{1 + \frac{\delta}{h}} \right) \cdot \left( \frac{\delta}{h} + \left( \frac{2 \cdot Du \cdot \eta}{D_{pl}} \cdot \left( 1 - \frac{D_{core} \cdot \delta}{4 \cdot h \cdot Du} \right) - \frac{\delta}{h \cdot \left( 2 + \frac{\delta}{h_{long}} \right)} \right) \cdot \left( 1 - \frac{2 \cdot Du \cdot \eta}{D_{pl}} \right) \right) \cdot \sinh\left(\frac{\gamma \cdot a}{2}\right) \quad (5)$$

Подставив исходные данные и различные второстепенно посчитанные величины, коэффициент « $m_2$ » получился равным « $-5,32 \cdot 10^{43}$ », что и обусловило такие завышенные значения в таблице 2.

Проанализировав все входящие в формулу (5) множители, было выдвинуто предположение, что ошибка связана с неправильным заданием величины « $\gamma$ ». В приложении 1, п. 6 [2], представлены две формулы расчета данной характеристики (см. формулы (6) и (7)):

$$\gamma = \frac{a}{b}; \quad (6)$$

$$\gamma = \frac{\pi}{a} \cdot \sqrt{\frac{1}{\left(k \cdot \frac{2 \cdot D_u \cdot \eta}{D_{pl}}\right)}} \quad (7)$$

Согласно формуле (6),  $\gamma=3,3$ , а согласно формуле (7) –  $\gamma=71,2$ .

В случае, если в формулу (5) подставить значение  $\gamma=71,2$ , значение « $m_2$ » будет равным « $5,32 \cdot 10^{43}$ ». Результаты расчета НДС трехслойных пластин при таком расчете представлены в таблице 2.

В случае, если в формулу (5) подставить значение  $\gamma=3,3$ , значение « $m_2$ » будет равным «0,674». Результаты расчета НДС трехслойных пластин с откорректированным значением « $m_2$ » представлены в таблице 3.

Таблица 3

**Результаты расчета случаев №1-№3 по Правилам РМРС  
с откорректированным значением « $m_2$ ».**

	Случай №1	Случай №2	Случай №3
Максимальные нормальные напряжения в несущих слоях, МПа	2,65	5,94	2,62
Максимальные касательные напряжения в заполнителе, МПа	0,0190	0,0935	0,0192
Максимальный прогиб, мм	6,60	0,704	1,62

В данном случае, полученные значения представляются более реалистичными.

**Расчет напряженно-деформированного состояния пластин, по справочнику В.Н. Кобелева**

В 3 главе справочника [6], также представлены схемы расчета трех вышеописанных случаев.

Для использования предлагаемых расчетных формул отсутствуют условия и ограничения по использованию. Расчет практически не требует дополнительных вспомогательных величин и коэффициентов. Кроме того, в предлагаемой схеме расчета имеется возможность определять напряжения и перемещения в произвольном сечении по длине пролета рассматриваемой конструкции.

Результаты расчета представлены в таблице 4.

Таблица 4

**Результаты расчета случаев №1-№3 по справочнику Кобелева**

	Случай №1	Случай №2	Случай №3
Максимальные нормальные напряжения в несущих слоях, МПа	3,61	0,479	2,40
Максимальные касательные напряжения в заполнителе, МПа	0,0192	0,00128	0,0192
Максимальный прогиб, мм	6,60	0,925	1,62

**Расчет напряженно-деформированного состояния пластин, по книге Аллена**

Схемы расчета представлены в п. 2.6-2.7 [7]. В источнике отсутствуют данные по расчету пластины на цилиндрический изгиб с жестко-защемленными кромками (расчетный случай №3).

В источнике представлены схемы расчета трехслойных панелей с «толстыми» и «тонкими» внешними слоями, поэтому ограничений по этому параметру нет, однако, есть ограничение, связанное с заполнителем. Все представленные расчетные схемы относятся к заполнителю типа «antiplane», и для этого должно соблюдаться условие (8):

$$\frac{E_u}{E_{core}} \frac{\delta}{c} > 25, \quad (8)$$

где  $E_u$  – модуль упругости несущего слоя, Па;

$E_{core}$  – модуль упругости заполнителя, Па;

$\delta$  – толщина несущего слоя, м;



$c$  – толщина заполнителя, м.

$d$  – расстояние между нейтральными осями несущих слоев панели (в случае симметричной панели  $d=c+\delta$ ), м

Описанные геометрические характеристики наглядно представлены на рис. 4.

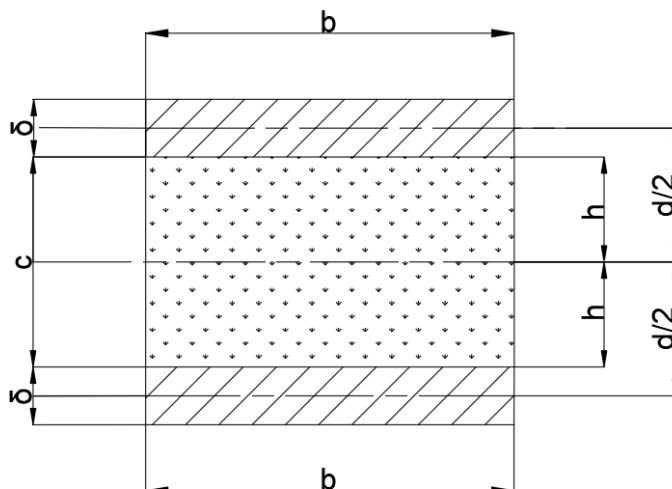


Рис. 4. Геометрические характеристики трехслойной панели в поперечном сечении

Предлагаемая схема расчета позволяет определять напряжения и перемещения в произвольном сечении по длине пролета рассматриваемой конструкции, а также, отдельно, максимальные значения напряжений и перемещений. При использовании расчетных формул требуется использование графиков, для определения дополнительных расчетных параметров и коэффициентов.

Результаты расчета представлены в таблице 5.

Таблица 5

**Результаты расчета случаев №1-№2 по книге Аллена**

	Случай №1	Случай №2	Случай №3
Максимальные нормальные напряжения в несущих слоях, МПа	3,96	0,528	-
Максимальные касательные напряжения в заполнителе, МПа	0,0192	0,00128	-
Максимальный прогиб, мм	6,77	0,731	-

**Расчет напряженно-деформированного состояния пластин, в соответствии с отчетом Куэнзи**

Отчет представляет собой краткую выжимку результатов исследований [8]. В отчете представлены данные, для всех рассматриваемых расчетных случаев.

В данной схеме расчета отсутствуют условия и ограничения по применению. Расчет представлен только для определения максимальных значения напряжений и перемещений.

Использование вспомогательных коэффициентов и величин сводится к использованию одной простой таблицы в приложении к отчету. Все остальные, требуемые для расчета характеристики, представляют собой геометрические параметры рассматриваемой пластины и данные, приведенные в таблице 1 статьи, а также значение и характер распределения нагрузки.

Результаты расчета представлены в таблице 6.

Таблица 6

**Результаты расчета случаев №1-№3, по отчету Куэнзи**

	Случай №1	Случай №2	Случай №3
Максимальные нормальные напряжения в несущих слоях, МПа	3,61	0,481	2,40
Максимальные касательные напряжения в заполнителе, МПа	0,0192	0,00128	0,0192
Максимальный прогиб, мм	6,77	0,733	1,68

## Расчет напряженно-деформированного состояния пластин, в соответствии с диссертацией Мондал

В приложении А [9] представлены расчетные формулы по определению максимальных нормальных напряжений в несущих слоях пластины и максимальных касательных напряжений в заполнителе в каждом из рассматриваемых расчетных случаев. Данных по расчету прогибов не представлено.

В данной схеме расчета также отсутствуют условия и ограничения по применению.

Использование вспомогательных коэффициентов и величин не требуется. Все требуемые параметры представлены в исходных данных.

Результаты расчета представлены в таблице 7.

Таблица 7

### Результаты расчета случаев №1-№3, согласно диссертации Мондал

	Случай №1	Случай №2	Случай №3
Максимальные нормальные напряжения в несущих слоях, МПа	3,95	0,527	2,40
Максимальные касательные напряжения в заполнителе, МПа	0,0193	0,00127	0,0192
Максимальный прогиб, мм	-	-	-

### Результаты и обсуждение

Результаты всех вышеописанных расчётов представлены в таблицах 8 - 10.

Таблица 8

### Сводная таблица полученных результатов по расчетному случаю №1

	Правила РМРС	Справочник Кобелева	Книга Аллена	Отчет Куэнзи	Диссертация Мондал
Максимальные нормальные напряжения в несущих слоях, МПа	2,65	3,61	3,96	3,61	3,95
Максимальные касательные напряжения в заполнителе, МПа	0,0190	0,0192	0,0192	0,0192	0,0193
Максимальный прогиб, мм	6,60	6,60	6,77	6,77	-

Таблица 9

### Сводная таблица полученных результатов по расчетному случаю №2

	Правила РМРС	Справочник Кобелева	Книга Аллена	Отчет Куэнзи	Диссертация Мондал
Максимальные нормальные напряжения в несущих слоях, МПа	5,94	0,479	0,528	0,481	0,527
Максимальные касательные напряжения в заполнителе, МПа	0,0935	0,00128	0,00128	0,00128	0,00127
Максимальный прогиб, мм	0,704	0,925	0,731	0,733	-

Таблица 10

### Сводная таблица полученных результатов по расчетному случаю №3

	Правила РМРС	Справочник Кобелева	Книга Аллена	Отчет Куэнзи	Диссертация Мондал
Максимальные нормальные напряжения в несущих слоях, МПа	2,62	2,40	-	2,40	2,40
Максимальные касательные напряжения в заполнителе, МПа	0,0192	0,0192	-	0,0192	0,0192
Максимальный прогиб, мм	1,62	1,62	-	1,68	-

Анализируя данные, полученные для расчетного случая №1, можно заметить, что значения по всем напряжениям и прогибам достаточно схожи. Только значение максимальных нормальных напряжений в несущих слоях, полученное по Правилам РМРС отличается от других. Данный факт обусловлен вероятной ошибкой в с коэффициентом « $\gamma$ », описанной выше.

Анализируя данные расчетного случая №2, следует выделить следующие аспекты:

1. Значение максимальных нормальных напряжений в несущих слоях, полученное по Правилам РМРС, на порядок превосходит значения, полученные по другим источникам. Причину данного несоответствия установить не удалось, однако можно предположить, что оно обусловлено какой-то ошибкой в расчетной схеме;

2. Значение максимальных касательных напряжений, полученное по Правилам РМРС, в заполнителе на порядок превосходит значения, полученные по другим источникам. Причиной данного несоответствия является ошибка в определении коэффициента « $\gamma$ », описанная выше.

3. Значение максимального прогиба пластины, полученного по справочнику Кобелева, на 26%-31% больше соответствующих значений, полученных другими методами. Причину данного несоответствия установить не удалось.

Анализ полученных данных по расчетному случаю №3 показывает хорошую сходимость и соответствие результатов.

Предположение по коэффициенту « $\gamma$ », высказанное выше (по замене в последующем расчете формулы (7) на формулу (6)), показало неудовлетворительные результаты. Как следствие, следует предположить, что в Правилах присутствует ошибка или опечатка в формуле (7), или в формуле (5).

В отношении рассмотренных методик следует отметить, что они ориентированы на расчет трехслойных панелей с изотропными несущими слоями. Правила РМРС допускают использование представленных схем для расчета трехслойных пластин с ортотропными несущими слоями, но только в случае, если их модули упругости отличаются не более, чем на 20%. Схем для расчета НДС трехслойных пластин с ярко выраженными ортотропными характеристиками несущих слоев в Правилах РМРС не присутствует. Использование рассмотренных источников для подобных пластин также невозможно.

Рассматривая трудоемкость расчета следует отметить, что использование схем по Правилам РМРС, затруднительно, ввиду наличия большого количества вспомогательных коэффициентов и величин. В книге Аллена отсутствует пример расчета пластин при цилиндрическом изгибе с жестко закрепленными кромками. В диссертации Мондал отсутствуют формулы по определению перемещений.

Расчет по справочнику Кобелева достаточно удобен и понятен – в расчете отсутствует большое количество вспомогательных коэффициентов, формулы позволяют определять напряжения и перемещения в любом сечении конструкции по длине пролета, в справочнике разобраны случаи с различными вариантами закреплений и нагрузок.

Расчет по отчету Куэнзи показывает хорошую сходимость с альтернативными методами расчета, не требует введения дополнительных параметров, а также, доступен для различных вариантов закреплений и нагрузок.

## Заключение

Выполнены расчеты напряженно-деформированного состояния трехслойной пластины размером 3,0x0,9 м, при цилиндрическом изгибе по пяти различным источникам, в трех расчетных случаях.

Выдвинуто предположение, что в схеме расчета, предлагаемой Правилами РМРС, имеется ошибка или опечатка в определении коэффициента « $\gamma$ » (по формуле (7) или « $m_2$ » (по формуле (5))).

В остальном, результаты расчета по различным источникам показывают схожие результаты.

С точки зрения трудоемкости расчета, использование схем по справочнику Кобелева и отчету Куэнзи представляется более оптимальным – рассмотрены различные варианты закрепления и нагружения пластины, расчеты практически не требуют введения дополнительных параметров, а полученные данные, в целом, совпадают с альтернативными методиками (за исключением значения максимального прогиба в расчетном случае №2 по справочнику Кобелева; причину установить не удалось).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Особенности импортозамещения заполнителей трехслойных конструкций из композитных материалов в судостроении // Электрон. дан. Режим доступа URL: <https://compositeworld.ru/articles/materials/id62bec2f1a59700123c3c44>
2. Российский Морской Регистр Судоходства. Правила классификации и постройки морских судов, часть XVI - Санкт-Петербург, 2012 г
3. Романюта, Д. А. Исследование напряженно-деформированного состояния водонепроницаемой переборки композитного малого рыболовного бота при различных вариантах его конструкции / Д. А. Романюта // Дни науки : материалы межвузовской научно-технической конференции студентов и курсантов на базе ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет», Калининград, 08–21 апреля 2019 года. – Калининград: Обособленное структурное подразделение "Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота" федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Калининградский государственный технический университет", 2019. – С. 332-336. –
4. KVRamakrishnan, 2Dr P GSunil Kumar. Applications of Sandwich Plate System for Ship Structures.-IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE). e-ISSN: 2278-1684,p-ISSN: 2320-334X,
5. Recent Industrial Developments of Marine Composites Limit States and Design Approaches on Strength- Journal of Marine Science and Application // Электрон. дан. Режим доступа URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11804-020-00171-1>
6. Расчёт трёхслойных конструкций: Справочник / В. Н. Кобелев, Л. М. Коварский, С. И. Тимофеев; Под общ. ред. В. Н. Кобелева. – М.: Машиностроение, 1984. – 304 с.
7. Allen H.G. Analysis and design of structural sandwich panels/ H.G. Allen// Pergamon Press, 1969.
8. Kuenzi, Edward W. Structural Sandwich Design Criteria, FPL Report No. 2161, 1959.
9. Mondal, Aninda Suvra. *Design and similitude study of composite sandwich beam*. Masters thesis, Memorial University of Newfoundland, 2016.
10. The mechanical behavior of sandwich composite joints for ship structures // Электрон. дан. Режим доступа URL: <https://isiarticles.com/bundles/Article/pre/pdf/96242.pdf>

## COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS FOR CALCULATING THE STRESS-STRAIN STATE OF THREE-LAYER PLATES DURING CYLINDRICAL BENDING

<sup>1</sup>Romanyuta Dmitry Alexandrovich, post-graduate student of the department of shipbuilding

<sup>2</sup>Desyatkin Rodion Sergeevich, student

<sup>3</sup>Knyazeva Anna Igorevna, student

<sup>4</sup>Belousov Viktor Andreevich, student

<sup>1,2,3,4</sup>FSBEI HE "Kaliningrad State Technical University",  
Kaliningrad, Russia, e-mail: <sup>1</sup>dmitrij.romanyuta@klgtu.ru

*The article presents a comparative analysis of the calculation of the stress-strain state of a three-layer panel under cylindrical bending in various loading options. The results of the calculation show that the methodology proposed by the Rules of the Russian Maritime Register of Shipping, in general, gives reliable results, with the exception of some values, in the determination of which errors were made in the Rules themselves.*

# СЕКЦИЯ «ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ОБЪЕКТОВ МОРСКОЙ ИНДУСТРИИ»

## SECTION "ELECTRICAL SYSTEMS OF MARINE INDUSTRY FACILITIES"

УДК 629.311

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ НЕЛИНЕЙНЫХ НАГРУЗОК ПСЗ «ЯНТАРЬ» С ПОЗИЦИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

<sup>1</sup>Белей Валерий Феодосиевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой энергетики

<sup>2</sup>Коротких Кирилл Викторович, аспирант кафедры энергетики

<sup>3</sup>Самарин Василий Денисович, магистр кафедры энергетики

<sup>1,2,3</sup>ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,

Калининград, Россия, e-mail: <sup>1</sup>vbeley@klgtu.ru; <sup>2</sup>kirill-korotkikh@bk.ru;

<sup>3</sup>w.d.samarin@mail.ru

Представлены результаты экспериментальных и аналитических исследований нелинейных нагрузок Прибалтийского судостроительного завода (ПСЗ) «Янтарь», а именно сварочного аппарата, светодиодных ламп, конденсаторной установки. Затронуты проблемы высших гармонических, эмиссируемых в питающую сеть нелинейными электроприёмниками, доля которых в системах электроснабжения объектов морской индустрии с каждым годом неконтролируемо увеличивается. Также произведён анализ перетоков активной и реактивной мощностей на вводных фидерах головных подстанций завода, выполнена оценка режимов работы дизель-генератора для контроля над перетоками реактивной мощности и улучшения показателей качества электроэнергии, в частности по напряжению.

На рисунке 1 показана структурная схема распределения электроэнергии по основной площадке ПСЗ «Янтарь» между подстанциями.

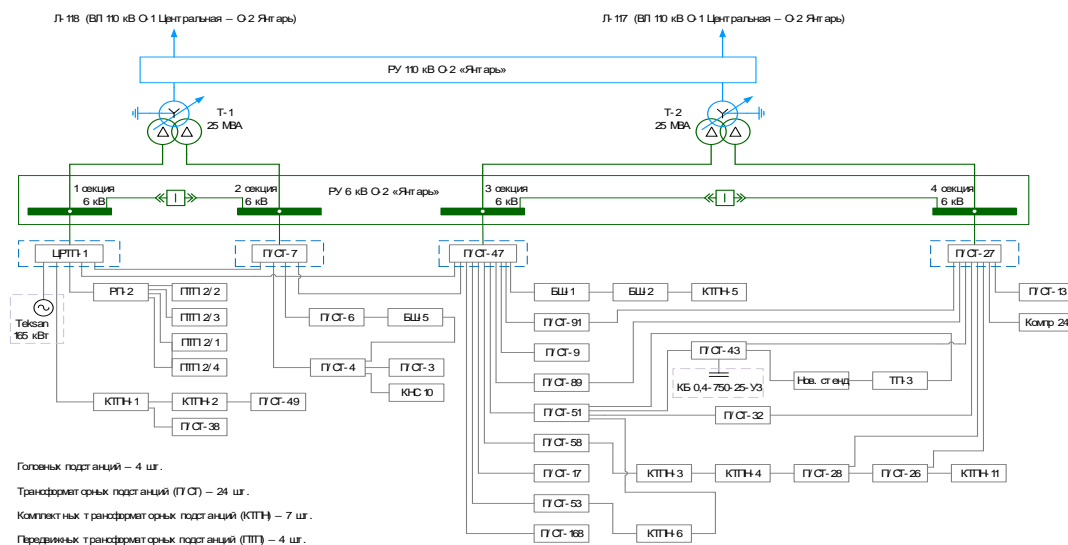


Рис. 1. Структурная схема распределения электроэнергии на основной площадке предприятия где Тексан 165 – аварийный дизель-генератор; КБ 0,4-750-25-У3 – конденсаторная установка.

Пунктами приёма электроэнергии на основной площадке предприятия являются 4 секции РУ 6 кВ: 1 секция (Ф. 2-04), 2 секция (Ф. 2-15), 3 секция (Ф. 2-30 и 2-31), 4 секция (Ф. 2-47 и 2-48). В таблице 1 представлены данные по перетокам активной и реактивной мощностей на фидерах четырёх головных подстанций завода.

Таблица 1

**Перетоки активной и реактивной мощностей в летний период на вводных фидерах головных подстанций ПСЗ «Янтарь»**

Центр питания		$P_{\text{макс}}$ , кВт	$Q_{\text{макс}}$ , кВАр	tgφ
Подстанция № 27	Ф. № 02-47	1501	360,5	0,24
	Ф. № 02-48	1149	907,4	0,79
Подстанция № 47	Ф. № 02-30	448	439,2	0,98
	Ф. № 02-31	514	401,3	0,78
Подстанция № 7	Ф. № 02-15	1115	769,5	0,69
Подстанция № 1	Ф. № 02-04	302	234,6	0,78

Анализ полученных данных показал, что на всех вводах кроме 02-47 (Подстанция № 27) наблюдается превышение предельного значения коэффициента реактивной мощности, заявленного на уровне 0,38, более чем в два раза, а на вводе 02-30 (Подстанция № 47) в три раза.

Посредством подключения прибора контроля качества электроэнергии Fluke-434 к шинам распределительного устройства 0,4 кВ подстанции № 53 ПСЗ «Янтарь» были проведены измерения показателей качества электроэнергии. Наблюдается превышение отклонения фазных напряжений от допустимого значения по ГОСТу [1]

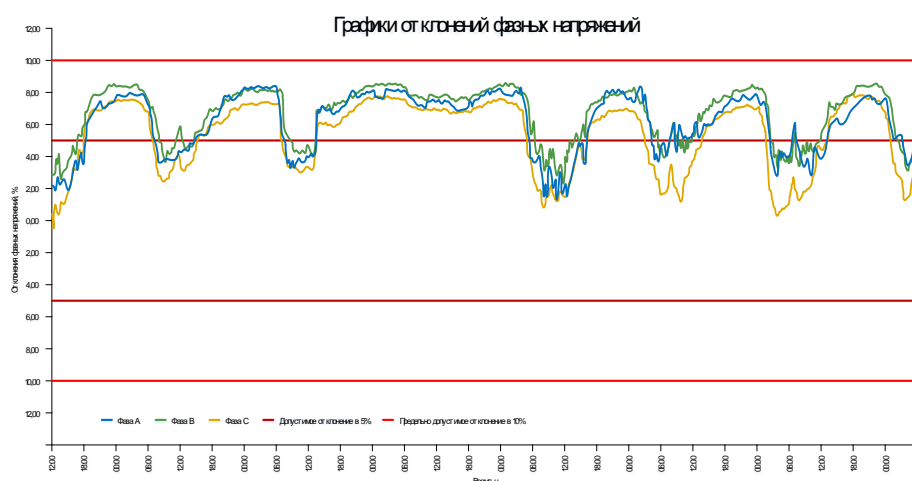


Рис. 2. Графики отклонений фазных напряжений на подстанции № 53 ПСЗ «Янтарь»

Анализ перетоков активной и реактивной мощностей на вводных фидерах ПСЗ «Янтарь», а также измеренных показателей качества электроэнергии, в частности по напряжению показали, что следует провести мероприятия по установке либо компенсирующих устройств, либо синхронных генераторов для управления потоками реактивной мощности и контроля над отклонением фазных напряжений от допустимых значений.

В нынешних реалиях на судостроительном заводе наблюдается значительный рост доли нелинейной нагрузки. Общая характеристика о нагрузке завода представлена в таблице 2.

Таблица 2

**Общая характеристика о нагрузке ПСЗ «Янтарь»**

Параметр	Значение
Установленная мощность электроприёмников завода, Мвт	32,5
Максимальная мощность электроприёмников, МВт	14,042
Максимальная мощность искажающих потребителей, МВА	1,5

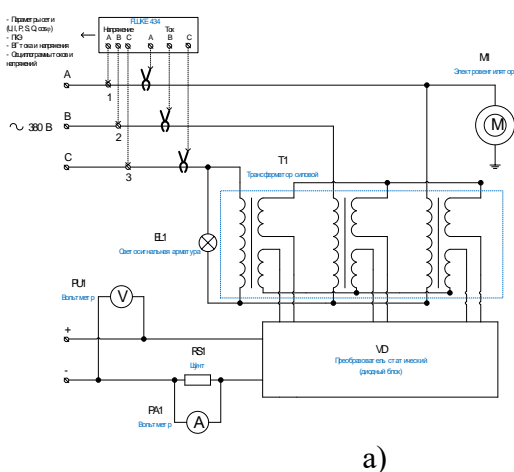
В таблице 3 приведена доля нелинейного электрооборудования и приборов ПСЗ «Янтарь».

Таблица 3

**Доля нелинейного электрооборудования и приборов ПСЗ «Янтарь»  
в процентах от установленной мощности всех электроприёмников завода**

	Тип электрооборудования и приборов			
	Сварочные аппараты	Светодиодные лампы	Электротермические установки и гальванические ванны	Прочее
в % от установленной мощности всех электроприёмников завода	18 %	1 %	11 %	3 %

На заводе «Янтарь» значительную долю электрооборудования занимают сварочные агрегаты. В связи с этим были проведены исследования сварочного аппарата мощностью 120 кВА в режиме средних и максимальных нагрузок. На рисунке 3 представлена схема экспериментальной установки по исследованию высших гармоник (а) и технические параметры (б) сварочного аппарата ВДМ-1600.



Тип сварочного аппарата	ВДМ-1600
$U_{\text{сети}}, \text{В}$	380
$S_{\text{ном}}, \text{кВт}$	120
$U_{\text{ном.раб}}, \text{В}$	60
$I_{\text{ном.выпрямленный}}, \text{А}$	1600
$I_{\text{ном.1 поста}}, \text{А (ПВ \%)}$	315 (60 %)
Число сварочных постов	8
$\eta, \%$	90

Рис. 3. Схема экспериментальной установки по исследованию высших гармоник (а) и технические параметры (б) сварочного аппарата ВДМ-1600

В таблице 4 представлены значения высших гармоник тока исследуемого сварочного аппарата в режиме средних и максимальных нагрузок.

Таблица 4

**Значения высших гармоник тока исследуемого сварочного аппарата  
в режиме средних (а) и максимальных (б) нагрузок**

Номер гармоники	Данные, снятые с измерителя ПКЭ Fluke-434		
	Фаза А	Фаза В	Фаза С
3	27,9	2,3	26,1
5	11,2	10,3	10,6
7	0,7	0,6	0,3
9	0,5	0,1	0,6
11	0,4	0,4	0,4
13	0,4	0,4	0,3
15	0,3	0,2	0,3
$K_{i(n)}, \%$	29,9	11,0	28,1

б)

Номер гармоники	Данные, снятые с измерителя ПКЭ Fluke-434		
	Фаза А	Фаза В	Фаза С
3	32,1	12,9	38,7
5	18,8	5,0	9,1
7	10,7	2,8	6,3
9	9,5	3,1	7,0
11	8,6	3,6	7,4
13	6,0	3,7	6,8
15	8,2	3,1	6,5
$K_{i(n)}, \%$	104,8	39,8	79,9

где:  $K_{i(n)}$  – суммарный коэффициент гармонических составляющих кривой тока [2]:

$$K_{i(n)} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} I_n^2}}{I_1} \cdot 100\% \quad (1)$$

где:  $I_n$  – амплитудное значение тока n-гармоники;

$I_1$  – амплитудное значение тока 1-й гармоники.

Анализ результатов измерений свидетельствует о нестабильном уровне высших гармоник тока. Малое изменение условий горения дуги ведёт к увеличению или уменьшению токов гармоник высшего порядка в несколько раз [2].

В настоящее время всё большее распространение получают светодиодные лампы (СДЛ), характеризующиеся высокой долей в энергоэффективности и сроке эксплуатации. На заводе «Янтарь» удельный вес СДЛ составляет 23,4% от общего числа светильников. На рисунке 6 показана схема экспериментальной установки по исследованию светодиодных ламп разной мощности, разных фирм-производителей.

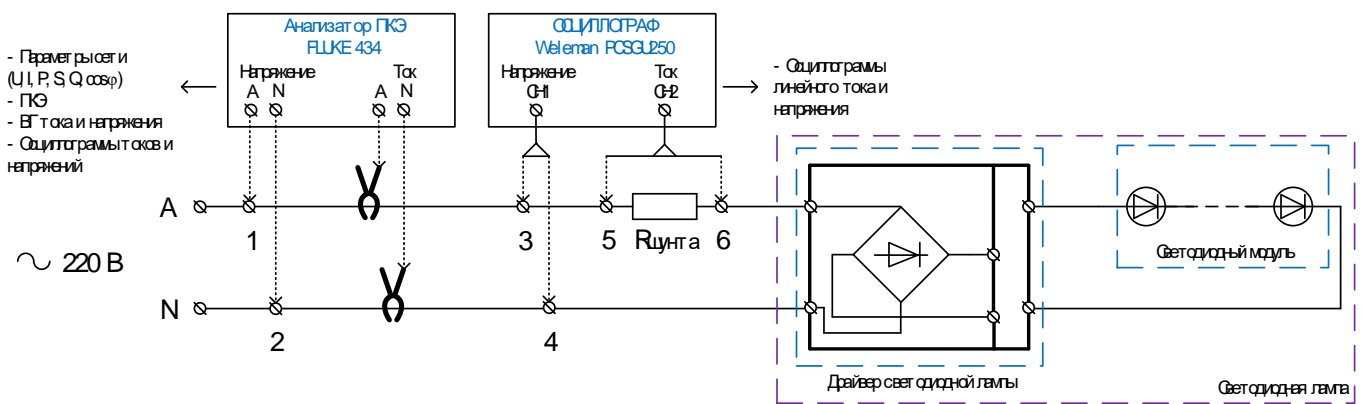
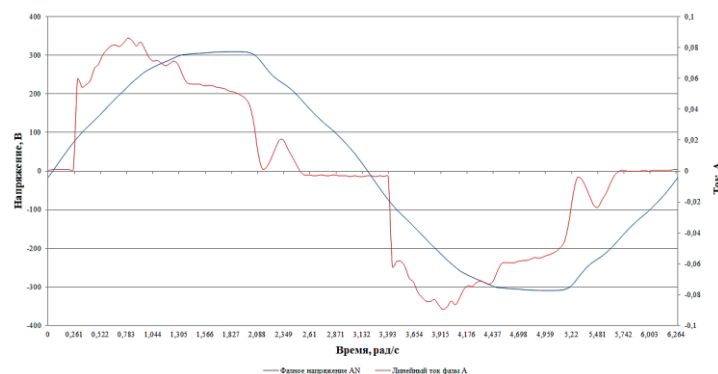


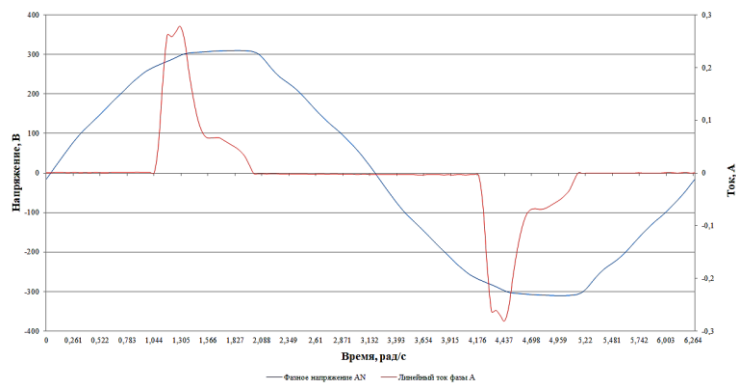
Рис. 4. Схема экспериментальной установки по исследованию высших гармоник светодиодных ламп

Осциллограммы линейного тока и фазного напряжения двух исследуемых ламп (9 и 11 Вт) представлены на рисунке 5.



а)





б)

Рис. 5. Осциллограммы линейного тока и фазного напряжения двух светодиодных ламп: 9 Вт (а), 11 Вт (б)

В таблицу 5 сведены результаты исследований, характеризующие показатели несинусоидальности тока, светодиодных ламп № 1 и № 2.

Таблица 5

**Данные, снятые с измерителя ПКЭ Fluke-434, по исследованию энергетических показателей двух светодиодных ламп**

Параметр		Лампа № 1	Лампа № 2
U, В		223,1	223,0
I, А		0,052	0,083
P, Вт		9,2	10,6
Q, ВАр		6,3	14,4
cosφ		0,82	0,59
Значения высших гармоник тока, %	K <sub>3</sub> , %	24	81
	K <sub>5</sub> , %	19	57
	K <sub>7</sub> , %	8	42
	K <sub>9</sub> , %	8	39
	K <sub>11</sub> , %	3	36
	K <sub>13</sub> , %	8	27
	K <sub>15</sub> , %	5	16
K <sub>i(n)</sub> , %		32,7	126,0

Анализ полученных данных свидетельствует о низком cosφ лампы № 2, который снижается с ростом напряжения, а также о высоком уровне третьей гармоники, эмитируемой в питающую сеть. Общеизвестно, что токи гармоник третьего порядка образуют нулевую последовательность. Прямую и обратную последовательности создают токи седьмой и пятой гармоник соответственно. При симметричном распределении нагрузки по фазам, токи гармоник кратных трём суммируются в нулевом проводнике, токи же пятой и седьмой гармоник в данном проводе будут отсутствовать [3].

Конденсаторные установки, являясь источниками реактивной мощности, в свою очередь эмитируют гармоники высшего порядка в питающую сеть. Не допускается эксплуатация конденсаторных батарей при превышении их токовой нагрузки выше номинальной на 30 % [4].

На рисунке 6 показана схема экспериментальной установки по исследованию конденсаторной установки (КУ).

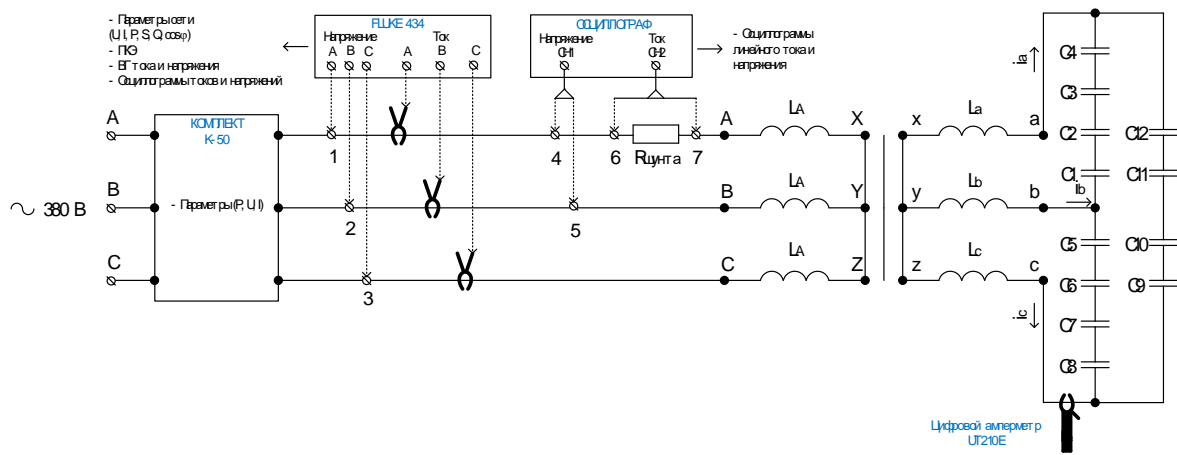


Рис. 6. Схема экспериментальной установки по исследованию высших гармоник КУ

Осциллограммы линейного тока и напряжения в цепи КУ представлены на рисунке 7.

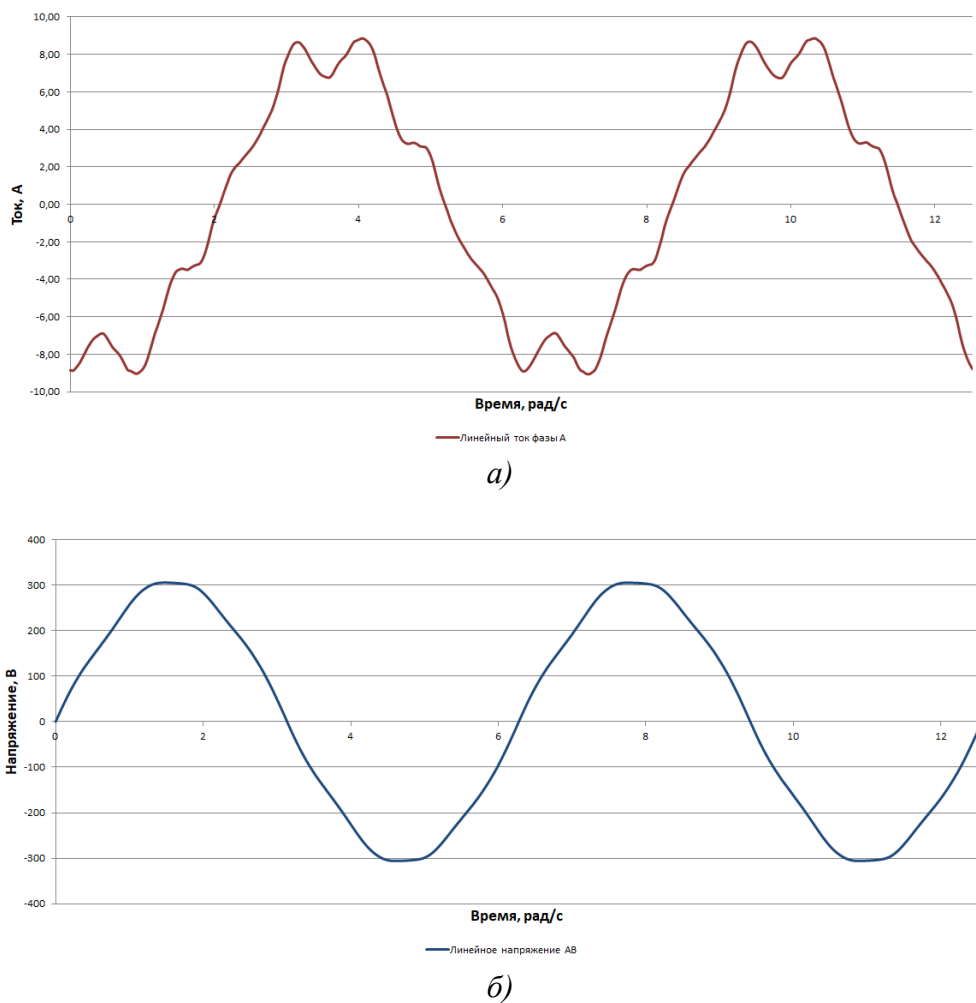


Рис. 7. Осциллограммы линейного тока (а) и напряжения (б) конденсаторной установки

Ниже представлены значения высших гармоник тока исследуемой конденсаторной установки (Таблица 6а) и её технические параметры (Таблица 6б).

**Значения высших гармоник тока исследуемой конденсаторной батареи (а)  
и её технические параметры (б)**

Номер гармоники	Данные, снятые с измерителя ПКЭ Fluke-434		
	Фаза А	Фаза В	Фаза С
3	0,6	0,5	0,3
5	7,1	8,9	7,6
7	11,2	10,1	6,0
9	1,0	6,0	6,2
11	2,1	2,3	1,9
13	0,9	0,5	0,6
15	0,2	0,8	0,7
$K_{i(n)}, \%$	13,8	15,3	11,7

б)

Тип конденсаторов	$U_{раб}, В$	Количество конденсаторов, шт	$C, мкФ$
МБГО-2	До 300	9	20
		3	30

Анализ экспериментальных данных показал, что по двум линейным проводам протекают 9-я, 15-я гармоники, вследствие чего происходит резкое увеличение ВГ тока, уменьшение сопротивления конденсаторов на частотах высших гармоник [4].

В заключении параграфа следует иметь ввиду важный фактор, а именно, разработка и исследование на математической модели распространение высших гармонических составляющих, которые позволят в полной мере оценить природу высших гармонических и наилучшим образом внедрить фильтро-компенсирующие устройства в систему электроснабжения ПСЗ «Янтарь», тем самым повысив качество электроэнергии и снизив уровень эмиссии высших гармоник тока в питающую сеть 110 кВ.

Математическую модель следует разрабатывать с учётом схем замещения для прямой, обратной и нулевой последовательностей. Это позволит оценить распространение высших гармоник при несимметричных, нелинейных и резкопеременных нагрузках.

На заводе планируется реконструкция системы теплоснабжения, основным котельно-печным топливом будет природный газ, замещающий дизельное топливо (95%), уголь (3%) и сжатый газ (2%). Поэтому имеет место быть система комбинированной выработки электрической и тепловой энергии на заводе, основанная на генерации электроэнергии посредством синхронных генераторов с утилизацией тепла на отопительные нужды.

В роли резервного источника электроснабжения на ПСЗ «Янтарь» эксплуатируется дизель-генератор, технические параметры которого представлены в таблице 7 [5].

Таблица 7

**Технические параметры аварийного дизель-генератора TJ232DW5A**

Марка	$P_{ном}, кВт$	$U_{ном}, В$	$I_{ном}, А$	$n_{ном}, об/мин$	$\cos\phi_{ном}$	$\eta, \%$	$r_a, Ом$
Teksan	165	400	304	1500	0,8	93,0	0,02

Аналогом вышеизложенного дизель-генератор выступает генератор марки MCC102-4, технические параметры которого представлены в таблице 8 [6].

Таблица 8

**Технические параметры дизель-генератора MCC102-4**

Марка	$P_{ном}, кВт$	$U_{ном}, В$	$n_{ном}, об/мин$	$\cos\phi_{ном}$	$r_a, Ом$	$x_{d\Sigma}, о.е.$	$x_q, о.е.$	$x_s, о.е.$
MCC102-4	160	400	1500	0,8	0,02	2,23	1,13	0,067

На основе комплексного анализа взаимосвязанных элементов: характеристик холостого хода, короткого замыкания, графика зависимости синхронного индуктивного сопротивления обмотки статора по продольной оси от тока возбуждения, векторной диаграммы, имеет место переход к построению диаграммы располагаемых мощностей для генератора МСС102-4, представленной на рисунке 8.

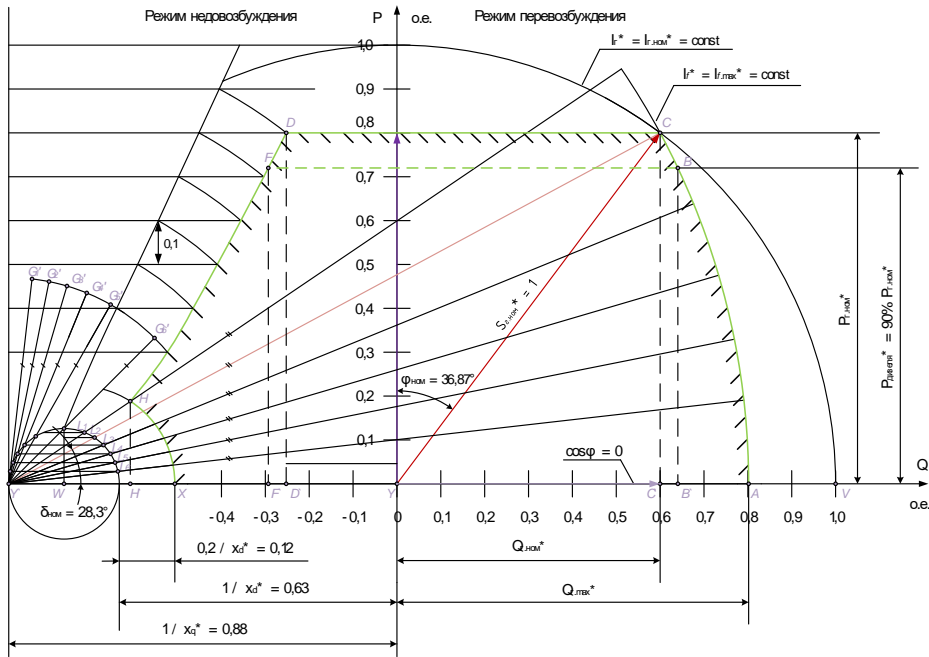


Рис. 8. Диаграмма располагаемых мощностей генератора МСС102-4

Диаграмма (Рисунок 8) содержит в себе ряд ограничительных участков, а именно: участки AC, CD, CH, HX. Построение диаграммы опиралось на работу [7]. Участок AC: предел по нагреву обмотки возбуждения. Участок VC: предел по нагреву обмотки якоря, однако данная зона не несёт влияния на функционирование дизель-генератора при номинальном режиме. Участок CD: ограничения вследствие особенностей дизеля, соответствующий его загрузке на 100%, однако данная зона может быть снижена вследствие ограничения мощности на 10% из-за технических особенностей выхлопного тракта. Участок DH: предел по обеспечению статической устойчивости. Участок HX: предел по минимально-допустимому току возбуждения (20%).

Угловая характеристика (Рисунок 9) определяется зависимостью  $P_{эм}$  от  $\theta$ , строится для номинального режима в относительных единицах [8]:

$$P_{эм}^* = \frac{m \cdot U_{1.ном}^* \cdot E_f^*}{x_d^*} \cdot \sin\theta + \frac{m \cdot U_{1.ном}^{*2}}{2} \left( \frac{1}{x_q^*} - \frac{1}{x_d^*} \right) \cdot \sin 2\theta \tag{2}$$

где  $P_{эм}^*$  – электромагнитная мощность синхронного генератора, о.е.;

$U_1^*$  – напряжение на статоре;

$E_f^*$  – ЭДС, индуцируемая в обмотке статора полем возбуждения, о.е.;

$x_q^*$  – синхронное индуктивное сопротивление обмотки статора по поперечной оси, о.е.;

$x_d^*$  – насыщенное значение синхронного индуктивного сопротивления обмотки статора по продольной оси, о.е.;

$m$  – число фаз;

$\theta$  – угол нагрузки, °.

С учётом построения в относительных единицах и при номинальном режиме, выражение 2 принимает вид [8]:

$$P_{эм}^* = \frac{E_f^*}{x_d^*} \cdot \sin\theta + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{x_q^*} - \frac{1}{x_d^*} \right) \cdot \sin 2\theta \tag{3}$$

Коэффициент синхронизирующей мощности ( $P_{CM}^*$ ), являясь критерием статической устойчивости, определяется по выражению 5 с учётом выражения 4 (по аналогии определения электромагнитной мощности, выражения 2 – 3) [8]:

$$P_{CM}^* = \frac{m \cdot U_{1,НОМ}^* \cdot E_f^*}{x_d^*} \cdot \cos\theta + \frac{m \cdot U_{1,НОМ}^{*2}}{2} \left( \frac{1}{x_q^*} - \frac{1}{x_d^*} \right) \cdot \cos 2\theta \quad (4)$$

$$P_{CM}^* = \frac{E_f^*}{x_d^*} \cdot \cos\theta + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{x_q^*} - \frac{1}{x_d^*} \right) \cdot \cos 2\theta \quad (5)$$

Для точек зон ограничения на диаграмме располагаемых мощностей (Рисунок 8) были построены угловые и синхронизирующие характеристики, представленные на рисунке 9.

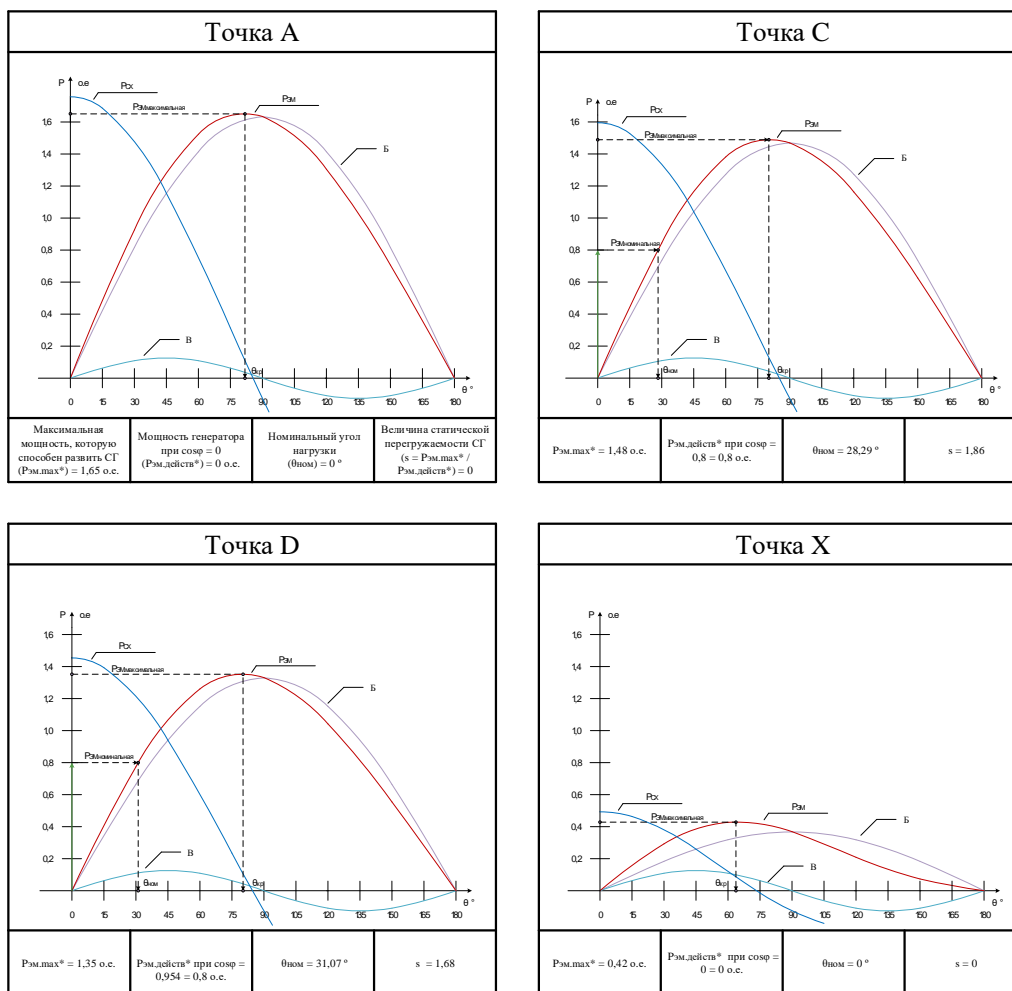


Рис. 9. Угловые и синхронизирующие характеристики для ряда точек ограничения диаграммы располагаемых мощностей генератора МСC102-4

Программа по управлению и контролю над перетоками реактивной составляющей мощности за счёт использования компенсирующих устройств или синхронных генераторов позволит:

1. Повысить пропускную способность, прирост потребляемой активной энергии без увеличения её выработки на электростанциях;
2. Создать дополнительные возможности технологического присоединения потребителей там, где ранее это было невозможно из-за технических возможностей;
3. Повысить качество электроэнергии, в первую очередь по напряжению;
4. Повысить запас статической устойчивости нагрузки по напряжению;
5. При установке компенсирующих устройств или использовании синхронных генераторов позволит снизить провалы напряжения и стабилизировать его на оптимальном уровне, что повысит надёжность технологического оборудования на заводе по напряжению;
6. Снизить расход электроэнергии на её транспорт.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014-07-01. М.: Стандартиформ, 2014, 19 с.
2. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения предприятий. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984, 160 с.
3. Белей В.Ф. Компактные люминесцентные лампы: электрические характеристики, проблемы электромагнитной совместимости / Белей В.Ф. // Электротехника. 2002. 48-51 с.
4. Белей В.Ф., Решетников Г.А., Коротких К.В. Исследование высших гармонических составляющих тока и напряжения и их влияния на функционирование судового электрооборудования// Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – № 4, т. 4. – 10 с.
5. ТЕКСАН. Генераторы для решения широкого спектра промышленных задач [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://teksan.com.ru/> (Дата обращения: 01.09.2022).
6. Яковлев Г.С. Судовые электроэнергетические системы. Под ред. Яковлев Г.С. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л: Судостроение, 1967. – 388 с.
7. Ветров В.И. Режимы электрооборудования электрических станций: Учебное пособие. Под ред. Ветрова В.И., Быкова Л.Б., Ключенович В.И. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. – 243 с.
8. Пиотровский Л.М. Электрические машины: Учебник для техникумов. – 7-е изд., перераб. и доп. – Л: Энергия, 1974. – 504 с.

### **RESULTS OF STUDIES OF NON-LINEAR LOADS OF BSP "YANTAR" FROM THE STANDPOINT OF ENSURING THE QUALITY OF ELECTRICITY AND EFFICIENT USE OF ELECTRICAL EQUIPMENT**

<sup>1</sup>Beley Valery Feodosievich, Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Head of the Energy Department

<sup>2</sup>Korotkikh Kirill Viktorovich, PhD of the Energy Department

<sup>3</sup>Samarin Vasily Denisovich, Master of the Department of Energy

<sup>1,2,3</sup>FSBEI HE "Kaliningrad state technical university",

Kaliningrad, Russia, e-mail: <sup>1</sup>vbeley@klgtu.ru; <sup>2</sup>kirill-korotkikh@bk.ru;

<sup>3</sup>w.d.samarin@mail.ru

*The paper presents the results of experimental and analytical studies of the operating modes of a number of electrical equipment of the Baltic Shipbuilding Plant (BSP) «Yantar», namely a welding machine, LED lamps, a capacitor unit, an emergency diesel generator. The article touches upon the problems of higher harmonics emitted into the supply network by non-linear power receivers, the share of which in the power supply systems of marine industry facilities is increasing uncontrollably every year. Also, an analysis of the reactive power balance at the input feeders of the head substations of the plant was made, an assessment was made of the operating modes of the emergency diesel generator to ensure this balance and improve the quality of electricity, in particular in terms of voltage.*

## ПРОБЛЕМА ИЗОЛИРОВАННОСТИ БОРТОВЫХ ЭЛЕКТРОСИСТЕМ ОТ КОРПУСОВ МОРСКИХ СУДОВ И СПОСОБ ЕЁ РЕШЕНИЯ

<sup>1</sup>Благинин Владимир Анатольевич, канд. техн. наук, директор

<sup>2</sup>Волкогон Владимир Алексеевич, канд. экон. наук, ректор

<sup>3</sup>Кажекин Илья Евгеньевич, канд. техн. наук, доцент кафедры

<sup>4</sup>Юсып Вячеслав Михайлович, начальник кафедры

<sup>1</sup>ООО «Автономные электрические системы»,

Калининград, Россия, e-mail: <sup>1</sup>npp-met@rambler.ru

<sup>2,3</sup>ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,

Калининград, Россия, e-mail: <sup>3</sup>kazhekin@mail.ru

<sup>4</sup>Калининградский филиал ВУНЦ (Военно-морская академия),

Калининград, Россия, e-mail: <sup>4</sup>v-y48@yandex.ru

*Показана общая причина ухудшения показателей безопасности морской техники, произошедшей в результате перевода всего электроэнергетического хозяйства морских флотов с постоянного тока на трехфазный переменный ток, определены критерии и нормы безопасности судов, количественно характеризующие угрозы со стороны трехфазных электросистем и описан способ защиты от этих угроз.*

### Введение

Перевод морской техники с постоянного тока на трехфазный переменный ток, завершившийся в семидесятые годы прошлого века, существенно улучшил эксплуатационные свойства бортовых электроэнергетических систем (ЭЭС) за счет превосходства электрических машин переменного тока и трансформаторов над машинами постоянного тока и преобразователями. Электросистемы при сопоставимых мощностях стали более дешевыми, компактными и легкими, повысилась надежность и КПД бортового электрооборудования, а трудозатраты на их обслуживание сократились в несколько раз.

Вместе с тем, диалектически закономерным оказалось то, что одновременно с улучшением одних перечисленных выше эксплуатационных свойств бортовых ЭЭС и, следовательно, морских судов в целом произошло серьезное ухудшение некоторых других свойств морской техники, не менее важных. Как показали исследования, диалектически возможные ухудшения некоторых свойств судов действительно произошли. Они коснулись тех свойств судов, которые связаны с возникновением чрезвычайно редких событий в виде, например, пожаров и взрывов, а также связанных с развитием очень медленных процессов, подобных, например, процессам коррозии. Эти ухудшения нашли отражение в увеличении относительного количества судовых пожаров, т.е. пожаров, приходящихся на одно судно в год, и в ухудшении некоторых других показателей безопасности морской техники, а также в резком ускорении процессов электрохимической коррозии судовых корпусов и других металлоконструкций, в ускорении процессов старения электрической изоляции и т.д. Таким образом, судовые электросистемы, как и морские суда в целом, в результате перевода бортовых потребителей на электропитание трехфазным переменным током в некоторых своих частях приобрели дополнительную аварийность и стали существенно более опасными.

Однако в силу особо низкой частоты возникновения подобных событий, а также в силу крайне медленного развития процессов старения и коррозии элементов судового оборудования и металлоконструкций, указанные ухудшения долго оставались скрытыми и для их выявления потребовалось проведение специальных исследований. В то же время они повлекли за собой увеличение эксплуатационных затрат, необходимых для сохранения работоспособности флота.

Очевидно, что дальнейшее совершенствование судовой энергетики должно предусматривать продолжение работ по выявлению и устранению указанных и других скрытых негативных последствий перехода от использования в ЭЭС постоянного тока к применению трехфазного переменного тока. В этом направлении продолжают активные исследования и разработки. Примером подобных усилий являются разработки бортовых электросистем двойного рода тока, основанных на широком применении силовой полупроводниковой техники, и ряд других проектов и решений.

Изучение причин пожарной аварийности и смертельного электротравматизма на судах отечественного рыболовецкого флота приводит к выводу о том, что доминирующей причиной упомянутого выше ухудшения показателей опасности бортовых ЭЭС явилось резкое ослабление их изолированности от корпусов морских объектов. Оно сопровождается соответствующим увеличением токов однофазных замыканий на корпус, который в этих случаях следует рассматривать как количественный показатель степени изолированности ЭЭС и уровня их опасности.

### **Причина уменьшения степени изолированности бортовых ЭЭС от корпуса судна**

Изоляция бортовых электросистем по отношению к корпусу обеспечивается применением режима изолированной нейтрали [1] и поддержанием сопротивления их корпусной изоляции на достаточно высоком уровне. В электросистемах постоянного и переменного токов контроль текущего состояния корпусной изоляции обычно осуществляется одним и тем же способом. Он заключается в измерении сопротивления изоляции щитовыми или переносными мегомметрами. По существу, мегомметры представляют собой микроамперметры со встроенными в их конструкцию источниками фиксированного постоянного напряжения. Под действием этого напряжения осуществляются испытания корпусной изоляции ЭЭС на её электропроводность. Для этого через всю совокупность диэлектрических конструкций, входящих в устройства различных элементов судового электрооборудования и вместе образующих единую изоляцию ЭЭС по отношению к корпусу, пропускается постоянный ток, измеряемый мегомметром. Его значение фиксируется на шкале, отградуированной в кило- и мегаомах. Они и рассматриваются как показатель степени изолированности бортовых электросистем от судовых корпусов.

Для электросистем постоянного тока подобные измерения сопротивлений изоляции действительно являются объективными показателями их изолированности от корпуса и, следовательно, их безопасности. Однако применение этой же методики для оценки изолированности и безопасности трехфазных ЭЭС невозможно признать обоснованным. Дело в том, что на переменном токе емкостные сопротивления в схеме замещения корпусной изоляции уменьшаются от значения, равного бесконечности и соответствующего разрыву цепи, до нескольких сотен или даже десятков Ом. В этом случае ток утечки на корпус минует активную ветвь схемы замещения изоляции и замыкается практически только через её емкостное сопротивление. При этом активное сопротивление корпусной изоляции остается по величине близким к сопротивлению изоляции на постоянном токе. При исправном состоянии изоляции его величины обычно измеряются сотнями килоом, мегомами или десятками мегом. Проведенные измерения в электросистемах большого количества морских судов подтвердили, что величины активных и емкостных сопротивлений корпусной изоляции обычно отличаются друг от друга на несколько порядков. В связи с этим перевод бортовых электросистем на трехфазный ток сразу уменьшает полное сопротивление их корпусной изоляции на такое же количество порядков. Подобные ослабления изоляции электросистем фактически приводят к её электрическому присоединению к корпусам морской техники.

### **Пожарная опасность судов с трехфазными бортовыми ЭЭС**

Для определения достигнутых в действительности уменьшений сопротивлений корпусной изоляции в электросистемах действующих судов было обследовано более 150 бортовых трехфазных ЭЭС, смонтированных на самых разнообразных морских объектах. Они отличаются друг от друга своими назначением, размерениями корпусов, мощностями электростанций и ряда других характеристик. Их рассмотрение совместно со статистикой пожаров, произошедших на судах рыболовецкого флота, показало, что с уменьшением емкостной составляющей полного сопротивления кор-



пусной изоляции в трехфазных ЭЭС и с увеличением характерных для них уровней токов однофазных замыканий на корпус происходит быстрое увеличение относительного количества пожаров, приходящихся на одно судно в год. Рост этого показателя происходит быстрее, чем по квадратичной зависимости. Построенная по этим данным зависимость охватывает около 30 тысяч судов-лет наблюдений, что вполне достаточно для получения результатов, обладающих исчерпывающей достоверностью.

Само существование указанной зависимости является достаточным доказательством того, что переход от постоянного тока к трехфазному переменному току действительно привел к существенному повышению пожарной аварийности морской техники. При этом по мере увеличения уровня электрификации морских флотов происходит дальнейшее ослабление изоляции и увеличение их относительной пожарной аварийности. С другой стороны, существование указанной зависимости подтверждает, что важнейшим направлением в достижении более высокого уровня пожарной безопасности морских судов является увеличение сопротивления корпусной изоляции переменному току в их электросистемах. В то же время, показания мегомметров, измеряющих сопротивление корпусной изоляции ЭЭС по отношению к постоянному току, не позволяют получить хотя бы приблизительные количественные оценки степени пожарной опасности судов, имеющих трехфазные электросистемы.

Описанная выше зависимость относительного количества пожаров от средних значений токов однофазных замыканий на корпус в ЭЭС разных групп судов показывает, что при малых значениях емкостной составляющей полного сопротивления изоляции её изменения слабо влияют на пожарную аварийность судов. Верхняя граница этого диапазона совпадает с предельным дугобезопасным значением емкостного сопротивления изоляции. Оно соответствует предельному току глухого однофазного замыкания, выше которого, как показали эксперименты с реальной дугой, существование устойчиво горящих электрических дуг вполне возможно. Указанное значение тока равно 1,3А.

При токах менее 1,0-1,2А возбудить устойчивую заземляющую дугу практически невозможно. Однако могут возникать неустойчивые дуговые процессы. Они прекращаются только при уменьшении токов однофазных замыканий до значений в 0,4-0,5А.

Более подробные исследования, проведенные в области малых токов, не способных возбудить устойчивую электрическую дугу, показали, что и при отсутствии дуговых процессов, возникновение пожароопасных явлений остается возможным. Они обусловлены не высокой температурой дуги, а пожароопасными явлениями, вызываемыми бурным выделением джоулевого тепла, происходящего в дефектах и повреждениях изоляции под воздействием тока утечки на корпус. Исследования показали, что в судовых кабелях с резиновой изоляцией типов КНР, НРШМ, МЭРМ и др. их самовоспламенение возможно только при токах глухих однофазных замыканий, превышающих, приведенные в таблице 1 пороговые значения.

Таблица 1

**Пороговые значения пожаробезопасных токов замыканий на корпус, не приводящих к самовоспламенениям судовых кабелей**

Номинальное напряжение сети, В	Пороговое значение пожаробезопасных токов, А
380	0,43
220	0,74
127	1,29

Приведенные выше пороговые дуго- и пожаробезопасные значения заземляющих токов однофазных замыканий на корпус оказываются во много раз меньше аналогичных предельных допустимых токов, установленных Правилами устройства электроустановок (ПУЭ) [2] в качестве пороговых дугобезопасных токов для высоковольтных электросетей средних классов напряжений (от 3 до 35кВ). Они составляют величины от 5 до 30А. Значительные расхождения между нормами ПУЭ и полученными результатами их определения в приложении к судовым кабельным сетям указывает на своеобразие судовых условий и на более высокий уровень пожарной опасности бортовых ЭЭС по сравнению с опасностью промышленных электроустановок.

## Электроопасность судов с трехфазными ЭЭС

Существует ГОСТ [3], устанавливающий предельные допустимые напряжения прикосновения и токи, при воздействии которых на человека вероятность для него смертельного исхода считается крайне незначительной, а электробезопасность для людей, попавших под это воздействие, – практически обеспеченной. Однако использование этого ГОСТа для оценки электробезопасности отдельных судов и их электросистем оказывается весьма затруднительным, поскольку в нем используется двухпараметрический показатель электроопасности, связывающий величины допустимых токов с продолжительностью пребывания человека под его воздействием. Обычно время протекания тока через тело человека заранее трудно предугадать, а, следовательно, остается неизвестной и величина тока, которую следует считать допустимой, поскольку ГОСТ [3] охватывает величины безопасных токов от 1-3мА до 650мА.

Невозможность использования норм ГОСТа к оценке электроопасности судовых ЭЭС привела к необходимости применения иного подхода. Он основывается на анализе статистических данных о смертельных электропоражениях, произошедших на всех судах отечественного морского рыбопромышленного флота. За определенный период продолжительностью в 11 лет на промысловых судах общей численностью свыше 2,7 тысяч единиц, специалистами института «Гипрорыбфлот» были зафиксированы все сообщения о смертельных электротравмах членов экипажей судов рыбопромышленного флота (РПФ) [4]. Эти данные следует считать вполне достоверными, поскольку они не могут быть каким-либо образом сфальсифицированы в условиях действующей системы охраны труда и контроля безопасности мореплавания. Полученные данные соответствуют примерно 30 тысячам судо-лет наблюдений. Их сопоставление с результатами измерений токов однофазных замыканий на корпус, зафиксированных на судах, позволило выделить группу флота, на которой электробезопасность ЭЭС обеспечивается практически полностью. Такой подход более точно соответствует задачам оценки опасности морской техники и разработке способа её защиты. Результаты сопоставления указанных данных в виде распределения долей относительного числа всех погибших приведены в таблице 2.

Таблица 2

### Распределение долей общего количества погибших от электротравм членов экипажей между группами судов рыбопромышленного флота (РПФ)

Группа судов РПФ	Добывающие суда			Транспортные рефрижераторы	Перерабатывающие и принимающие суда
	малые	средние	большие		
Доля в общем количестве погибших, %	0,00	17,24	24,14	13,79	44,83
Среднее значение тока глухого ОЗ, А	0,48	1,05	1,62	1,28	2,3

Распределение долей в общем относительном количестве погибших, т.е. в среднем количестве смертей, найденном в пересчете на одно рыбопромышленное судно в год, показывает, что по степени опасности отдельные группы судов существенно расходятся между собой. Для них возможность гибели члена экипажа от электротравмы в большой степени определяется средним значением тока однофазных замыканий на корпус в бортовых электросистемах каждой из выделенных групп рыбопромышленного флота, т.е. степени их изолированности от корпусов судов, задаваемых особенностями их проектов.

Практически полной электробезопасностью обладает самая многочисленная часть отечественного рыбопромышленного флота, состоящая из малых добывающих судов. В их электросистемах емкостные составляющие полных сопротивлений корпусной изоляции формируют токи глухого однофазного замыкания на корпус, в среднем составляющие величину около 0,5А. Полученная таким образом оценка практически безопасного тока более, чем на два порядка превосходит длительно безопасный ток, установленный ГОСТом [3] и равный 1-3мА. Вместе с тем, статистически безопасный ток, найденный с учетом данных [4] почти совпадает с величиной кратковременного

безопасного тока, который согласно тому же ГОСТу [3], равен 650мА. Некоторое расхождение между найденной оценкой безопасного тока глухого замыкания на корпус и величиной кратковременного безопасного тока, установленного ГОСТом [3] по результатам изучения реакций человека на электрические воздействия или определенные в ходе исследований смертельных электротравм, описанных, например, в [5], могут объясняться с одной стороны, тем, что средний уровень токов однофазных замыканий на корпус в электросистемах малых рыбопромысловых судов случайно мог оказаться несколько ниже порогового значения. Он действительно безопасен, но безопасными могут оказаться и другие токи, несколько превышающие установленную величину. С другой стороны, следует учесть, что пороговые величины токов, зафиксированные ГОСТом, уменьшаются по мере увеличения времени их воздействия на человека. Продолжительность пребывания человека под током при его случайном прикосновении к одной из фаз ЭЭС невозможно определить, однако она почти всегда ограничена самопроизвольным отдергиванием руки или другого участка тела от источника электрического тока. Таким образом, при случайных прикосновениях время воздействия тока на человека также оказывается ограниченным. Однако, в отличие от данных ГОСТа, продолжительность случайного прикосновения остается неизвестной. Поэтому невозможно среди многих безопасных значений токов, приведенных в ГОСТе, указать ту величину, которая соответствует времени до самопроизвольного рефлекторного освобождения человека от его воздействия и которую следует сопоставлять с безопасной величиной, найденной на основе использования статистики смертельных поражений.

Главный результат проведенного исследования и определения статистически безопасного тока замыкания на корпус заключается в возможности отказаться от двухпараметрического критерия электробезопасности, использованного в ГОСТе, и заменить его однопараметрическим критерием в виде тока глухого однофазного замыкания на корпус. Можно показать, что при расчетном сопротивлении тела человека, принимаемое равным 1кОм, величины токов глухого замыкания через тело человека почти совпадают.

Это приводит к заключению о том, что при уменьшении токов однофазных замыканий на корпус во всех электросистемах морского электроэнергетического хозяйства до значения 0,5А или ниже создаются условия для полного исключения опасности смертельного исхода при электротравмах членов экипажей судов, входящих в состав этого хозяйства.

### **Коррозионная опасность трехфазных ЭЭС**

Опасность переменных токов в развитии процессов электрохимической коррозии судов обычно серьезно недооценивается. Более того, в классических монографиях [6,7] имеются прямые указания на полную безопасность переменных токов как фактора резкого ускорения процессов коррозионного разрушения судовых металлоконструкций. Поэтому при защите морской техники от коррозии основное внимание уделяется защите от коррозионного воздействия постоянных токов. Для подтверждения или опровержения предположения о коррозионной безопасности переменного тока, а также для обнаружения нежелательных побочных явлений, связанных с использованием устройств защиты судов от повышенной пожаро- и электроопасности, по инициативе Российского речного регистра и при его организационной поддержке был начат многолетний эксперимент, продолжающийся до настоящего времени и длящийся уже 10 лет. Эксперимент проводится на действующем судне, в качестве которого был выбран буксир-кантовщик «В. Албанов», принадлежащий Калининградскому морскому рыбному порту. Следует подчеркнуть, что принцип действия, установленного на этом судне защитного устройства направлен на компенсацию емкостной проводимости корпусной изоляции или, что то же самое, на увеличение емкостной составляющей полного сопротивления изоляции ЭЭС по отношению к корпусу [8]. Применение защитного устройства приводит к значительному уменьшению тока однофазного замыкания на корпус, т.е. к увеличению степени изолированности судовой электросистемы от корпуса.

На момент начала экспериментального применения защитного устройства возраст судна «В. Албанов» уже превысил 25 лет. Оно уже тогда относилось к старым судам, уже исчерпавшим свои нормативные (расчетные) сроки эксплуатации или близкие к их исчерпанию. По истечении последующих 8,5 лет эксплуатации, проходившей с уже установленным в судовой ЭЭС защитным устройством, судно пе-

рестало активно эксплуатироваться и было выведено в отстой. Необходимость такого решения была вызвана организационными проблемами порта, но не техническим состоянием судна, которое до настоящего времени остается вполне исправным. В конце периода активного использования буксира его возраст составил около 34 лет. Установка в его электросистеме защитного устройства разделила этот период на две неравные части – до и после установки устройства. Значительная продолжительность второй части этого периода позволила сопоставить скорости коррозионного разрушения одного и того же судна, происходящего под воздействием двух разных токов однофазного замыкания на корпус. Коррозионное воздействие электрического тока на судно прежде всего проявляется в состоянии его протекторной защиты. По наличию значительных различий в состоянии протекторов можно судить и о различиях в степени опасности коррозионных воздействий разных по величине переменных токов. Этим была бы экспериментально доказана гипотеза о том, что переменный ток способен ускорять коррозию судов. Причем темпы коррозии задаются величиной переменного тока.

Промежуточные обследования корпуса буксира привели к следующим заключениям:

1) протекание переменного тока через судовые металлоконструкции оказывает довольно сильное влияние на скорость коррозии судов;

2) применение защитных устройств, наряду с повышением пожаро- и электробезопасности бортовых ЭЭС, позволяет значительно повысить эффективность комплекса защитных мероприятий, направленных на защиту судов от коррозии.

### **Способ повышения изолированности бортовых трехфазных ЭЭС от корпуса судна**

Из изложенного выше следует, что для увеличения степени изолированности трехфазных ЭЭС от корпуса судна необходимо скомпенсировать емкостную проводимость её корпусной изоляции. Для этого может быть использован эффект «электрической пробки», возникающий при резонансе токов в цепи с параллельно включенными между собой емкостной и индуктивной проводимостями. Для создания резонанса необходимо параллельно с емкостной проводимостью корпусной изоляции дополнительно включить индуктивную проводимость, представленную в виде катушки с ферромагнитным сердечником [9]. Катушки включают между бортовыми ЭЭС и корпусами судов по способам, описанным в, например, в патентах [10,11]. При их настройке в резонанс с емкостными проводимостями корпусной изоляции возникает резонанс, приводящий к многократному уменьшению токов однофазного замыкания на корпус и к соответствующему повышению безопасности как бортовых ЭЭС, так и судна в целом.

### **Заключение**

1. Перевод морского электроэнергетического хозяйства с постоянного тока на трехфазный переменный ток сопровождался значительным улучшением эксплуатационных свойств морской техники, но одновременно существенно ухудшил показатели её пожаро- и электробезопасности, а также резко ускорил процессы электрохимической коррозии стальных корпусов и других металлических частей и конструкций судов.

2. В ходе проведения исследований определены нормы изолированности бортовых электроэнергетических систем от корпусов судов, выраженные через пороговые значения допустимых токов однофазных замыканий на корпус по условиям пожарной безопасности судов и безопасности членов их экипажей при случайных прикосновениях людей к одной из фаз бортовых электросетей. При формировании нормы изолированности ЭЭС от корпуса судна по условию её коррозионной безопасности следует использовать результаты длительного эксперимента по контролируемой эксплуатации судна с защитным устройством в его электросистеме и считать нормы пожаро- и электробезопасности бортовых ЭЭС близкими к нормам их коррозионной безопасности.

3. Разработанные защитные устройства, вызывающие режим резонанса токов в корпусной изоляции и, таким образом, повышающих изолированность бортовых ЭЭС от корпусов морской техники способны одновременно обеспечивать безопасность морской техники сразу по трём важнейшим показателям – по показателям пожаро- и электробезопасности ЭЭС и по показателю их коррозионной безопасности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила классификации и постройки морских судов. Часть XI. Электрическое оборудование. – Санкт-Петербург: Российский морской регистр судоходства, 2018. – 138 с.
2. Правила устройства электроустановок (ПУЭ) – 7-е изд. – М., ЭНАС. – 2011. – 552 с.
3. ГОСТ 12.1.038 – 82. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновений и токов.
4. Безопасность мореплавания и ведения промысла / Государственный научно-исследовательский институт по развитию и эксплуатации флота («Гипрорыбфлот») – Вып. 103-126. – 1996-2008 гг. – СПб.
5. Манойлов В.Е. Основы электробезопасности / В.Е. Манойлов. – Л., Энергоатомиздат. – 1985. – 340 с.
6. Коррозия и защита судов: Справочник / Под ред. Е.Я. Люблинского, В.Д. Пирогова – Л., Судостроение, 1987. – 376 с.: ил.
7. Улиг Г.Г., Ревя Р.У. Коррозия и борьба с ней. Введение в коррозионную науку и технику. Пер. с англ. / Под ред. А.М. Сухотина. – Л., Химия, 1989. – Пер. изд., США, 1985. – 456 с.: ил.
8. Благинин, В. А. Результаты длительных натурных испытаний устройства защитного заземления нейтрали для судовых электросистем / В. А. Благинин, И.Е. Кажекин, В.М. Юсып, А.М. Москалюк, Д.П. Сиренко // Вестник Мурманского государственного технического университета. - 2015. - № 1. - С. 124-129.
9. Благинин, В. А. Варианты защиты судовых электросистем от однофазных замыканий / В.А. Благинин, И.Е. Кажекин // Безопасность жизнедеятельности. - 2010. - № 3. - С. 23-30.
10. Способ заземления нейтрали: пат. 2516437 Рос.Федерация / В.А. Благинин, И.Е. Кажекин. опубл. 20.05.14. Бюл. №14.
11. Способ компенсации токов однофазного замыкания: пат. 2653510 Рос.Федерация / И.Е. Кажекин, В.А. Благинин, В.М. Юсып. опубл. 10.05.18. Бюл. №3.

## THE PROBLEM OF ISOLATION OF ONBOARD ELECTRICAL SYSTEMS FROM SEA VESSEL HULLS AND THE METHOD OF ITS SOLUTION

<sup>1</sup>Blaginin Vladimir Anatolyevich, Candidate of Sciences in Technology, director

<sup>2</sup>Volkogon Vladimir Alekseevich, Candidate of Sciences in Economics, rector

<sup>3</sup>Kazhekin Ilya Evgenievich, Candidate of Sciences in Technology

<sup>4</sup>Yusyp Vyacheslav Mikhailovich, head of the department

<sup>1</sup>Autonomous Electric Systems LLC, , Kaliningrad, Russia, e-mail: <sup>1</sup>npp-met@rambler.ru

<sup>2,3</sup>Kaliningrad state technical university, Kaliningrad, Russia, e-mail: <sup>3</sup>kazhekin@mail.ru

<sup>4</sup>Branch of the Military Educational Scientific Center of the Navy (Naval Academy)

(Kaliningrad), Kaliningrad, Russia, e-mail: <sup>4</sup>v-y48@yandex.ru

*The report shows the general reason for the deterioration in the safety indicators of marine equipment, which occurred as a result of the transfer of the entire electric power industry of the marine fleets from direct current to three-phase alternating current, defines the criteria and safety standards for ships that quantify the threats from three-phase electrical systems and describes the method of protection against these threats.*

## **ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ АДАПТАЦИИ СУДОВОЙ СЕТИ ИНОСТРАННЫХ СУДОВ К ПИТАНИЮ С БЕРЕГА В РОССИЙСКИХ ПОРТАХ**

<sup>1</sup>Вольский Антон Борисович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электрооборудования и автоматики судов

<sup>2</sup>Новосёлов Кирилл Андреевич, преподаватель кафедры электрооборудования и автоматики судов

<sup>1,2</sup>Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ»

*Объектом исследования является промежуточный преобразователь частоты и напряжения, который требуется для получения электроэнергии необходимых параметров, чтобы питать судовые потребители. Цель – усовершенствовать систему питания с берега путем установки современного полупроводникового преобразователя для адаптации параметров электросети. В процессе работы исследовался алгоритм питания потребителей как от судовых источников электроэнергии, так и от береговых сетей, проводились анализы схем преобразования частоты и напряжения исходного преобразователя и предлагаемого взамен, также рассматривались конструктивные исполнения преобразователей, выявлялись достоинства и недостатки. В результате исследования была подчеркнута важность соблюдения стандартов сети при питании судовых потребителей, предложен современный преобразователь параметров сети, разработана схема соединения преобразователя с электрораспределительной системой судна, представлены экономические и экологические аспекты проекта. Установка может применяться для преобразования параметров электроэнергии, таких как напряжение и частота, чтобы питать потребители, требующие другие величины, а также в качестве промежуточного пункта в процессе электроснабжения судна с берега.*

### **Введение**

Судовые электрические системы питания различаются параметрами судовой сети – напряжением, частотой и родом тока. Это зависит от принятых стандартов напряжения и частоты страны-производителя судна.

Российский и Европейский стандарты - едины, а именно, 220-240 В, 50 Гц – однофазная сеть и 380 В, 50 Гц – трехфазная сеть. Американский стандарт – 110-127 В, 60 Гц – однофазная сеть и 440-480 В, 60 Гц – трехфазная сеть. Основной частотой переменного тока на судах отечественного флота принята частота 50 Гц, а на судах иностранной постройки принята частота 60 Гц.

Суда работают по всему миру и вследствие разницы стандартов электросети, в частности, при питании судна от береговой подстанции во время стоянки в порту, возникает необходимость установки промежуточных преобразователей.

Вследствие вышесказанного, цель работы – усовершенствовать систему питания с берега путем установки современного полупроводникового преобразователя для адаптации параметров электросети.

### **Модернизация судовой электростанции при питании с берега**

Азимутальный буксир «Шторм», построенный в 1982 году в США, предназначен для буксировки самоходных и несамоходных судов внутриводной акватории и за ее пределами. Обеспечивает сопровождение судов через каналы, производит швартовные операции крупногабаритных судов. Напряжение судовой сети составляет 440-460 В при переменном трехфазном токе с частотой 60 Гц и переменного однофазного тока – 120 В, а также приняты другие номинальные напряжения: 120 В и 208 В (при схеме соединения «звезда») и 120/240 В (при схеме соединения «треугольник»). В состав преобразователей входят понижающие трансформаторы напряжения, автотрансформатор.

Береговое питание осуществляется посредством электромашинного преобразователя по схеме «двигатель-генератор» ввиду несовместимости стандартов судовой электросети с электросетями РФ. Структурная схема судовой электростанции представлена на рисунке 1.

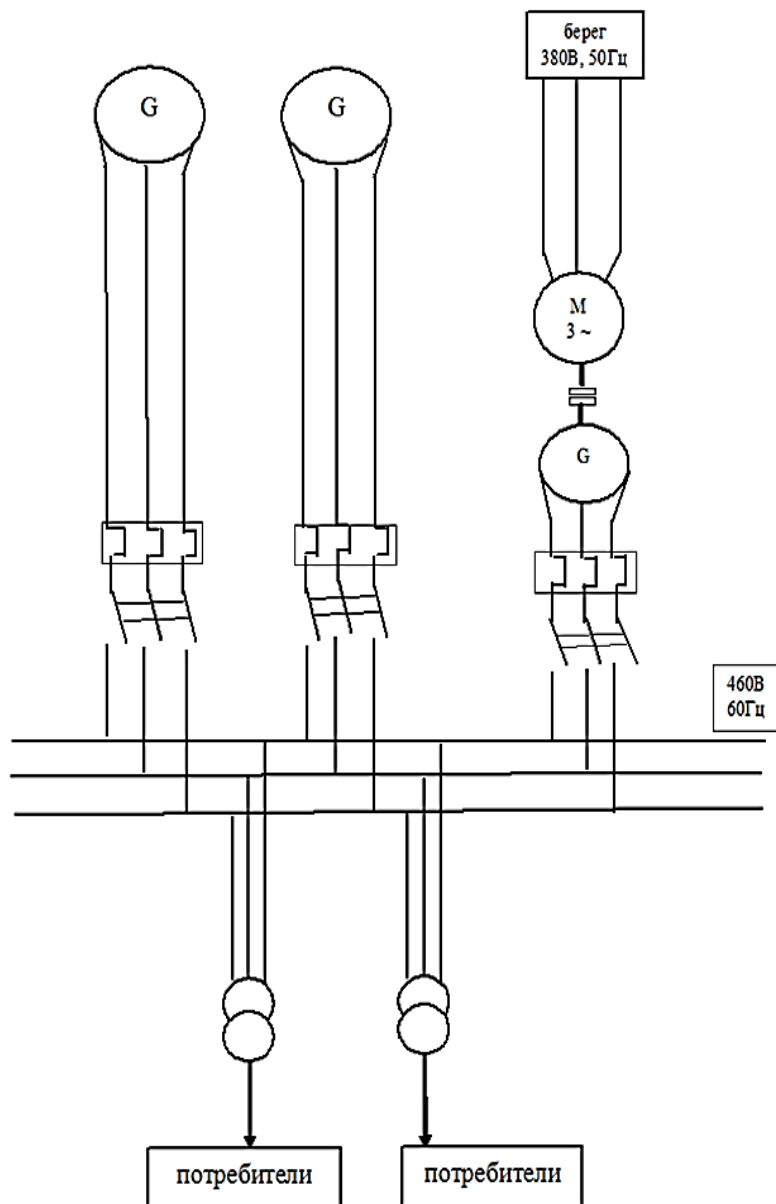


Рис. 1. Структурная схема судовой электростанции.

Исходный преобразователь по конструкции состоит из 2-х машин: асинхронного трехфазного электродвигателя и синхронного трехфазного генератора, соединенные между собой ременной передачей.

К достоинствам таких преобразователей относятся независимость параметров преобразуемой и получаемой энергии и возможность совмещать разные типы и серии электрических машин для соответствующих нужд. Ременная передача обеспечивает бесшумность работы по сравнению с другими видами передач.

Существенными недостатками таких преобразователей являются:

- Низкий КПД,  $\eta = \eta_{\text{двиг}} * \eta_{\text{ген}}$ ;
- Регулярность и сложность обслуживания, что особенно затруднено в современных условиях;
- Существенный уровень вибрации и шума;
- Громоздкость конструкции;
- Износ ремня, вследствие чего снижается надежность преобразователя в целом.

В качестве стабилизированного источника переменного напряжения для объектов, требую-

щих определенные значения параметров электросети возможно использовать статические преобразователи частоты и напряжения (СПЧН). Структурная схема СПЧН представлена на рисунке 2.

СПЧН гарантирует фактически синусоидальное напряжение в случае нагрузки, в которой линейные элементы зависят от тока или напряжения.

Возможность с высокой степенью точности поддерживать напряжение и частоту. Значительно превосходит по этим показателям электромашинные преобразователи.

При возникновении нештатной ситуации или короткого замыкания, обнуление напряжение происходит незамедлительно, без перенапряжений.

Возможность многократного включения и выключения преобразователя во время работы.

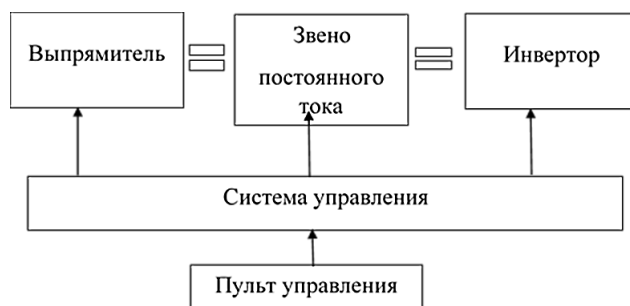


Рис. 2 Структурная схема СПЧН.

Инвертор СПЧН построен на базе высокоскоростных IGBT-транзисторов, которые предусматривают высокочастотную широтно-импульсную регулировку выходного напряжения. Такие транзисторы складываются из двух транзисторов – биполярного и полевого, заключенных в совместную полупроводниковую структуру. Биполярный транзистор формирует силовой канал, а полевой – канал управления. Силовой канал выполнен в виде сдвоенного модуля, который представляет собой последовательное соединение двух транзисторов. IGBT – транзисторы работают на принципе открытия и закрытия ключа. Время нахождения в открытом или закрытом состояниях может управляться. Поэтому частота выходного напряжения формируется исходя из продолжительности нахождения транзисторов в том или иной позиции. Вместе с тем, амплитуду выходного напряжения определяет широтно-импульсная модуляция. Она же отвечает и за формирования синусоидальной формы выходного напряжения. Чем дольше ключ находится в открытом состоянии, тем выше уровень выходного напряжения. Встроенный процессор определяет время нахождения ключа в открытом состоянии.

Это дает много преимуществ по сравнению с другими преобразователями, а именно:

- Контроль синусоидального напряжения или тока высокого качества;
- Большой диапазон настройки уровня выходного напряжения (от 5 % до 100 %), с любой установленной скоростью;
- Регулировка частоты выходного напряжения в широких пределах (от 49 до 120 Гц);
- Возможность поддерживать синусоидальное напряжение или тока при работе на нелинейной нагрузке;
- Скоростное ограничение токов и напряжений в случае аварийного режима;
- Высокий КПД;
- Низкий уровень шума;
- Прост в обслуживании;
- При выходе из строя составного элемента, заменяется блок целиком;
- Менее дорогостоящий ремонт по сравнению с электромашинными преобразователями.

Расчет мощности судовой электростанции в режиме «стоянка в порту» произведен табличным способом. Результаты расчета подтвердили требуемую мощность  $S_{расч.} = 34,6$  кВт. По результатам расчета подобран СПЧН отечественного производства с характеристиками, представленными в таблице 1.



## Характеристики преобразователя

Номинальное напряжение питающей сети, 380В	380
Род тока питающей сети	переменный
Число фаз питающей сети	3
Частота напряжения питающей сети, Гц	50
Номинальное выходное напряжение, В	20-2800
Род тока выходного напряжения	переменный
Число фаз выходного напряжения	3
Частота выходного напряжения, Гц	49-120
Номинальная выходная мощность для переменного тока, кВА/кВт	250/50
Перегрузочная способность, %	5
КПД, %	97
Способ охлаждения	Принудительно воздушный
Режим работы	длительный

Разработанная модернизированная схема судовой электростанции при питании судна с берега представлена на рисунке 3.

Для точного согласования выходного напряжения с требуемым напряжением нагрузки в схеме применен согласующий трансформатор Тр1. Варьируя схемы включения обмоток трансформатора, можно изменять выходное напряжение, тем самым обеспечивая оптимальное согласование по мощности источника с нагрузкой, также регулировать выходное напряжение, согласовывая с напряжением, требуемым нагрузкой. Это позволит обеспечить оптимальную загрузку по току и напряжению СПЧН.

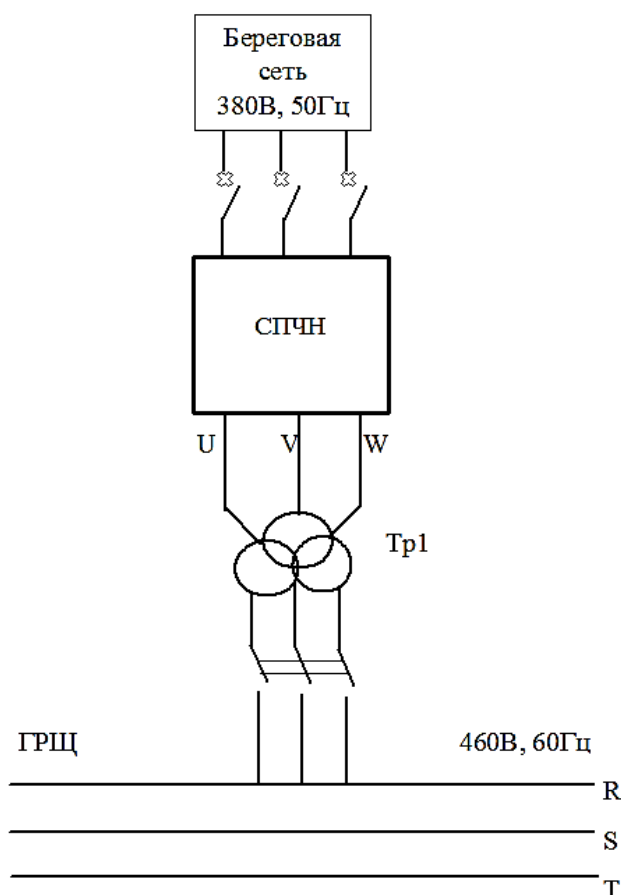


Рис. 3 Структурная схема судовой электростанции с применением СПЧН.

Сравнительные характеристики показателей эффективности применения электромашинного преобразователя и СПЧН приведены в таблице 2.

## Сравнительные характеристики

Характеристики	Электромашинный преобразователь	СПЧН
Количество включений	Ограничено	Не ограничено
КПД	81%	97%
Перегрузочная мощность $k_m$	2,3%	5%
Ремонтопригодность	Невысокая	Высокая

## Экономическое обоснование проекта

Проведем расчет экономической эффективности проекта и выделим некоторые выгоды в области экономической производительности.

Главными показателями эффективности настоящего проекта являются эффективность капиталовложения, эксплуатации электрооборудования и срок окупаемости.

Значительная часть потребляемой электроэнергии расходуется на то, чтобы обеспечить вращение электродвигателя. В этом отношении применение преобразователя частоты, построенного на полупроводниковых элементах рационально, поскольку позволяет экономить на потреблении электричества с сохранением своих функций. Не мало важным является тот факт, что преобразование электроэнергии нужных параметров для потребителей происходит с минимальными потерями.

Включение в сеть асинхронных электродвигателей характеризуется большими бросками пусковых токов. Это негативно влияет на работу электродвигателя, чревато дополнительной нагрузкой и вероятностью перегрузки. Это накладывает ограничение на количество включений и отключений. СПЧН можно включать и отключать неограниченное число раз.

Изоляция электродвигателей – чувствительное место. Материалы, из которых сделана изоляция, имеют разную сопротивляемость к нагреву. От этого зависит срок службы, надежность, технико-экономические характеристики электродвигателя.

КПД электромашинного преобразователя, поскольку он состоит из двух агрегатов определяет производство КПД электродвигателя и генератора.

$$\eta = \eta_d \cdot \eta_r \quad (1)$$

$$\eta = \eta_d \cdot \eta_r = 0,86 \cdot 0,94 = 0,81 = 81\%$$

КПД СПЧН равен 97%. Это значит, что почти вся электроэнергия, получаемая от сети, передается по назначению.

Электромашинный преобразователь ограничивает количество подключаемых потребителей, поскольку электродвигатель и генератор рассчитаны на определенную мощность. СПЧН могут быть использованы для разных целей, во многих областях, поэтому предусмотрен широкий диапазон мощностей, выходных напряжений и частот для любых нужд.

Перегрузочная способность электродвигателя составляет, %:

$$k_m = \frac{M_m}{M_n} = \frac{445,25}{193,6} = 2,3 \quad (2)$$

Перегрузочная способность СПЧН – 5 %

Электромашинный преобразователь требует регулярного технического обслуживания ввиду наличия вращающихся частей. Уход и смазка подшипников электродвигателя. Существенные трудности в обслуживании бесщеточного генератора связаны невозможностью уследить за состоянием элемента ротора. Это требует материальных вложений как на обслуживание, так и на ремонт.

Для передачи вращающегося момента используется ремень. Он довольно быстро изнашивается, что тоже требует дополнительных затрат.

Благодаря блоковому строению СПЧН дает возможность быстро заменить вышедший из строя компонент. СПЧН обладает большей ремонтопригодностью в отличие от электромашинных преобразователей, что тоже сказывается на капитальных вложениях.

Окружающая среда требует дополнительных защит для электродвигателя и генератора. Например, использование воздушных фильтров, кожухов, чтобы минимизировать отрицательное воздействие на изоляцию обмоток, так как это может привести к более раннему отказу.

Работа СПЧН построена по программируемой схеме, вероятность отказов минимальна.

Статический преобразователь дает экономичное разрешение проблемы несоответствия частот или напряжений при подключении судна к любой сети. СПЧН занимает малую площадь, подойдет для размещения вблизи распределительных устройств и трансформаторов. СПЧН повышают качество подводимой электроэнергии, применяя функцию увеличения коэффициента мощности, и стабилизируют напряжение и частоту. Полупроводниковые преобразователи частоты не нуждаются в техническом обслуживании, изнашивание частей не происходит, а значит меньше вложений. Экономия энергии происходит за счет возможности регулирования потребляемой мощности в зависимости от действительной нагрузки.

Уместна установка частотного преобразователя на каждом судне. Разница в стандартах, по крайней мере, частот уже создает некоторые препятствия для электроснабжения судов от береговых сетей (таблица 3).

Таблица 3.

### Стоимость основных материалов

Наименование оборудования	Количество Шт.	Цена за единицу, руб.	Общая стоимость, руб.
Автоматические выключатели	3	250	750
Клеммники	30	18	540
Кабель 1,5 м	6	300	1800
Крепления для кабеля	30	75	2250
Лента изоляционная	1	150	150
Статический преобразователь частоты 50 кВт	1	500000	500000
Согласующий трансформатор	1	180000	180000
Транспортные расходы	-	-	4000
Итого:			689500

Стоимость покупных изделий составила, руб:

$$S_m = 689500$$

Рассчитаем стоимость установки и настройки оборудования (таблица 4).

Таблица 4.

### Стоимость установки и настройки оборудования

Наименование выполняемых работ	Трудоемкость, час	Часовая ставка руб/час	Сумма заработной платы,
Сборка узлов	3	150	450
Демонтаж старого оборудования	5	230	1150
Установка нового оборудования	1,5	80	120
Настройка и испытания	1	80	80
Итого	-	-	1800

Стоимость установки и настройки оборудования составила, руб.:

$$S_{уст.} = 1800$$

Определим суммарные затраты по изготовлению модернизированного оборудования.

$$S = S_m + S_{уст.}, \quad (3)$$

где  $S_m$  – стоимость основных материалов, руб.,

$S_{уст.}$  – стоимость установки и настройки оборудования, руб.

Тогда

$$S = 689500 + 1800 = 691300$$

Определим экономию производственных средств при его эксплуатации.

Посчитаем годовую экономию электроэнергии по формуле:

$$\mathcal{E}_1 = (P_1 - P_2)Q_1 \cdot Q_2 \quad (4)$$

где,  $\mathcal{E}_1$  – годовая экономия электроэнергии;

$P_1$  – часовой расход до модернизации, кВт;

$P_2$  – часовой расход после модернизации, кВт;

$Q_1$  – годовой фонд рабочего времени, часов;

$Q_2$  – цена одного кВт, руб.

Тогда годовая экономия электроэнергии равна, руб.:

$$\mathcal{E}_1 = (32 - 31) \cdot 500 \cdot 10 = 5000$$

Общая годовая экономия составила 5000 руб.

Согласно общей практики срок окупаемости частотных преобразователей составляет от 3-х месяцев до 3-х лет.

### Заключение

Напряжение, частота и род тока являются основными параметрами СЭЭС. Именно они характеризуют надежность и экономичность работы и условия эксплуатации судового электрооборудования, от них зависят особенности исполнения СЭЭС, наконец определяют стандарт судовой сети. Использование преобразователей частоты дало возможность получить экономическую эффективность, которая достигается за счет сокращения потребления электроэнергии, расходов на ремонт, а также сокращение других производственных издержек, высокому КПД. Внедрение преобразователей частоты, построенных на полупроводниковых элементах, нашло широкое применение на судах.

Применение статического преобразователя дает экономичное разрешение проблемы несоответствия частот или напряжений при подключении судна к любой сети. СПЧН занимает малую площадь, подойдет для размещения вблизи распределительных устройств и трансформаторов. СПЧН повышают качество подводимой электроэнергии, применяя функцию увеличения коэффициента мощности, и стабилизируют напряжение и частоту. Полупроводниковые преобразователи частоты не нуждаются в техническом обслуживании, изнашивание частей не происходит, а значит меньше вложений. Экономия энергии происходит за счет возможности регулирования потребляемой мощности в зависимости от действительной нагрузки.

В ходе выполнения исследования была подтверждена необходимость наличия промежуточного преобразователя при электроснабжении судна от береговой сети; предложен современный преобразователь частоты и напряжения взамен исходному; обоснована позиция выбора в пользу отечественного преобразователя; описаны технические характеристики и достоинства; проведен анализ схем преобразования; разработана и описана схема сопряжения судовой электростанции с электросетями РФ; дана экономическая и экологическая оценки.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буксирные суда (проектирование и конструкция) / Б.В. Богданов, А.В. Слущкий, М.Г. Шмаков, К.Д. Васильев, Д.Х. Сорокин. – Л.: Судостроение, 1974. – 280 с.
2. Верескун В.И., Сафонов А.С. Электротехника и электрооборудование судов. // Л.: Судостроение, 1987, 280 с.
3. Баранников В.К. Эксплуатация электрооборудования рыбопромысловых судов. – М: МОРКНИГА, 2013. – 496 с.
4. Баранов А.П. Судовые автоматизированные электроэнергетические системы. – СПб.: Судостроение, 2005. – 528 с.
5. Мезин Е.К. Судовые электрические машины. – Л.: Судостроение, 1985. – 320 с.
6. Справочник судового электротехника. Т. 2. Судовое электрооборудование/ Под ред. Г.И. Китаенко – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Судостроение, 1980. – 624 с.
7. РМРС, Правила классификации и постройки морских судов, часть XI «Электрическое оборудование». – URL: <https://rs-class.org/upload/iblock/592/592a71ac86ed683ea98c2f8717f1f057.pdf>.

8. Статический преобразователь частоты и напряжения. – URL: <http://inverter.ru/ru/produkcija-i-razrabotki/katalog/staticheskie-preobrazovateli-chastoty/spchn-250/>.
9. Преобразователи частоты: учеб. метод. указания/ Е.В. Тумаева. – Нижнекамск: Нижнекамский химико – технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО «КНИТУ», 2015. – 28 с.
10. Преобразовательная техника: учебное пособие/М.В. Гельман, М.М. Дудкин, К.А. Преображенский. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – 425 с.
11. Преобразователи частоты. – URL: <https://drives.ru/stati/chastotnye-preobrazovateli>.

## **POSSIBLE WAYS OF ADAPTATION OF THE SHIP NETWORK OF FOREIGN VESSELS TO FEEDING FROM THE SHORE IN RUSSIAN PORTS**

<sup>1</sup>Volsky Anton Borisovich, candidate of technical sciences, associate professor

<sup>2</sup>Novoselov Kirill Andreevich, lecturer

<sup>1,2</sup>Baltic fishing fleet state academy, Kaliningrad, Russia

*The object of the study is an intermediate frequency and voltage converter, which is required to obtain electricity of the necessary parameters to power the ship's consumers. The goal is to improve the power supply system from the shore by installing a modern semiconductor converter to adapt the parameters of the power grid. In the process of work, the algorithm of power supply to consumers from both ship-based power sources and coastal networks was investigated, frequency and voltage conversion schemes of the original converter and the one proposed in return were analyzed, the design designs of the converters were also considered, advantages and disadvantages were identified. As a result of the study, the importance of observing network standards when powering ship consumers was emphasized, a modern converter of network parameters was proposed, a scheme for connecting the converter to the ship's electrical distribution system was developed, economic and environmental aspects of the project were presented. The installation can be used to convert electricity parameters, such as voltage and frequency, to power consumers requiring other values, as well as as an intermediate point in the process of supplying electricity to a ship from shore.*

УДК 681.586

## **АНАЛИЗ СООТНОШЕНИЯ ТОЧНОСТИ И БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ЧАСТОТНЫХ ДАТЧИКОВ**

Геллер Борис Львович, канд. техн. наук, доцент кафедры энергетики

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,  
Калининград, Россия, e-mail: [ivanov@fair.ru](mailto:ivanov@fair.ru)

*Целью работы является установление взаимосвязи между точностью и быстродействием при обработке сигналов частотных датчиков, работающих в условиях интенсивных электромагнитных помех. Определены зависимости погрешности определения периода и времени запаздывания от величины периода в отсутствие сглаживания и при различных вариантах выбора интервала сглаживания. Результаты представлены в графическом виде, облегчающем наглядный выбор компромиссного сочетания параметров при конфликте требований к точности и быстродействию.*

Частотные датчики широко применяются в судовых системах управления, например, для измерения частоты вращения двигателей внутреннего сгорания или электроприводов. Высокий уровень электромагнитных помех вызывает ошибку фиксации периода импульсов, что приводит к погрешности в определении частоты. Для уменьшения погрешности применяются различные методы усреднения (сглаживания) отсчетов. Однако усреднение неизбежно приводит к запаздыванию в канале измерения, что ухудшает динамику систем регулирования. Как правило, требования к точности и быстродействию конфликтуют, что проявляется особенно ярко при большом диапазоне изменения скоростей, характерном для регулируемых по частоте вращения судовых механизмов. Поэтому представляет практический интерес сравнение различных вариантов обработки сигналов частотного датчика по погрешности и быстродействию.

Считаем известной дисперсию  $D[\tau]$  случайной величины  $\tau$  – смещения фронта и спада импульсов датчика. Примем, что смещение фронта и спада распределены одинаково. Пусть истинное положение фронта импульса  $t_1$ , смещение фронта  $\tau_1$ . На спаде соответственные величины обозначим  $t_2$  и  $\tau_2$ . Тогда измеренное значение периода  $T = t_2 - t_1 + \tau_2 - \tau_1$ . Таким образом, дисперсия  $D[\Delta T]$  ошибки определения периода  $\Delta T$  есть дисперсия разности двух одинаково распределенных случайных величин, т.е.  $D[\Delta T] = 2 D[\tau]$ .

Будем характеризовать погрешность измерения периода относительным средним квадратическим отклонением  $\sigma_{отн} = \frac{\sigma[T]}{T}$ . Быстродействие будем оценивать максимальной величиной запаздывания  $T_{зап}$ .

Для выявления общих свойств исследуемых величин целесообразно выразить запаздывание и погрешность в относительных единицах.

Пусть известны минимальное значение периода импульсов  $T_{min}$  и максимальное значение  $T_{max}$ . В качестве базиса для представления временных интервалов и запаздывания удобно выбрать величину  $T_{max}$  – максимальное запаздывание при отсутствии усреднения. В качестве базиса для представления погрешности примем максимально возможную величину относительного среднего

квадратического отклонения  $\frac{\sqrt{D[\Delta T]}}{T_{min}} = \frac{\sqrt{2}\sigma[\tau]}{T_{min}}$ , соответствующую одиночному (без усреднения) измерению минимального периода. Таким образом, в относительных единицах любой временной интервал  $T$  выражается как  $T^* = T/T_{max}$ , а погрешность  $\sigma_{отн}$  выражается как  $\sigma_{отн}^* = \frac{\sigma_{отн} T_{min}}{\sqrt{2}\sigma[\tau]}$ .

Считаем, что измерение периода производится цифровым методом, то есть отсчет фиксируется в момент поступления очередного импульса. В этом случае различные варианты обработки сигнала отличаются способом усреднения. При наличии усреднения устанавливается некоторый временной интервал, фиксируются все отсчеты на этом интервале, и определяется среднее.

Рассмотрим характеристики погрешности и быстродействия при различных способах обработки сигнала.

Наиболее простой способ заключается в определении величины  $T$  без усреднения. При этом обеспечивается максимальное быстродействие, равное одному периоду импульсов. Таким образом,

$T_{зап}^* = \frac{T}{T_{max}} = T^*$ . Абсолютная погрешность  $\Delta T = \tau_2 - \tau_1$  при этом не зависит от величины  $T$ . Таким образом,  $\sigma_{отн}^* = \frac{\sigma[T]}{T \frac{\sqrt{2}\sigma[\tau]}{T_{min}}} = \frac{T_{min}}{T_{max}} \cdot \frac{1}{T^*}$ .

На рис. 1 представлены зависимости  $\sigma_{отн}^*$  и  $T_{зап}^*$  от  $T^*$  для рассматриваемого способа. Отношение  $T_{max}/T_{min}$  здесь и в дальнейшем условно принято равным 10. Как видно, в отсутствие сглаживания погрешность при максимальных частотах импульсов значительно возрастает.

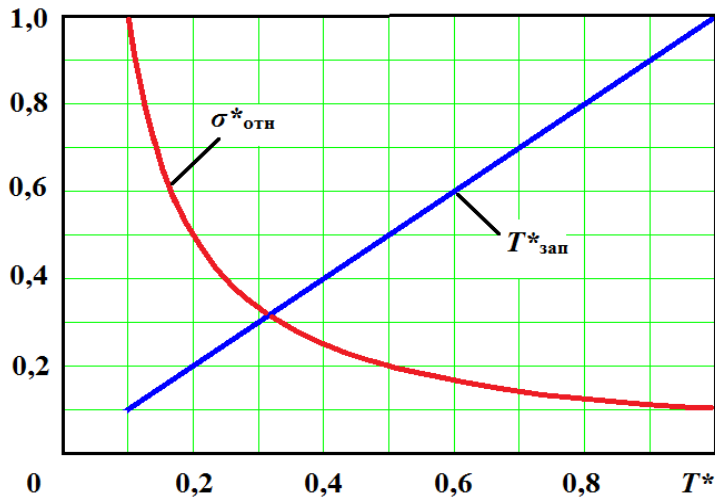


Рис. 1. Погрешность и запаздывание при отсутствии усредне-

Традиционным способом уменьшения погрешности является усреднение отсчетов за фиксированный интервал времени  $T_\phi$ . Для уменьшения абсолютной погрешности необходимо выбирать  $T_\phi \gg T_{max}$ , однако при этом резко снижается быстродействие. Однако с практической точки зрения значительно важнее минимизировать относительную погрешность, которая снижается при увеличении  $T$ .

Примем, что начало интервала совпадает с фронтом одного из импульсов датчика. По окончании интервала фиксируется количество  $N$  импульсов на интервале и время  $T_n$  отсчета последнего фронта. Таким образом, при  $T_\phi/2 < T < T_\phi$   $N = 1$ , при  $T_\phi/3 < T < T_\phi/2$   $N = 2$ , при  $T_\phi/4 < T < T_\phi/3$   $N = 3$ , и т.д. В общем случае можно записать:

$$N = \left\lfloor \frac{T_\phi}{T} \right\rfloor. \quad (1)$$

Период  $T$  определяется как  $T_w/N$ .

Запаздывание при этом способе всегда равно  $T_\phi$ . Для повышения быстродействия величину  $T_\phi$  целесообразно выбирать по возможности меньше, но она не может быть меньше  $T_{max}$ , так как при этом устройство теряет работоспособность при  $T = T_{max}$ . Поэтому принимаем  $T_\phi = T_{max}$ .

Среднее квадратическое отклонение величины  $T_n$  равно  $\sqrt{2}\sigma[\tau]$ . Поэтому среднее квадратическое отклонение величины  $T$  равно  $\frac{\sqrt{2}\sigma[\tau]}{N}$ . Тогда

$$\sigma_{отн}^* = \frac{\frac{\sqrt{2}\sigma[\tau]}{NT}}{\frac{\sqrt{2}\sigma[\tau]}{T_{min}}} = \frac{T_{min}}{T_{max}} \cdot \frac{1}{NT^*}. \quad (2)$$

На рис. 2 представлены зависимости  $\sigma_{отн}^*$  и  $T_{зап}^*$  от  $T^*$  в случае усреднения за фиксированный временной интервал при выборе  $T_\phi = T_{max}$ . Как видно, в нижней части диапазона частот датчика показатели этого и предыдущего способов близки, однако при высоких частотах достигается значительный выигрыш по точности за счет ухудшения быстродействия.

Рассмотренные способы не обладают способностью к адаптации при изменении требований к допустимым значениям погрешности и быстродействия. Значительно большей гибкостью обладает способ [1], предусматривающий формирование измерительного интервала  $T_\phi$  в диапазоне  $T_{min} < T_\phi < T_{max}$ . Выбором величины  $T_\phi$  возможно устанавливать приемлемый компромисс между точностью и быстродействием. При этом усложняется алгоритм обработки сигнала. Предусматриваются следующие операции:

- формируется временной интервал фиксированной длительности  $T_\phi$ , начало которого совпадает с передним фронтом одного из импульсов входного сигнала;

- измеряется длительность интервала  $T_{и}$ , начало которого совпадает с началом интервала  $T_{ф}$ , а окончание – с передним фронтом первого входного импульса, поступившего после окончания интервала  $T_{ф}$ ;
- подсчитывается число  $N$  входных импульсов, поступивших за время  $T_{и}$ ;
- определяется период импульсов  $T = T_{и}/N$ .

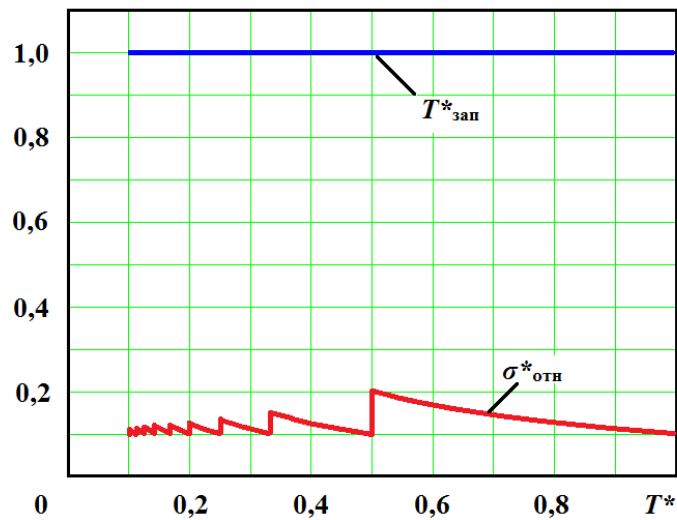


Рис. 2. Погрешность и запаздывание при  $T_{ф} = T_{max}$

Время запаздывания при этом способе равно  $T_{ф}$ .

Для удобства анализа введем параметр  $k$ , определяемый соотношением  $kT_{ф} = T_{max}$ . Тогда  $T_{зап} = T_{max}/k$ , и  $T_{зап}^* = 1/k$ .

Среднее квадратическое отклонение величины  $T_{и}$  равно  $\sqrt{2}\sigma[\tau]$ . Таким образом, величина  $\sigma_{отн}^*$  также определяется выражением (2).

На рисунках 3 – 6 приведены зависимости погрешности и запаздывания от  $T^*$  при различных значениях  $k$ . Из рисунков видно, как при изменении величины  $k$  происходит обмен точности на быстродействие.

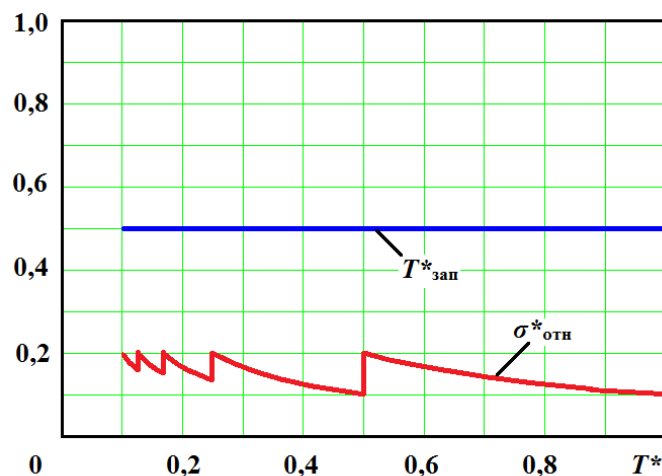


Рис.3. Погрешность и запаздывание при  $k = 0,5$



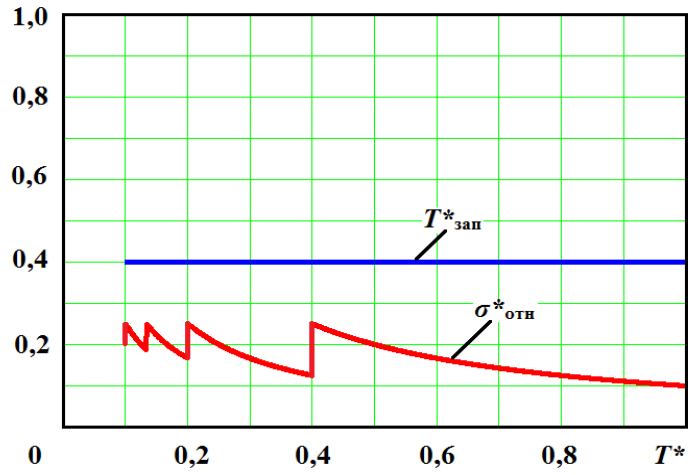


Рис. 4. Погрешность и запаздывание при  $k = 0,4$

Предлагаемая форма представления зависимостей при условии расширения диапазонов изменения параметров может найти практическое применение в качестве номограмм, которые позволят произвести быстрый и наглядный поиск компромисса при конфликте требований к точности и быстродействию.

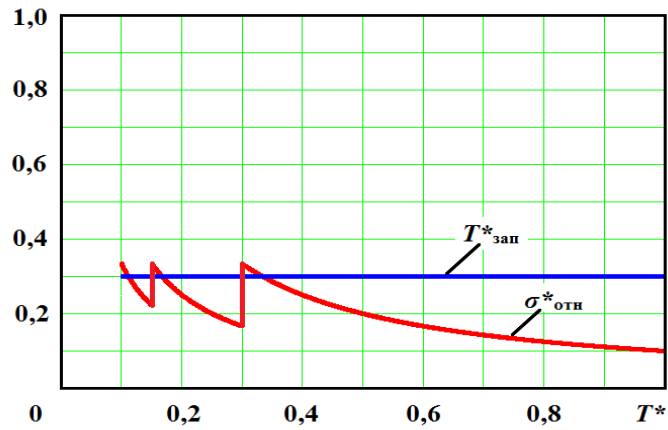


Рис. 5. Погрешность и запаздывание при  $k = 0,3$

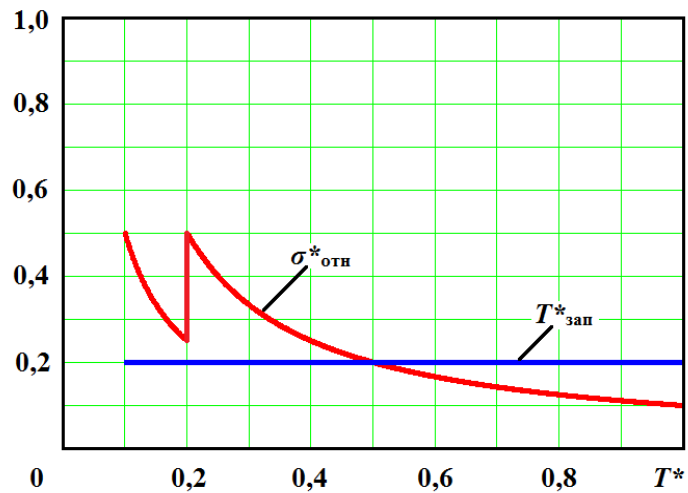


Рис. 6. Погрешность и запаздывание при  $k = 0,2$

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геллер, Б.Л. Повышение помехоустойчивости обработки сигналов частотно-импульсных датчиков // Электрооборудование судов и электроэнергетика: сборник научных трудов. – Калининград: Калининградский государственный технический университет, 2000. С. 30–33.

### **ANALYSIS OF THE RELATIONSHIP OF ACCURACY AND PERFORMANCE WITH DIFFERENT WAYS OF FREQUENCY SIGNAL PROCESSING SENSORS**

Geller Boris Lvovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Energy

Kaliningrad State Technical University,  
Kaliningrad, Russia, e-mail: boris.geller@klgtu.ru

*The purpose of the work is to establish the relationship between accuracy and speed in the processing of signals from frequency sensors operating in conditions of intense electromagnetic interference. The dependences of the error in determining the period and delay time on the period value in the absence of smoothing and with various options for choosing the smoothing interval are determined. The results are presented in graphical form, which facilitates the visual choice of a compromise combination of parameters in case of a conflict of requirements for accuracy and speed.*

УДК 621.316.722

### **МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ РАСЧЕТА УСТРОЙСТВА КОМПЕНСАЦИИ НЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ В СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ**

<sup>1</sup>Дмитриев Б.Ф., д-р техн. наук, профессор

<sup>2</sup>Галушин С.Я., канд. техн. наук, доцент

<sup>3</sup>Согинов С.А., канд. техн. наук, доцент

<sup>4</sup>Розов А.Ю., канд. техн. наук, доцент

<sup>5</sup>Максимова М.А., канд. техн. наук, доцент

<sup>1,2,3,4,5</sup>Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Россия, Санкт-Петербург, e-mail: office@smtu.ru

*При управлении режимами работы гребного электрического двигателя (ГЭД) применяются полупроводниковые преобразователи частоты, работа которых значительно снижает качество электроэнергии в СЭЭС. В настоящее время перспективным методом улучшения качества электроэнергии является применение устройств управления реактивной мощностью и активной фильтрации, т. е. компенсаторов неактивной мощности (КНМ), которым и посвящен данный материал.*

Структуры судовых электроэнергетических систем (СЭЭС) существенно многообразнее, чем обычные системы электроснабжения применяемые на производстве, так как вопросы проектирования транспортных систем имеют свою специфику, которая должна учитывать в первую очередь критерии

эффективности, параметры электроэнергии и электро-магнитную совместимость оборудования (особенности возникающие при работе в рамках одной системы основных функциональных узлов преобразователь-преобразователь и источник-преобразователь) и их оптимизацию [1, 2].

Структура создаваемой СЭЭС определяется потребителями электроэнергии (рис.1). При этом критериями ее эффективности служат коэффициент полезного действия, масса, показатели качества и надежности электроэнергии, а так же суммарные затраты, связанные со стоимостью и эксплуатацией. Как правило критерий массы для транспортных СЭЭС является одним из приоритетных. Коэффициент полезного действия (КПД) СЭЭС является определяющим для эффективности преобразования электроэнергии. Как правило, при оптимизации СЭЭС критерии массы и КПД вступают в противоречие. Например, при увеличении мощности источника электроэнергии, и следовательно массы, повышается его КПД. Основными критериями надежности СЭЭС в данном случае являются вероятность безотказной работы, интенсивность отказов и наработка до первого отказа.

Требования к качеству электроэнергии определяют непосредственно потребители и они же влияют на конструктивные особенности, массу и стоимость источников и преобразователей электроэнергии. Современное развитие науки и техники потребовало разработки СЭЭС, которые по предъявляемым требованиям не могут допускать сбоев в электроснабжении. Поэтому при проектировании современных СЭЭС должны закладываться характеристики оборудования обеспечивающие повышенную надежность. Источники и преобразователи электроэнергии необходимо резервировать и это приводит к увеличению массы и стоимости систем.

Развитие судостроения требует создания нового электрооборудования включающего разработку всего спектра электротехнических устройств и систем. Внедрение новой элементной базы позволит осуществить повышение КПД, коэффициента мощности, обеспечения электромагнитной совместимости и надежной работы систем судна в целом. Применение современных полупроводниковых преобразователей в схемах преобразователей частоты для управления гребными электродвигателями переменного тока большой мощности суда открывают новые возможности: высокую маневренность, надежность движительной установки, безопасность. Для систем большой мощности есть смысл использовать современные многоуровневые преобразователи напряжения на новой элементной базе.

При проектировании СЭЭС требуется учитывать условия работы (в основном климатические) и особенности эксплуатации (повышенные динамические и вибрационные нагрузки), а также необходимость организации электромагнитной совместимости устройств из-за компактного размещения устройств. [1,2]

Повышение автономности СЭЭС, улучшение их массогабаритных показателей при условии жестких требованиях к ним по качеству электроэнергии и надежности электроснабжения потребителей возможно обеспечить при использовании на транспортных агрегатах малогабаритных систем с рациональной структурой построения и оптимальными параметрами электроэнергии в основном зависит от верного выбора перспективных приводных двигателей, источников и преобразователей, коммутационных систем.

От параметров электроэнергии зависят характеристики СЭЭС, поэтому при выборе вида тока и источника питания необходимо учитывать нижеследующие факторы. Системы переменного тока включают в себя компактные электрические машины, преобразователи электроэнергии и коммутационные устройства.

Основным показателем является мощность СЭЭС. От этого параметра зависят критерии эффективности системы в целом. Значение необходимой мощности СЭЭС определяется потребителями. Для критичных потребителей необходимо создавать дополнительный резерв источников и преобразователей [3,4,5,12].

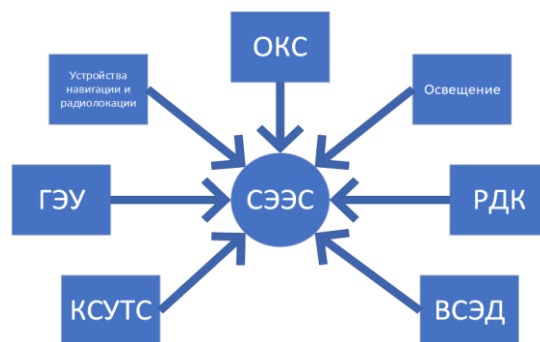


Рис.1 Структурная схема взаимосвязи СЭЭС; КСУТС – комплексная система управления технологическими средствами; ГЭУ – гребная энергетическая установка; ОКС – общекорабельные системы; РДК – резервно-двигательный комплекс; ВСЭД – вспомогательная система электродвижения)

Для современных судов существуют эффективные системы электродвижения на основе гребных электрических двигателей (ГЭД) с винторулевой колонкой (ВРК), обеспечивающие высокую маневренность судов и кораблей в различных режимах движения. Для более эффективного использования электрооборудования, ГЭД с ВРК подключаются к электропитанию от единой электроэнергетической системы (ЕЭЭС). Управление режимами работы ГЭД производится полупроводниковыми преобразователями частоты, что значительно ухудшает качество электроэнергии на общих шинах ЕЭЭС.

Преимуществом создания единых электроэнергетических систем (ЕЭЭС) перед децентрализованными системами является удобство в их эксплуатации. [3,6]

В единой ЭЭС все источники и потребители электрической энергии объединяются в одну энергетическую точку, которая представляет собой ГРЩ.

Для питания и управления частотой вращения ГЭД с ВРК применяют полупроводниковые преобразователи частоты (ППЧ). Их работа сопровождается генерированием в сеть высших гармоник тока и напряжения, которые снижают коэффициент мощности и искажают форму потребляемого тока и напряжения на шинах СЭЭС.

Предлагаемое разрабатываемое устройство компенсации неактивной мощности является электротехническим устройством, предназначенным для повышения коэффициента мощности, снижения высших гармоник тока сети до требуемых значений, указанных в [1,2] в статическом режиме и также для уменьшения пускового тока и повышения пускового момента асинхронного двигателя, работающего от сети ограниченной мощности. При разработке устройства компенсации неактивной мощности применяется активный фильтр (АФ) и компенсатор реактивной мощности (КРМ) [7,8,9,11]

В настоящее время в топологии силовой части распространено включение в схему компенсаторов неактивной мощности являющиеся базовыми элементами системы, на основе которых строятся более сложные топологии (Рис. 2). [10]

Мощные активные фильтры (10÷100МВА) включают в себя группы таких преобразователей подключенных последовательно или параллельно.

Для сравнения эффективности работы различных топологий силовой части активных фильтров, применяются следующие критерии сравнения:

- 1) Применение ключевых элементов:
  - а) соотношение мощности одного ключа к полной мощности устройства;
  - б) соотношение номинального рабочего напряжения силового ключа к значению напряжения сети, к которой подключено устройство.
- 2) Возможности управления силовыми ключами с учетом схмотехнической реализации:
  - а) амплитудно-импульсная модуляция (АИМ);
  - б) широтно-импульсная модуляция (ШИМ);
  - в) совместное использование ШИМ и АИМ модуляции.
- 3) Синусоидальность генерируемого напряжения и тока (коэффициент несинусоидальности, коэффициент мощности).

4) Номинальное значение напряжения или тока в накопителе.

5) Эффективность использования конденсаторного или индуктивного накопителя:

а) Эффективность стабилизации напряжения (тока) на стороне постоянного тока преобразователя.

Применяются две схемы создания устройств для компенсации неактивной мощности. Одной из них является использование выше предложенных топологий. При использовании дополнительных алгоритмов управления преобразователями, одна и та же схема может выполнять роль как КРМ, так и АФ. Вторым способом реализации является сочетание в рамках одного устройства одновременно двух схем для компенсации реактивной мощности и фильтрации высших гармоник тока с общей системой управления (Рис. 3). Достоинствами второго способа реализации являются:

- существенное снижение динамических потерь в силовых элементах устройства [13];

- полупроводниковый преобразователь повышенной частоты низкого напряжения применяется для компенсации высших гармоник потребляемого тока сети и выполняет функции активного фильтра;

- оба силовых полупроводниковых преобразователя совместно используют общее звено цепи постоянного тока с накопительными конденсаторами, разделенными через индуктивный реактор гальванической развязки;

- активный фильтр выполнен на силовых транзисторных ключах с малой токовой нагрузкой, которая обусловлена только высшими гармониками тока, и может работать от более низкого напряжения на стороне постоянного тока (при наличии повышающего трансформатора на выходе);

- при использовании собственного экранирования можно улучшить виброакустические характеристики устройства.

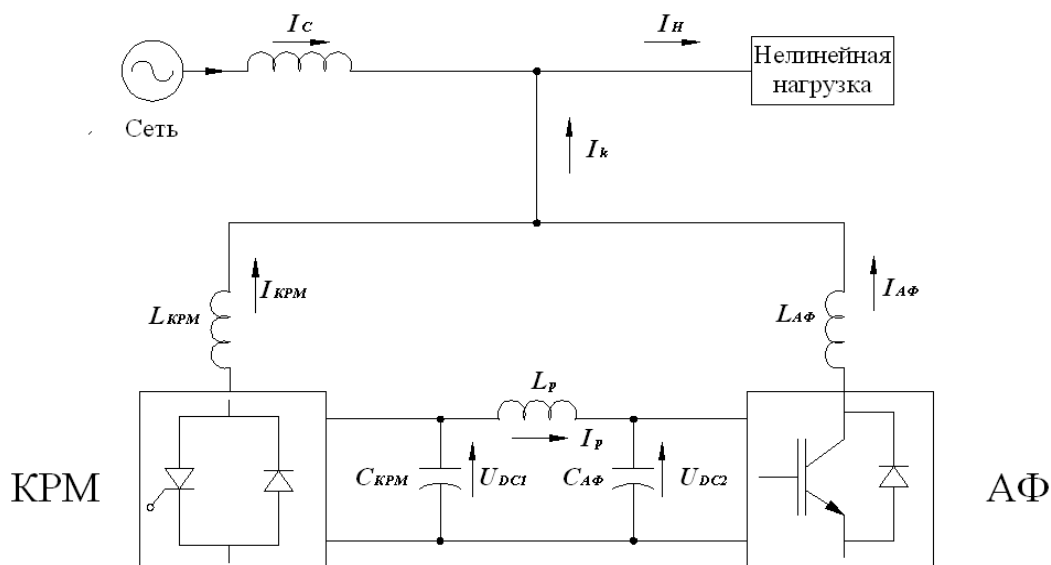


Рис. 2. Схема компенсатора неактивной мощности

Задача КРМ заключается в компенсации реактивной мощности, и рассчитывается на реактивную мощность основной гармоники. Другая силовая часть компенсирует высшие гармоники тока. Для упрощения схемы управления и снижения стоимости в преобразователях КРМ и АФ используется общее звено постоянного тока с индуктивным фильтром развязки накопительных конденсаторов. Оно необходимо для исключения токов образующихся при разнице частот пульсаций на накопительных конденсаторах  $C_{KPM}$  и  $C_{AF}$  (рис.3). Из выше изложенного следует, что предлагаемая топология устройства может обеспечить эффективную компенсацию неактивной мощности при меньших затратах.

На рис.3 изображена блок-схема расчета параметров силовой части активного фильтра.

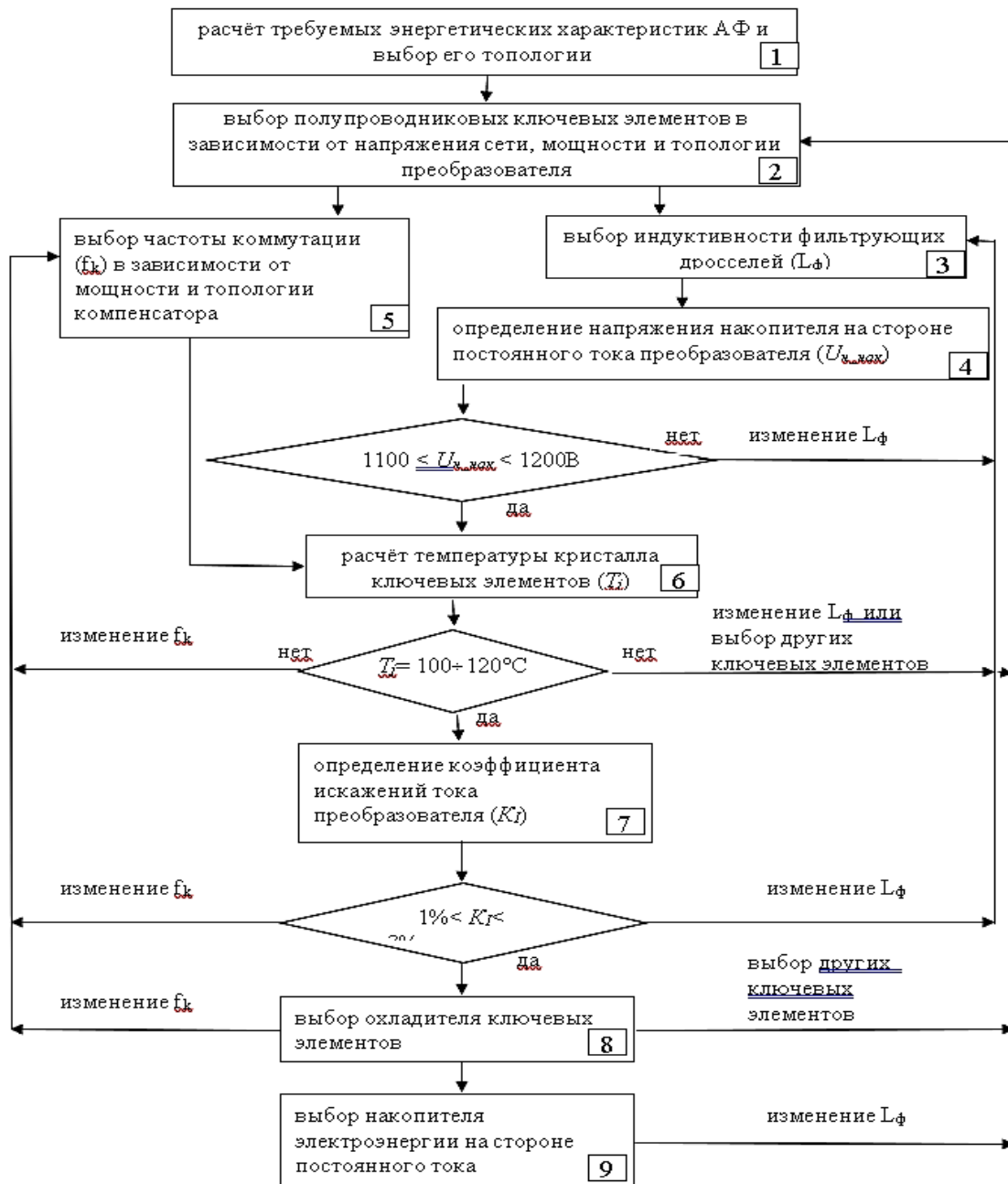


Рис.3. Блок-схема алгоритма определения параметров силовой части АФ

При расчете силовой части КРМ необходимо определить параметры с учетом требований компенсации реактивной мощности.

При расчете силовой части КРМ находятся следующие показатели:

- Номинальное фазное напряжение КРМ
- Номинальная мощность КРМ
- Номинальная генерируемая реактивная мощность
- Номинальная потребляемая реактивная мощность
- Диапазон регулирования реактивной мощности

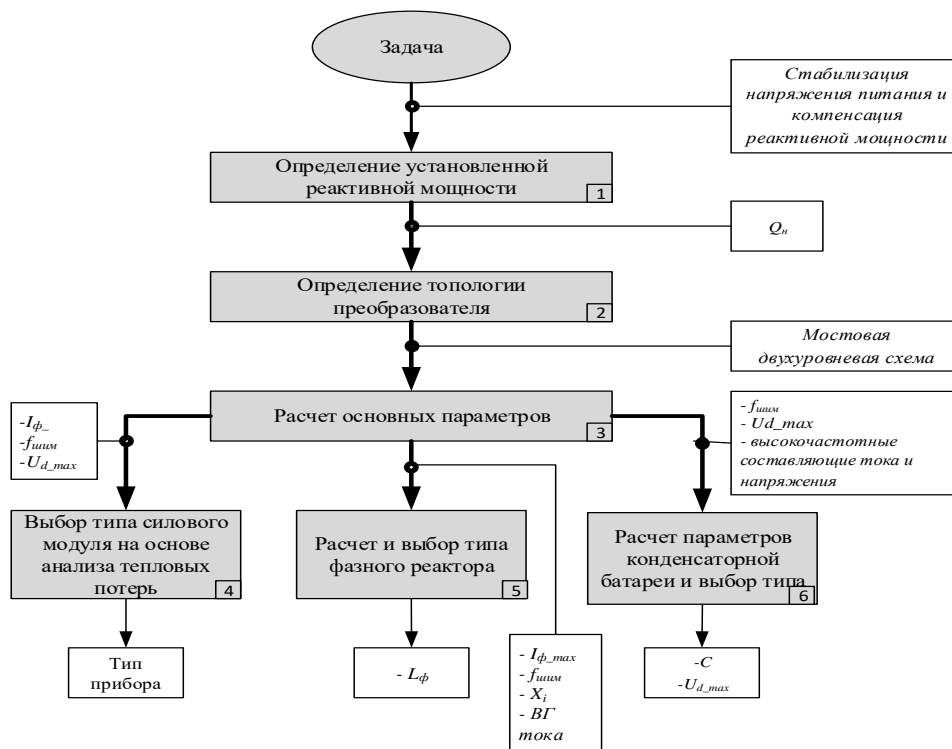


Рис. 4. Блок-схема алгоритма поиска параметров силовой части КРМ

## ВЫВОДЫ

1. Для устройств компенсации большой неактивной мощности (>10МВА) выгоднее всего использовать схему с “Н” топологией. Данная схема имеет меньшее количество силовых элементов по сравнению трехфазной многоуровневой, снимает проблему дисбаланса напряжений на накопительных конденсаторах и позволяет управлять напряжением каждой фазы.

2. Для схем компенсации неактивной мощности в трехфазных сетях с напряжением свыше 1000В и низкочастотным спектром гармоник тока можно успешно применить метод избирательного исключения.

3. Компенсаторы неактивной мощности менее 10МВА можно реализовать на основе трехфазных двухуровневых схем с топологией отдельных схем силовой части- компенсации реактивной мощности основной гармоники и фильтрации высших гармоник тока с общей системой управления и в одном конструктивном исполнении, что дает возможность использования в компенсирующей части силовоточные и низкочастотные ключи, а в фильтрующей высокочастотные со сравнительно небольшими токами. Данная топология позволяет также с небольшими затратами создавать различные модификации компенсаторов со специфичными требованиями к частотному спектру фильтруемых гармоник тока.

4. В компенсаторах небольшой мощности с частотой коммутации ключей свыше 1 кГц часто используется биполярный транзистор с изолированным затвором (IGBT-транзистор). При частоте коммутации менее 500Гц, можно применять КРМ GTO-тиристоры и также MOSFET-транзисторы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Российский морской Регистр судоходства. – Правила классификации и постройки морских судов. НД 2-020101-138: Часть XI, Электрическое оборудование. СПб, 2021.
2. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Москва: Стандартинформ, 2014. 19 с.
3. Ясаков Г.С., Ромадан А., Томилин С.А. Состояние и перспективы развития регулируемого электропривода в корабельных электроэнергетических системах. Межотраслевая научно-практическая конференция. «ВОКОР-2006».

4. Пронин М.В., Воронцов А.Г. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи (моделирование и расчет). – СПб: Электросила, 2003. 172 с.
5. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: АСАДЕМА, 2006, 264 с.
6. Лазарев Г.Б. Мощные высоковольтные преобразователи частоты для регулируемого электропривода в электроэнергетике. Электротехника, №11, 2005.
7. Дмитриев Б.Ф., Лихоманов А.М., Агунов А.В. Синтез управления качеством стабилизации и регулирования параметров электроэнергии. К: Техническая электродинамика, 2000. с. 14-15.
8. Вербова Н.В., Агунов А.В. Силовое активно-фильтро-компенсирующее устройство с системой управления по отклонению. Судостроение, №1, 2020. с. 16-18.
9. Агунов А.В. Статический компенсатор неактивных составляющих мощности с полной компенсацией гармонических составляющих тока нагрузки. Электротехника, №2, 2003. с. 24-27.
10. Дмитриев Б.Ф., Ратников И.В., Лихоманов А.М., Розов А.Ю. Анализ и синтез гармонического состава выходного напряжения регуляторов переменного тока в автономных системах электропитания с импульсной нагрузкой // Морской Вестник, Спец. выпуск №1(9), 2012. с. 78-81.
11. Дмитриев Б.Ф., Галушин С.Я., Калмыков А.Н., Егорова А.Д. Средства повышения качества электрической энергии в СЭЭС. Морской Вестник, №3(75), 2020. с. 77-80.
12. Дмитриев Б.Ф., Галушин С.Я., Калмыков А.Н., Балицкая К.В. Обоснование и выбор инвертора напряжения при реализации однофазных источников бесперебойного питания для средств судовой автоматики, IV Научный форум телекоммуникации: Теория и технологии ТТТ-2020. «Физика и технические приложения волновых процессов ФиТПВП-2020»: Материалы XVIII Международной научно-технической конференции, г. Самара, 2020. – 269-270 с.

## **METHODS AND ALGORITHMS FOR CALCULATION OF INACTIVE POWER COMPENSATION DEVICE OF FREQUENCY CONVERTER FOR MARINE SYSTEMS**

<sup>1</sup>Dmitriev B.F., professor

<sup>2</sup>Galushin S.Y., associate professor

<sup>3</sup>Sogonov S.A., associate professor

<sup>4</sup>Rozov A.J., associate professor

<sup>5</sup>Maximova M.A., associate professor

<sup>1-5</sup>State Marine Technical University, Russia, Sankt-Peterburg,  
e-mail: office@smtu.ru

*The control of the operating modes of the propulsion electric motor is carried out by semiconductor frequency converters, the use of which significantly degrades the quality of electricity on common buses Marine Power System. The reduction of these negative consequences is an urgent task. In this regard, much attention is paid to issues related to the study and development of various methods and devices for ensuring the quality of electricity, increasing the power factor and filtering higher harmonics.*



## **ВЫРАВНИВАНИЕ ГРАФИКА НАГРУЗКИ МОРСКОГО ПОРТА КАК ПОДХОД К СНИЖЕНИЮ ЗАТРАТ НА МОЩНОСТЬ**

<sup>1</sup>Зубавичюс Роман Виргиневич, магистрант

<sup>2</sup>Харитонов Максим Сергеевич, канд. техн. наук, доцент кафедры энергетики

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,  
Калининград, Россия, e-mail: infotech.zub@yandex.ru

*Рассмотрена роль систем накопления энергии в инфраструктуре российских морских портов. Разработан и применен алгоритм выравнивания графика нагрузки за счет использования накопителя электрической энергии. Дана оценка экономической целесообразности выравнивания графика нагрузки для снижения затрат на мощность на примере Калининградского морского торгового порта.*

Современный морской порт является крупным инфраструктурным узлом мировой экономики, который оказывает существенное влияние на окружающую и социальную среду в районе расположения. Мировые экологические тренды и инновационный сценарий Стратегии развития морской портовой инфраструктуры России до 2030 года [1] определяют неизбежность и необходимость перехода российских портов к применению энергоэффективных и экологически безопасных технологий, которые в том числе могут базироваться на использовании возобновляемой энергетики и систем накопления энергии.

В то время как возобновляемые источники энергии в составе электроэнергетической системы морских портов несут очевидные экологические преимущества [2], они также характеризуются рядом проблем, связанных с непостоянством генерации [3-5]. Современное решение вопроса интеграции возобновляемых источников энергии в энергосистему порта возможно путем применения систем хранения энергии [6-8]. Что потенциально делает накопители первым значимым этапом при реализации в пределах отечественных морских портов интеллектуальной системы электроснабжения, отвечающей экологическим вызовам современности.

Снижение затрат на электроэнергию за счет накопителей может являться одним из возможных путей стимулирования морских портов к реализации описанного энергоперехода. Анализ результатов исследований в области применения накопителей для снижения стоимости электроэнергии указывает на активную проработку темы российским научным сообществом. В частности, в работе [9] представлен алгоритм управления накопителем, позволяющий минимизировать стоимость мощности для предприятий, относящихся к III и IV ценовым категориям потребителей электроэнергии. А в статье [10] проведена оценка целесообразности применения накопителей энергии для выравнивания графика нагрузки электроэнергетической системы.

Распространенным способом применения систем накопления энергии является выравнивание графиков нагрузки предприятия. Например, как показано в работе [11], с целью снижения потерь при передаче электроэнергии. Либо для реализации алгоритмов оптимального управления нагрузкой потребителей, как описано в [12]. И в то же время для снижения затрат на электроэнергию путем применения гибридного накопителя энергии, что представлено в работе [13]

В аспекте вышеизложенного актуальным является анализ вопроса об экономической целесообразности применения выравнивания графика электрических нагрузок за счет применения накопителя энергии как подхода к снижению затрат морского порта на электроэнергию.

### **Особенности тарифных условий морского порта**

В соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 27.12.2010 № 1172 [14] территория Калининградской области включена в перечень территорий, принадлежащих неценовой зоне оптового рынка электрической энергии и мощности. Это означает, что в границах

территории региона электроэнергия и мощность продается гарантирующим поставщиками по конечным регулируемым ценам. Конечные регулируемые цены определены и применимы в соответствии с разделами VII и XII положения функционирования розничных рынков электрической энергии [15]. Конечные регулируемые цены на электрическую энергию и мощность, а также составляющие расчета стоимости для VI ценовой категории публикуются в разделе «Тарифы для организаций» на веб-сайте «Россети Янтарь Энергосбыт» [16].

Калининградский морской торговый порт оплачивает электроэнергию и мощность по тарифным условиям VI ценовой категории на уровне высокого напряжения при установленной мощности предприятия в пределах от 670 кВт до 10 МВт. Принадлежность к VI ценовой категории предполагает, что потребитель обязан вести почасовое планирование электропотребления на следующие сутки, а также вести почасовой учет своего потребления. При этом отклонения от планируемых значений также подлежат оплате по ставке.

Таким образом, результирующая ежемесячная стоимость потребляемой электроэнергии и мощности для потребителя VI ценовой категории включает в себя оплату фактического объема потребления электроэнергии и отклонений от планового почасового объема, оплату объема сетевой мощности, определяемой как среднее за месяц из пиковых значений потребления мощности предприятием, а также оплату объема генерирующей мощности, определяемой как среднее за месяц из значений потребления мощности в часы пиковой нагрузки региона.

Необходимо отметить, что в течение месяца значения, составляющие среднее сетевой и генерирующей мощностей, фиксируются только в часы, принадлежащие плановым часам пиковой нагрузки региона, и могут не совпадать с действительными максимумами графика нагрузок предприятия и пиками нагрузки региона. Плановые часы пиковой нагрузки на каждый календарный год утверждаются Правлением АО «СО ЕЭС» для территорий, находящихся как в ценовых, так и в неценовых зонах оптового рынка электрической энергии и мощности. Плановые часы пиковой нагрузки устанавливаются как интервалы времени на каждый месяц года и публикуются в конце декабря каждого года.

### Анализ графика нагрузки морского торгового порта

Характер электропотребления Калининградского морского торгового порта показан на тепловой диаграмме (рис. 1), отображающей совокупность суточных графиков электрической нагрузки в течение года. Высокие значения потребляемой мощности могут наблюдаться в любой сезон, однако наибольшие нагрузки наблюдаются в зимний период. Наибольшие по величине максимумы нагрузки наблюдаются в декабре. Для того чтобы сделать более подробные выводы, можно обратиться к сезонным профилям.

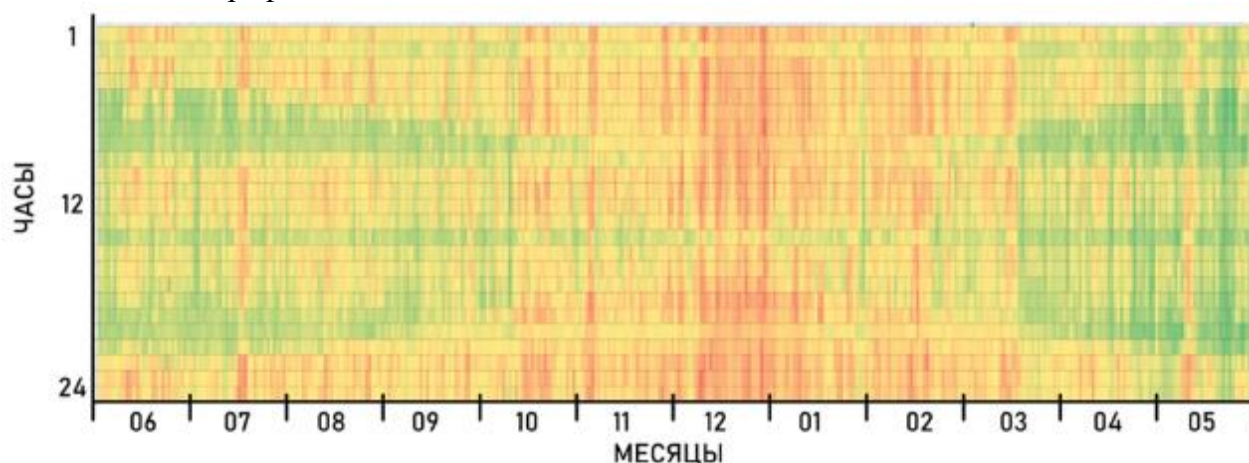


Рис. 1. Годовой график электропотребления порта в виде тепловой диаграммы

Анализ сезонных профилей нагрузок (рис. 2) показывает, что зимний график в большей степени отличается по форме от среднегодового. Наблюдается характерный для всех сезонов суточный локальный минимум в 14-м часу и в 2 часа ночи. Локальные максимумы осенью, летом и весной сосредоточены в промежутках времени 9:00–11:00 и 21:00–23:00, то есть утром и вечером.

Во многом совпадает характер изменений весеннего и летнего графиков, а также достижение потреблением своего наименьшего значения в течение дня в 7-м и 8-м часах.

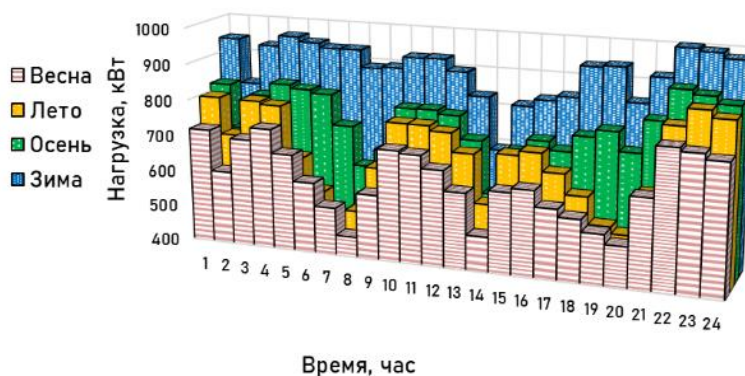


Рис. 2. Диаграмма электропотребления порта по сезонам

### Методология программной оптимизации

Для оценки возможного экономического эффекта от внедрения системы накопления энергии разработана и реализована в виде программы методика осуществления выравнивания суточных графиков нагрузки [17].

При разработке алгоритма оптимизации были приняты следующие допущения:

- программа рассматривает режим работы системы накопления энергии в рамках каждого дня обособленно: не учитываются реальные физические процессы перераспределения энергии из одних суток в следующие, возможное снижение емкости накопителя с течением времени;

- условно на рассматриваемый период система накопления электроэнергии и система электроснабжения порта принимаются абсолютно надежными, вероятность отказа систем является нулевой;

- не учитываются категории надежности электроснабжения объектов инфраструктуры рассматриваемого предприятия, возможные аварийные режимы, плановые и текущие ремонты оборудования и, в целом, конфигурация системы электроснабжения порта.

Имитация работы накопителя производится программой, в основе которой лежит алгоритм поиска значения мощности, оптимальной для работы накопителя, относительно которой производится выравнивание графика нагрузки.

Программная реализация методики осуществлена на языке программирования Python 3.10 в свободной кроссплатформенной интерактивной интегрированной среде разработки для научных расчетов Spyder на базе дистрибутива Anaconda.

Работа алгоритма выравнивания основана на предположении, что существует такое значение мощности  $P_{\text{опт}}$  на графике нагрузки, относительно которого эквивалентны объемы энергии: сумма разностей данного значения  $P_{\text{опт}}$  и текущего потребления в часы, когда потребление меньше заданного; сумма разностей текущего потребления в часы, когда потребление больше заданного, и значения  $P_{\text{опт}}$ . Другими словами, относительно  $P_{\text{опт}}$  достигается равенство накапливаемого и отдаваемого накопителем объемов энергии.

Учитывая, что поиск  $P_{\text{опт}}$  производится, как будет описано далее, итерациями, необходимо оценивать указанные объемы энергии по выражениям (2, 3) относительно любого заданного значения мощности  $P$ , удовлетворяющего неравенству:

$$P_{\text{мин}} \leq P \leq P_{\text{макс}} \quad (1)$$

где  $P_{\text{мин}}$  – минимальное значение (база) суточного графика нагрузки, кВт;

$P_{\text{макс}}$  – максимальное значение (пик) суточного графика нагрузки, кВт.

Суммарный объем энергии за часы, соответствующие величине потребления меньше заданного значения мощности  $P$ , определяется по выражению:

$$W_M(P) = \sum_i (P - P_i) \cdot t_i \quad (2)$$

где  $P_i$  – значение нагрузки, не превышающее величины  $P$ , кВт;  
 $t_i$  – интервал графика нагрузки, соответствующий мощности  $P_i$ , час.

Суммарный объем энергии за часы, соответствующие величине потребления больше заданного значения мощности  $P$ , определяется по выражению:

$$W_6(P) = \sum_j (P_j - P) \cdot t_j \quad (3)$$

где  $P_j$  – значение нагрузки, не превышающее величины  $P$ , кВт;  
 $t_j$  – интервал графика нагрузки, соответствующий мощности  $P_j$ , час.

Схема алгоритма (рис. 3) отражает последовательность поиска значения  $P_{\text{опт}}$  в пределах суточного графика электрических нагрузок.

Для покрытия возможных потерь части энергии в цикле заряда-разряда накопителя электроэнергии введен коэффициент  $K$ , значение которого задается перед расчетом. Значение  $K$ , равное единице, означает отсутствие каких-либо потерь при работе накопителя, а  $K = 1,2$  означает наличие потерь в виде 20% перераспределяемой энергии.

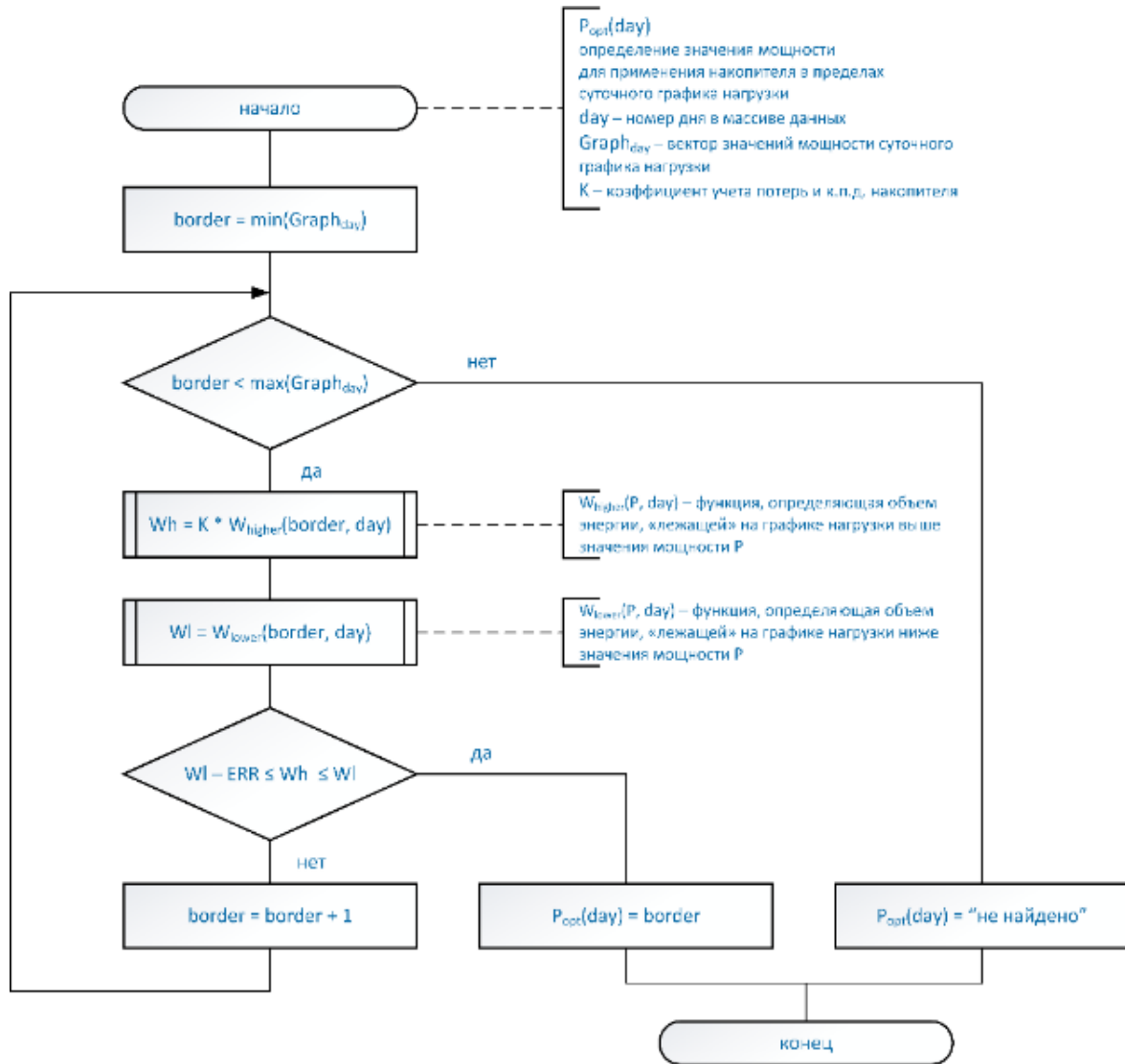


Рис. 3. Схема алгоритма поиска значения мощности, оптимальной для выравнивания графика нагрузки

Параметры, составляющие тело алгоритма определения значения  $P_{opt}$ , показаны на графике (рис. 4).

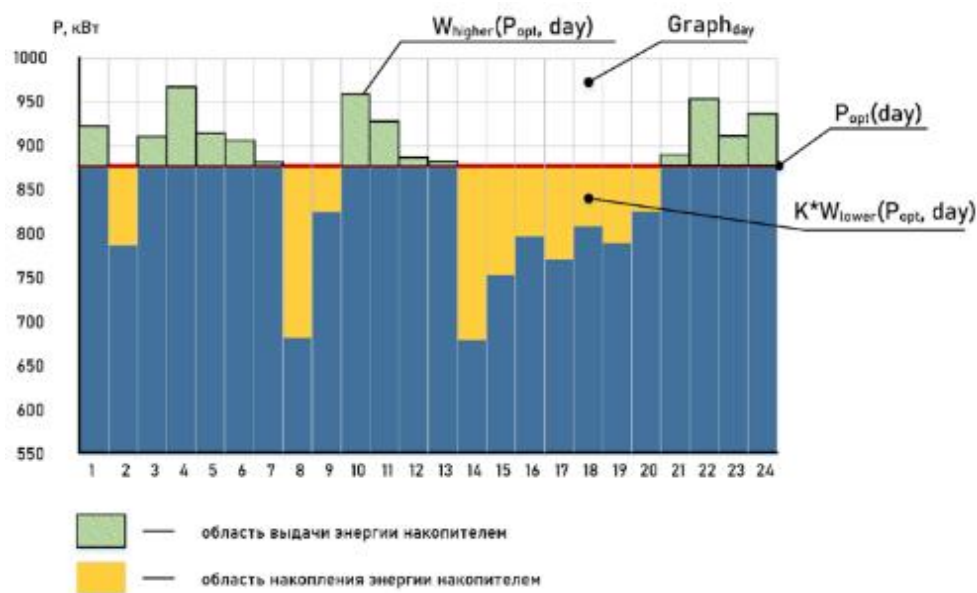


Рис. 4. Отображение параметров программы на графике нагрузки

### Результаты работы программы

С использованием разработанной программы было проведено выравнивание годового графика нагрузки Калининградского морского торгового порта. Значение коэффициента  $K$  было принято равным 1,3. Допустимое приближение ERR принято равным 40 кВт. При этом разница между суммарными объемами энергии в области накопления и в области выдачи является незначительной.

Для каждого дня года рассчитана величина  $P_{opt}$ . На графике (рис. 5) показано распределение величины в течение года.

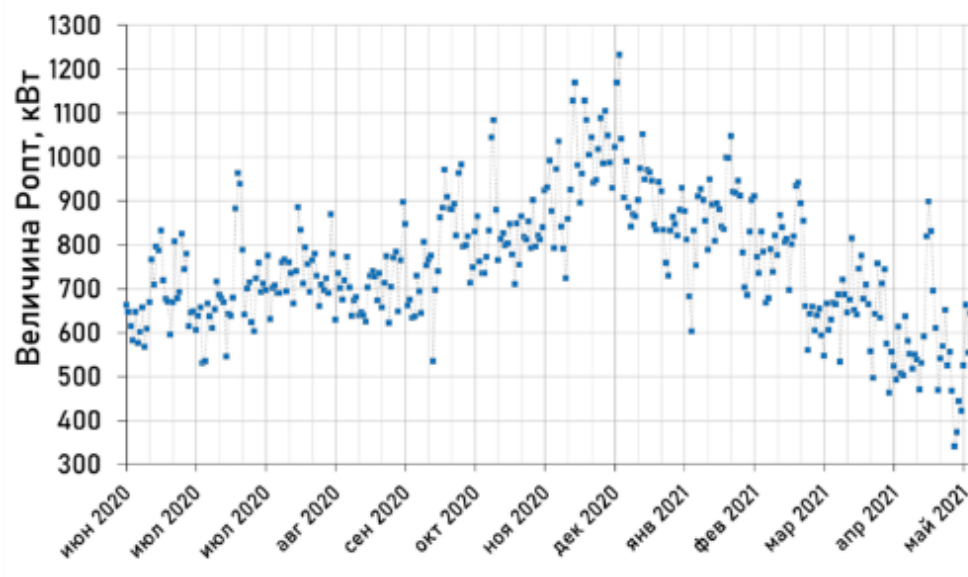


Рис. 5. Расчетные значение оптимальной мощности

Сформирована диаграмма (рис. 6) среднемесячных значений объемов энергии  $W_{lower}$  и  $W_{higher}$ , рассчитанных относительно величин  $P_{opt}$ . Стоит отметить, что наименьшие объемы энергии, перераспределяемой накопителем, приходится на холодные месяцы – с ноября по март. Это обусловлено повышенной нагрузкой и, соответственно, большими относительно прочих значениями  $P_{opt}$ .





Рис. 6. Среднемесячные суммарные объемы энергии

Были получены значения максимальных суточных значений нагрузки накопителя при накоплении и выдаче энергии в сеть (рис. 7).



Рис. 7. Максимумы суточной мощности накопителя

На тепловых диаграммах (рис. 8) представлены исходный годовой график нагрузок и годовой график нагрузок со стороны энергосистемы после применения программы для его выравнивания.

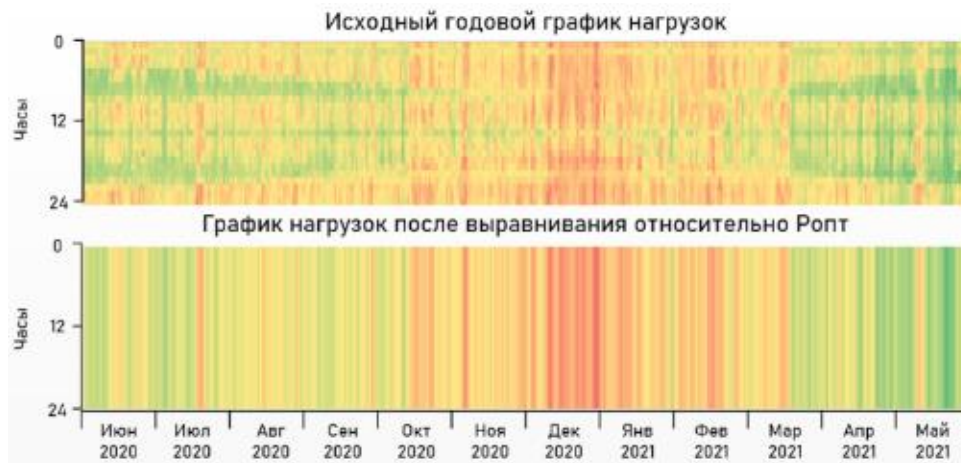


Рис. 8. Тепловые карты годового графика нагрузок

## Результаты расчетов экономического эффекта

Полученная в ходе расчетов совокупность выравненных программой суточных графиков нагрузки была использована для определения значений затрат морского порта на сетевую и генерирующую мощности с использованием данных о составляющих расчета стоимости мощности для потребителей VI ценовой категории. Выравнивание годового графика нагрузки приводит к тому, что для каждого дня, в которые фиксируется значения мощности в пиковые часы значения, составляющие среднее генерирующей и сетевой мощности, совпадают с величиной  $P_{\text{опт}}$ :

$$P_{\text{ген}j} = P_{\text{сет}j} = P_{\text{опт}j} \quad (4)$$

где  $j$  – номер дня месяца, когда снимаются данные о мощности.

Таким образом ежемесячные величины генерирующей и сетевой мощностей вычисляются следующим образом:

$$P_{\text{ген}} = P_{\text{сет}} = \frac{\sum_j P_{\text{опт}j}}{n} \quad (5)$$

где  $n$  – число дней месяца, в которые снимаются значения мощности.

Результаты расчетов стоимости мощности представлены в виде диаграмм (рис. 9). Анализ полученных результатов показывает, что программное выравнивание годового графика нагрузки Калининградского морского торгового порта приносит положительный эффект в виде снижения величины платы за мощность.

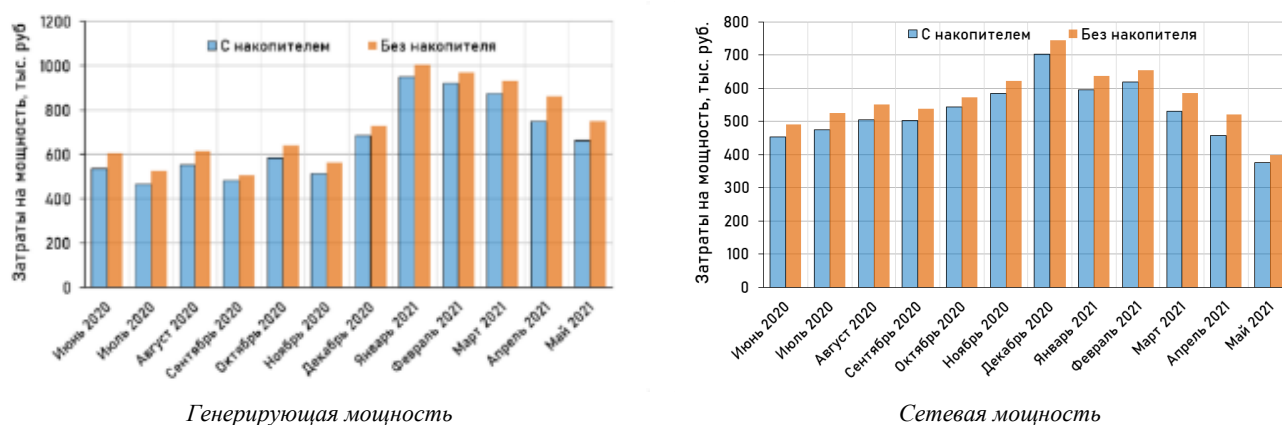


Рис. 9. Итоговые затраты порта на мощность

В соответствии с заданными при расчете условиями, выравнивание графика нагрузки за счет применения накопителя имеет годовой потенциал экономии в размере 1,3 млн. рублей при сохранении объемов электропотребления предприятия.

Для оценки значимости данной величины годовой экономии проведен ориентировочный расчет срока окупаемости аккумуляторных батарей накопителя, обеспечивающего полное выравнивание годового графика нагрузок. Для проведения предварительного расчета выбран наибольший по емкости аккумулятор производства российской компании «Лиотех» – литий-ионный LT-LFP-300 типа LiFePO<sub>4</sub>, имеющий ёмкость одного блока 300 Ач при напряжении 3,2 В.

Количество энергии, запасаемое в одном аккумуляторном блоке, составляет:

$$W_1 = \frac{U_{\text{ном}} \cdot Q}{1000} = \frac{3,2 \cdot 300}{1000} = 0,96 \text{ [кВтч]} \quad (6)$$

где  $U_{\text{ном}}$  – номинальное напряжение, В;

$Q$  – электрический заряд, Ач.

По расчетным данным необходимая емкость накопителя для осуществления выравнивания графика нагрузки составляет  $W_{\text{расч}} = 1600$  кВтч. При этом количество  $N$  необходимых аккумуляторов типа LT-LFP 300 составляет:

$$N = \frac{W_{\text{расч}}}{W_1} = \frac{1600}{0,96} = 1667 \text{ [ед]} \quad (7)$$

Расчитан срок окупаемости системы накопления энергии с учетом ежегодной экономии денежных средств за счет её использования по формуле:

$$T = \frac{N \cdot C_1}{E} = \frac{1667 \cdot 30,000}{1339,237} \approx 37,3 \text{ [лет]} \quad (8)$$

где  $E$  – ежегодная экономия, тыс. руб.;

$C_1$  – стоимость одного аккумулятора, тыс. руб.

Таким образом, срок окупаемости аккумуляторов накопителя, осуществляющего выравнивание графика нагрузки, составляет около 37 лет, что более чем в два раза превышает максимальный ресурс литий-ионных аккумуляторов. При этом в качестве первоначальных инвестиций не учтена стоимость сетевой инфраструктуры, вспомогательного оборудования, системы управления, капитальные затраты на сооружения комплекса и прочие статьи расходов, которые значительно увеличили бы величину срока окупаемости.

### Заключение

Системы накопления энергии потенциально являются важным звеном в развитии современной экологически безопасной и энергоэффективной инфраструктуры российских морских портов. В связи с этим, вопрос стимулирования субъектов морской отрасли к осуществлению энергоперехода, связанного с внедрением возобновляемой энергетики и, как следствие, накопителей энергии, на сегодняшний день является значимым.

Применение накопителя для выравнивания суточных графиков нагрузки, согласно проведенным в работе расчетам, показывает возможное снижение затрат морского порта как потребителя, оплачивающего электроэнергию по тарифным условиям VI ценовой категории, на мощность. Однако, экономическая нецелесообразность данного подхода выявляет необходимость поиска иных путей решения, описанного выше вопроса.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распоряжение Правительства РФ «О Стратегии развития морской деятельности в РФ до 2030 года»
2. 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.
3. Ивановский Д. А. Интеграция объектов микрогенерации на базе ВИЭ. Проблемы и перспективы //Электроэнергетика глазами молодежи-2019. – 2019. – С. 119-122.
4. Меден Н. К. Интеграция возобновляемой энергетики. Опыт Германии //Энергия: экономика, техника, экология. – 2014. – №. 4. – С. 2-8.
5. Суяков С. А. , Проблемы интеграции ветроустановок в единую энергетическую систему России // Инженерный вестник Дона. – 2014. – Т. 30. – №. 2. – С. 89.
6. Зализная Е. А., Зализный С. А., Цакоев Д. А. Роль систем накопления электроэнергии для повышения эффективной интеграции возобновляемой энергетики //Вестник науки. – 2022. – Т. 1. – №. 5 (50). – С. 167-171.
7. Сокольникова Татьяна Васильевна, Суслов Константин Витальевич, Ломбарди Пио Определение оптимальных параметров накопителя для интеграции возобновляемых источников энергии в изолированных энергосистемах с активными потребителями // Вестник ИрГТУ. 2015. №10 (105). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-optimalnyh-parametrov-nakopitelya-dlya-integratsii-vozobnovlyаемых-istochnikov-energii-v-izolirovannyh-energосистемах-s> (дата обращения: 11.06.2022).
8. Четошников С. А. Интеграция возобновляемых источников энергии в локальные электрические сети //Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. – Екатеринбург, 2015. – 2015. – С. 478-481.



9. Орлов А. И. и др. Снижение стоимости электроэнергии для потребителей за счет использования накопителей энергии //Вестник Чувашского университета. – 2020. – №. 1. – С. 123-135.
10. Чернецкий А. М. Оценка экономической эффективности использования накопителей электроэнергии в энергосистеме //Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2013. – №. 4. – С. 21-28.
11. Шклярский Я. Э., Пирог С. Влияние графика нагрузки на потери в электрической сети предприятия //Записки Горного института. – 2016. – Т. 222. – С. 858-863.
12. Рахмонов И. У., Реймов К. М. Математические модели и алгоритмы оптимального управления нагрузкой электропотребителей //Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2019. – Т. 62. – №. 6. – С. 528-535.
13. Васильков О. С. и др. Выравнивание графика нагрузки предприятий за счет применения гибридных накопителей электроэнергии //Известия Московского государственного технического университета МАМИ. – 2020. – №. 1. – С. 27-34.
14. Постановление Правительства РФ от 27.12.2010 N 1172 (ред. от 10.03.2022) «Об утверждении Правил оптового рынка электрической энергии и мощности и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам организации функционирования оптового рынка электрической энергии и мощности»
15. Постановление Правительства РФ от 04.05.2012 №442 «О функционировании розничных рынков электрической энергии, полном и (или) частичном ограничении режима потребления электрической энергии»
16. Архив тарифов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://yantarenergosbyt.ru/organizatsiyam/tarify/arkhif-tarifov> (дата обращения: 09.05.2022).
17. Зубавичюс Р.В., Харитонов М.С. Программа для преобразования суточного графика нагрузки в условиях полного выравнивания за счет накопителя электроэнергии. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2022663179, 12 июля 2022 г.

## **LEVELING THE LOAD SCHEDULE OF A SEAPORT AS AN APPROACH TO REDUCE CAPACITY COSTS**

<sup>1</sup>Zubavichius Roman Virginevich, master student of the Department of Energy

<sup>2</sup>Kharitonov Maxim Sergeyevich, Dr.-Ing., Associate Professor of the Department of Energy

<sup>1,2</sup>Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia, e-mail: infotech.zub@yandex.ru

*The article considers the role of energy storage systems in the infrastructure of Russian seaports. An algorithm for leveling the load curve through the use of an electrical energy storage system has been developed and applied. An assessment of the economic feasibility of leveling the load schedule to reduce capacity costs is given on the example of the Kaliningrad Commercial Sea Port.*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ФЕРРОРЕЗОНАНСНОГО КОНТУРА В НИЗКОВОЛЬТНОЙ СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОСЕТИ С КОМПЕНСИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

Кажекин Илья Евгеньевич, канд. техн. наук, доцент кафедры энергетики

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

*Выполнен обзор способов моделирования феррорезонансного контура, образующегося в низковольтных судовых электросетях при заземлении их нейтральной точки через реактор. Цель работы – систематизировать информацию о методах исследования феррорезонансного контура для дальнейшей оценки возможности возникновения в нем резонансных режимов. Показано, что аналитические и графоаналитические методы значительно уступают по точности численным методам расчета. Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального агентства по рыболовству (контракт № 122030900054-0).*

### Формирование феррорезонансного контура

Одним из наиболее опасных видов аварийных ситуаций, происходящих на судах являются пожары. По тяжести последствий судовые пожары значительно превосходят пожары, происходящие на объектах береговой инфраструктуры. Поэтому важно учитывать все факторы, способные оказать влияние на их возникновение. К факторам, которые следует учитывать в первую очередь, относится пожароопасность бортовых электросетей. Согласно статистическим данным судовое электрооборудование – один из основных источников возгораний на объектах морской техники. Используемый повсеместно на судах режим изолированной нейтрали в наибольшей степени по сравнению с другими способами заземления нейтрали способствует дальнейшему развитию аварийной ситуации. Это обусловлено тремя причинами:

- однофазные замыкания в таких электросетях не отключаются защитой и могут существовать длительное время;
- токи в месте замыкания могут достигать пожароопасных величин, что характерно для разветвленных бортовых электросетей с большой емкостью относительно корпуса судна;
- перенапряжения, в случае неустойчивого характера замыкания, способствуют пробоем изоляции здоровых фаз, приводя к междуфазному замыканию через корпус.

Токи в месте замыкания и перенапряжения могут быть ограничены за счет перевода электросистемы в режим заземления ее нейтрали через реактор. Схема включения реактора продемонстрирована на рис.1., где использованы следующие обозначения:  $C_p$  – нейтралеобразующие емкости;  $L$ ,  $R$  – параметры реактора;  $C_\phi$  – фазная емкость электросети;  $Q$  – контакт, фазы с корпусом судна.

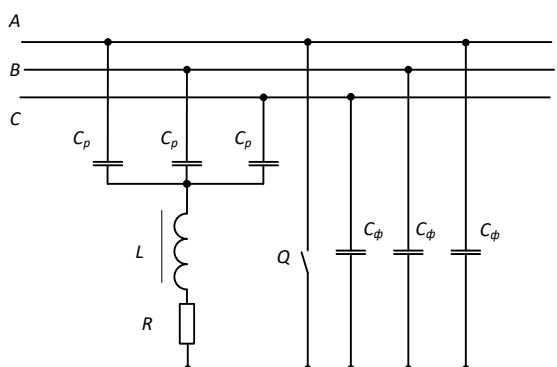


Рис. 1. Схема подключения реактора к нейтрали электросети в низковольтных судовых электросетях

Заземление нейтрали через реактор широко используется в электросетях средних классов напряжения. Российскими нормативными документами допускается подобное изменение режима нейтрали и для низковольтных судовых электросетей. Однако в таких электросетях необходимо осуществлять непрерывный контроль изоляции путем непосредственного измерения ее активного сопротивления. Заземление нейтрали непосредственно через реактор не позволяет это осуществить, поскольку изоляция шунтируется его низким сопротивлением постоянному току. Эта несовместимость защитных средств решается путем гальванической развязки за счет включения емкостного элемента последовательно реактору [1]. Такое подключение емкости способно привести к формированию феррорезонансного контура. Его схема представлена на рис. 2.

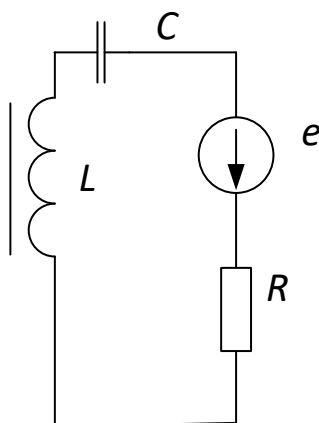


Рис. 2. Схема подключения реактора к нейтрали электросети в низковольтных судовых электросетях

Целью работы является систематизация информации о методах исследования феррорезонансного контура для дальнейшей оценки возможности возникновения в нем опасных резонансных режимов.

Условия, необходимые для возникновения феррорезонанса в этом контуре могут быть сформулированы следующим образом [2, 3].

1. Индуктивное сопротивление реактора на линейной части его характеристики должно быть больше ёмкостного сопротивления, а индуктивное сопротивление на нелинейной части характеристики должно быть меньше емкостного сопротивления.

2. Энергия, поступающая от источника в контур, должна превосходить потери на его активном сопротивлении.

3. Начальные условия переходных процессов при образовании контура должны быть достаточными для перехода системы в феррорезонансное состояние.

Первое условие не может не выполняться, поскольку для успешной компенсации тока однофазного замыкания суммарное сопротивление заземляющей нейтраль ветви должно быть индуктивным. При этом изготовление реакторов с линейной характеристикой может оказаться экономически нецелесообразным.

Второе условие также должно выполняться, поскольку при однофазных замыканиях в контур вводится источник напряжения в виде фазной ЭДС, а активное сопротивление контура достаточно малое. Его увеличение приведет к появлению значительной активной составляющей в месте замыкания. Исходя из вышесказанного, важно рассмотреть такое описание процессов в контуре, которое могло бы быть использовано для воздействия на него по третьему из перечисленных условий.

### Использование графоаналитического метода анализа феррорезонансных процессов

Графоаналитический метод позволяет на основе вольт-амперных характеристик, построенных для действующих или амплитудных значений, оценить величины тока и напряжения для всех точек равновесия системы. В [4] отмечается возможность получения достаточно точных результатов, до 10-20%, для инженерных расчетов на основе этого метода. Для определения точек равновесия системы, в схеме, представленной на рис. 2 выделяется активный двухполюсник, содержащий

источник ЭДС и активное сопротивление контура. Внешняя характеристика этого двухполюсника описывается следующим выражением:

$$U_{\text{ист}}(I) = \sqrt{E^2 - (IR)^2}, \quad (1)$$

Остальные элементы контура образуют индуктивно-емкостную нагрузку двухполюсника. Их эквивалентная вольт-амперная характеристика может быть описана следующим образом:

$$U_{LC}(I) = \left| AI + BI^3 - \frac{I}{\omega C} \right|, \quad (2)$$

где  $A, B$  – коэффициенты аппроксимации вольт-амперной характеристики реактора;  $\omega$  – угловая частота электросети.

Вольт-амперные характеристики образующегося контура, в котором возможен феррорезонанс, построены на рис. 3.

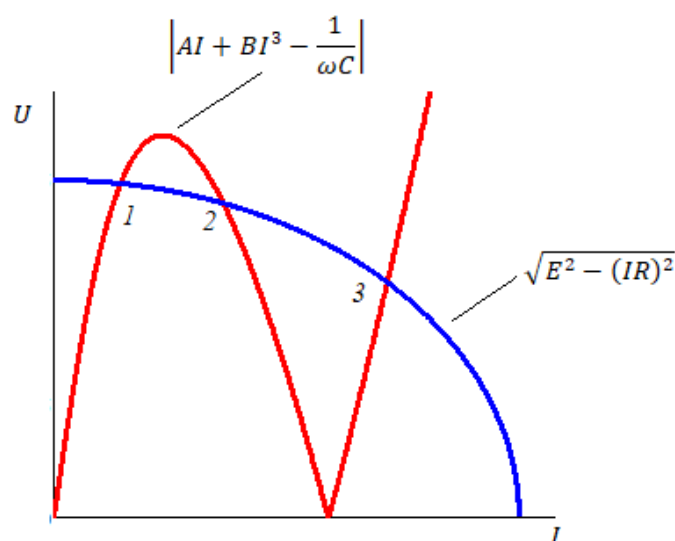


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики феррорезонансного контура

На рис. 3 видно, что система имеет три точки равновесия, т.е. точки в которых совпадают значения токов и напряжений активного двухполюсника и индуктивно-емкостной нагрузки. Точка 1 является точкой нормальной работы реактора, при которой обеспечивается значение его тока, необходимое для компенсации тока однофазного замыкания. Точка 3 – точка, соответствующая феррорезонансному режиму. В этой точке ток реактора и напряжения на элементах контура значительно увеличиваются, синусоидальность тока искажается. Компенсация тока замыкания в таком режиме невозможна. Точка 2 является точкой неустойчивого равновесия. Система в этой точке не может работать. Однако именно эту точку следует рассматривать как границу между нормальным и феррорезонансным режимом. При превышении током реактора и напряжением на емкости во время переходного процесса значений, соответствующих этой точке, система переходит в состояние феррорезонанса.

### Описание феррорезонансного контура на основе уравнения Дуффинга

Описание переходных процессов при замыкании такой цепи осуществляется на основе следующего выражения:

$$\frac{d\psi}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int idt = E_m \sin(\omega t + \varphi), \quad (3)$$

Для представления нелинейной характеристики реактора можно использовать полином третьей степени

$$i = a\psi + b\psi^3, \quad (4)$$

Такое описание нелинейной характеристики реактора не является самым точным. В частности в [5] показано, что большую сходимость с экспериментальными данными имеют выражения на основе арктангенса, а также полиномы более высокого порядка. Однако, именно выражение (4) позволяет привести описание переходных процессов к хорошо исследованному уравнению Дуффинга.

$$\ddot{x} + 2\delta\dot{x} + x + \lambda x^3 = k \cos(\alpha\tau + \varphi) \tag{5}$$

где  $2\delta = \frac{Ra}{\omega_0}$ ,  $\lambda = \frac{b}{a} \left[ \frac{\omega E_{m0}}{\omega_0^2} \right]^2$ ,  $k = \frac{E_m}{E_{m0}}$ ,  $\alpha = \omega \sqrt{\frac{c}{a}}$ ,  $\tau = \omega_0 t$ ,  $E_{m0}$  – опорная амплитуда.

Решение уравнения для основной гармоники позволяет перейти к следующему уравнению:

$$\left[ (1 - \alpha^2)X_m + \frac{3}{4}\lambda X_m^3 \right]^2 + [2\delta\alpha X_m]^2 = k^2, \tag{6}$$

где  $X_m$  – амплитуда переменной  $x$ .

Решение этого уравнения позволяет определить амплитуды величины  $x$ , а следовательно перейти к построению фазового портрета контура. Увеличение точности вычислений за счет учета появления высших гармоник существенно осложнит решение уравнения Дуффинга.

### Анализ процессов в феррорезонансном контуре численными методами

Дифференциальное уравнение (3) может быть решена при помощи различных численных методов решения нелинейных дифференциальных уравнений. При этом с точки зрения вычислений исчезают трудности, связанные с использованием более точных описаний характеристики реактора. Примером удобного использования таких методов является программная среда Simintech. Пример модели, составленной в ней, показан на рис. 4.

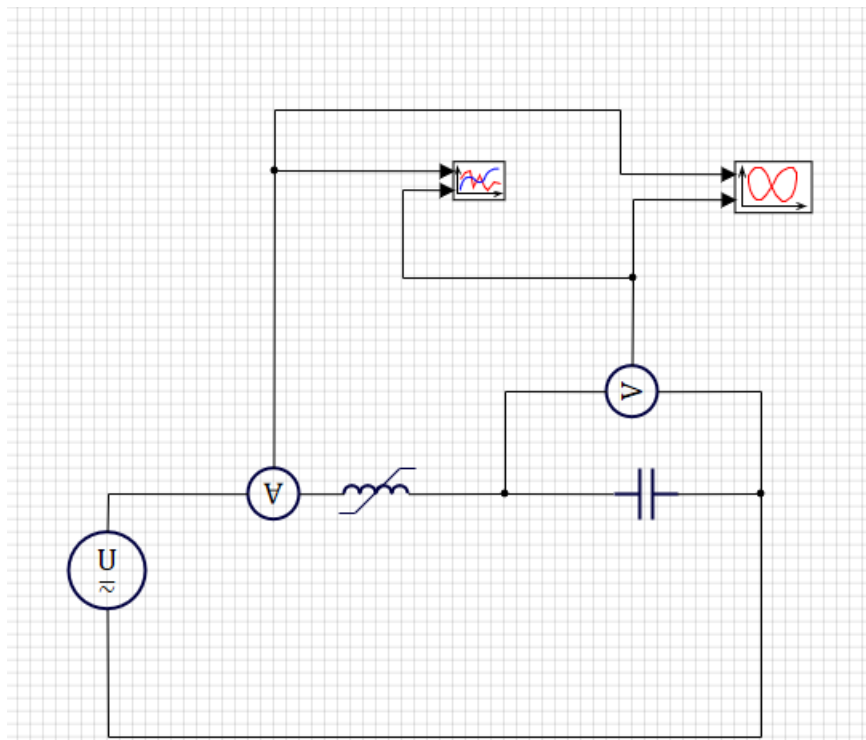


Рис. 4. Имитационная модель феррорезонансного контура

Численное решение позволяет оценить влияние на переходные процессы при формировании контура таких факторов, как момент замыкания, напряжение на емкости, ток через реактор. Результатом расчетов являются осциллограммы, построенные с заданным шагом, фазовые кривые.

Пример таких расчетов показан на рис. 5.

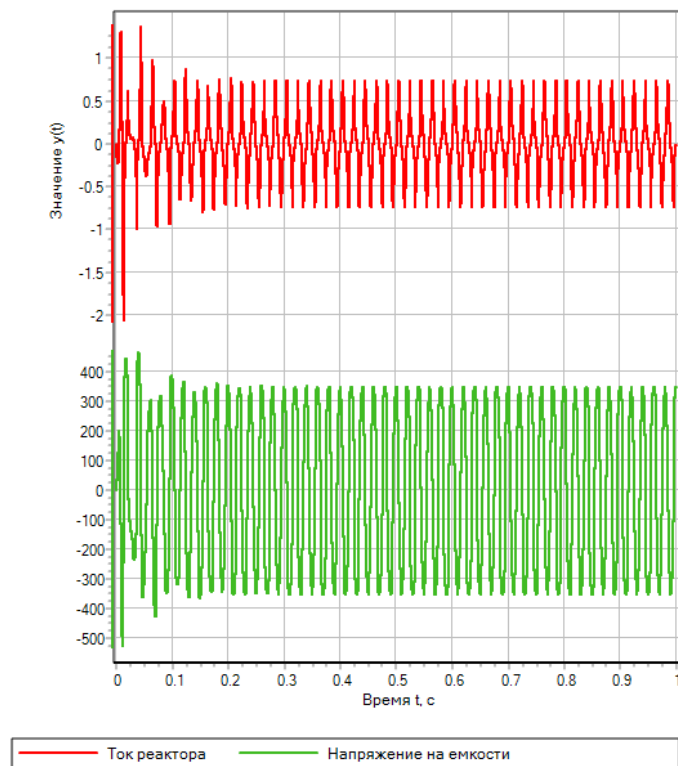


Рис. 5. Результат расчета переходного процесса численным методом

Численный расчет переходных процессов позволяет получить достаточно точные результаты. Однако его использование для определения границ зон устойчивости затруднительно.

### Экспериментальное исследование переходных процессов в феррорезонансном контуре

Для оценки достоверности предложенных описаний проведено сопоставление результатов их использования с экспериментальными данными. Для этого использована физическая модель феррорезонансного контура согласно схеме, приведенной на рис. 2. В ходе эксперимента осциллографировались значения тока контура и напряжения на емкостном элементе. Перед замыканием, емкость заряжалась до некоторых значений напряжения, а напряжение источника оставалось неизменным. Примеры зарегистрированных осциллограмм тока приведены на рис. 6.

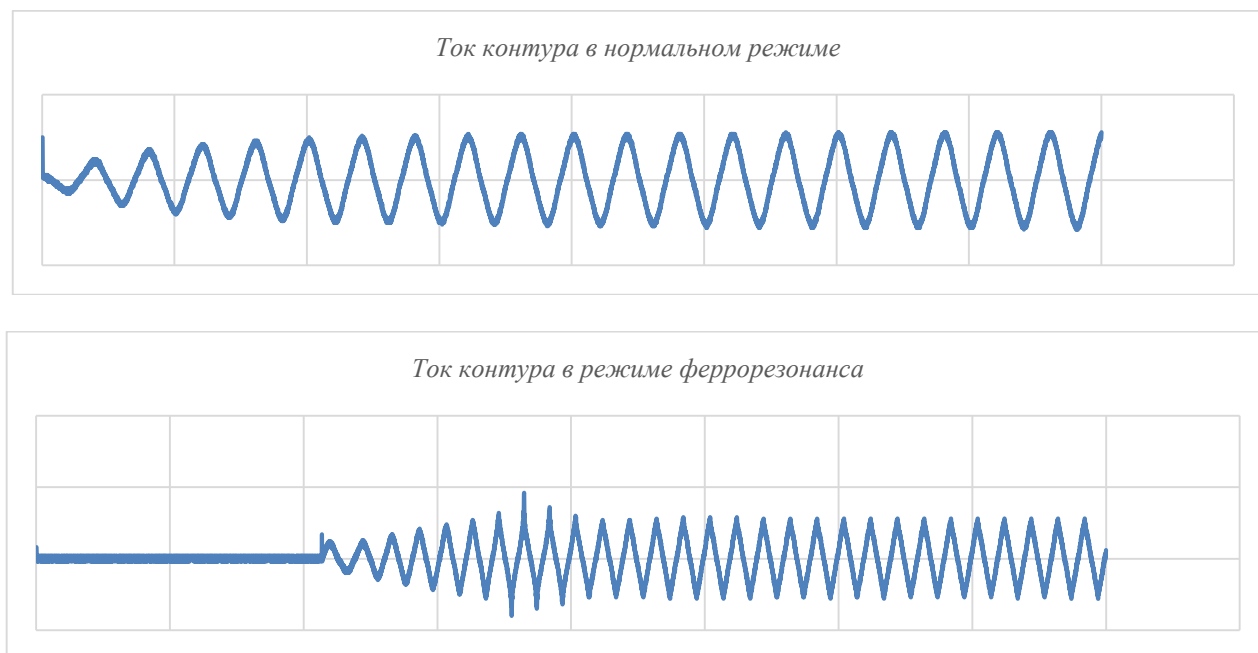


Рис. 6. Результаты экспериментальных исследований

Полученные экспериментально осциллограммы сопоставлены с полученными при расчетах величинами, приведенными в таблице 1.

Таблица 1.

### Сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными

Метод моделирования феррорезонансного контура	Величины, сравниваемые с экспериментальными
Графоаналитический	Действующие значения тока реактора и напряжения на емкости в установившемся режиме, после затухания переходного процесса
На основе решения уравнения Дурффинга	Амплитуды токов, полученные для всех точек равновесия контура
На основе численного решения дифференциальных уравнений	Мгновенные значения тока реактора и напряжения на емкости в ходе переходного процесса и после его окончания

При этом в вышеописанных моделях использовалось одно и то же описание вольт-амперной характеристики реактора на основе полинома третьей степени.

### Выводы

Сравнение методов расчета феррорезонансных процессов показало, что наиболее точными являются модели, основанные на численном решении нелинейных дифференциальных уравнений. Однако их использование не позволяет получить выражений удобных для инженерных расчетов, а определение точки неустойчивого равновесия весьма затруднительно. Наиболее удобным подходом для решения этих задач является графоаналитический метод, позволяющий получить не только удобные для расчетов выражения и качественную оценку точек равновесия системы, но и приемлемый по точности результат вычислений, необходимых для определения условий возникновения феррорезонанса условий.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Способ ограничения перенапряжений в электросетях: пат. RU 2342756 С1/ В.А. Благинин, И.Е. Кажекин. - № 2007149444/09 заявл. 27.12.2007; опубл. 27.12.2008, Бюл. № 36
2. Кажекин, И.Е. Описание процессов при дуговых однофазных замыканиях в низковольтных судовых электросетях с компенсированной нейтралью / И.Е. Кажекин // Морские интеллектуальные технологии. - 2019.- Т. 4, № 4 (46). - С. 83-87.
3. Кажекин, И.Е. Формирование максимальных перенапряжений при возникновении феррорезонансных 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.
4. Кутявин, А.И. Расчет релейных эффектов в последовательной феррорезонансной цепи/ А.И. Кутявин//Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 1972. - №244. - С. 39-43.
5. Шуин, В. А. Математическая модель для оценки минимального уровня высших гармоник в токе однофазного замыкания на землю в компенсированных сетях 6–10 кВ/ В.А. Шуин, Т.Ю. Винокурова, Е.С. Шагурина // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2013. - №6. – С. 35-41.

# MODELING OF A FERRORESONANCE CIRCUIT IN A LOW-VOLTAGE SHIP POWER NETWORK WITH COMPENSATED NEUTRAL

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 provides an overview of methods for modeling a ferroresonant circuit, which is formed in low-voltage ship electrical networks when their neutral point is grounded through a reactor. The purpose of the work is to systematize information about the methods of studying a ferroresonant circuit for further assessment of the possibility of occurrence of resonant modes in it. It is shown that analytical and graphic-analytical methods are significantly inferior in accuracy to numerical methods of calculation. The work was supported financially by the Federal Agency for Fisheries (contract no. 122030900054-0).*

УДК 620.92

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ НА МОРСКИХ СУДАХ

<sup>1</sup>Кугучева Дарья Константиновна, аспирант кафедры энергетики

<sup>2</sup>Харитонов Максим Сергеевич, канд. техн. наук, доцент кафедры энергетики

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,  
Калининград, Россия, e-mail: <sup>1</sup>kuguchevad@yandex.ru

*Представлены результаты исследований режима работы фотоэлектрических панелей в условиях непрерывного движения и качки судна. Построена математическая модель фотоэлектрической панели в программном комплексе Matlab/Simulink с учетом изменений приходящей на поверхность инсоляции. Обозначены особенности функционирования накопителей при прерывистом режиме работы панелей и определены подходы к построению надежной судовой системы электроснабжения на базе возобновляемых источников энергии с использованием двух типов накопителей – литий-ионных батарей и суперконденсаторов. Предложены и апробированы на математической модели решения по повышению эффективности работы солнечной электростанции.*

К числу характерных тенденций последних десятилетий в современной мировой практике относится решение проблем экологии за счет замены углеводородного сырья и различного вида топлив на возобновляемые источники энергии (ВИЭ). В частности, современное судостроение характеризуется внедрением энерго- и экологически эффективных технологий. Активно развивается строительство судов, использующих электродвигатели и возобновляемые источники энергии. Электрификация судов является одним из перспективных решений для предотвращения загрязнения морской среды, что обозначено в качестве основных приоритетных направлений в борьбе с изменением климата в Киотском протоколе и Парижском соглашении.

Согласно отчету Международной морской организации [1], выбросы NO<sub>x</sub> (оксиды азота) и SO<sub>x</sub> (оксиды серы) от сферы мирового судоходства составляют 15% и 13% соответственно, а выбросы CO<sub>2</sub> составляют 2,2% от общего объема выбросов парниковых газов в атмосферу. На рисунке 1 представлена диаграмма количества выбросов CO<sub>2</sub> от мирового судоходства.



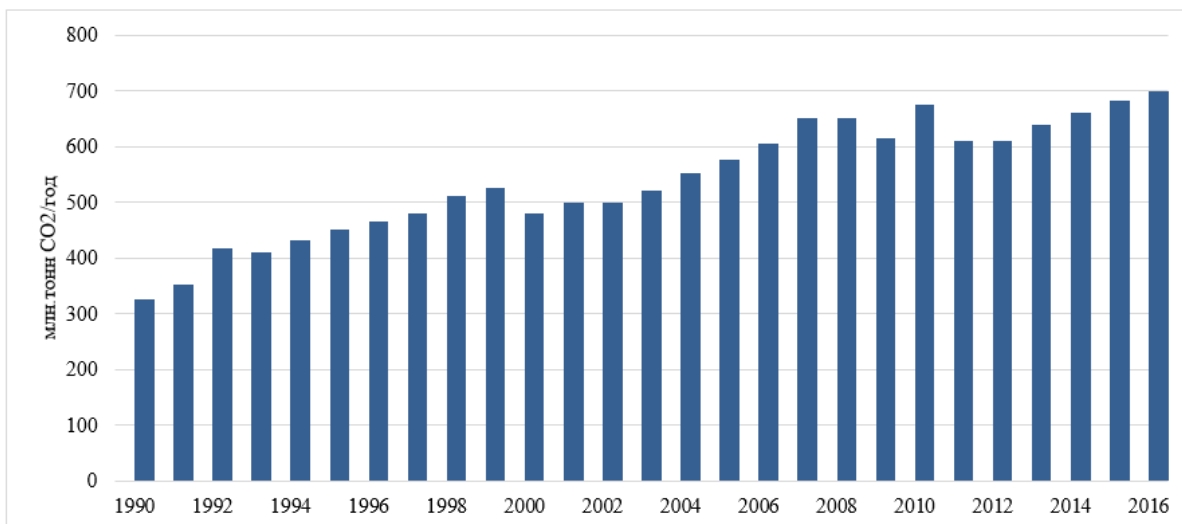


Рис. 1. Выбросы  $CO_2$  от мирового судоходства [3]

Согласно принятому пакету мер Международной морской организации в 2021 году по декарбонизации судоходства, с 2023 года суда должны будут ежегодно уменьшать объемы выбросов парниковых газов в атмосферу (Приложение VI к конвенции МАРПОЛ 73/78) [2]. Решением данной задачи является использование низко- и безуглеродных видов топлива и внедрение в судовую систему электроснабжения возобновляемых источников энергии. Наиболее перспективным видом ВИЭ для использования на судах является фотоэлектрические преобразователи.

Стремительное развитие технологий солнечной генерации и значительное снижение в течение последнего десятилетия стоимости фотоэлектрического и инверторного оборудования позволили интегрировать солнечные технологии в электроэнергетические системы морских судов.

В отличие от береговой солнечной электростанции, где изменение выходной мощности связано с изменением солнечного излучения, особенностью работы фотоэлектрических панелей (ФЭП), расположенных на судне, является непрерывное изменение положения панелей относительно солнца из-за постоянного движения и раскачивания судна. В данном случае значение солнечного излучения является динамической величиной, которая зависит от высоты солнца над горизонтом, облачности, волнения моря, направления движения судна, а также типа, параметров и характеристик судна.

Моделирование движение судна и его качения включает большое количество факторов, поэтому в данной работе для анализа работы ФЭП использованы существующие данные по изменению количества приходящей на поверхность фотоэлектрической панели инсоляции. Согласно результатам проведенных экспериментальных исследований на нефтяном танкере [4], изменение приходящего на поверхность ФЭП солнечного излучения при расположении солнечных модулей на палубе происходит по графику, представленному на рисунке 2.

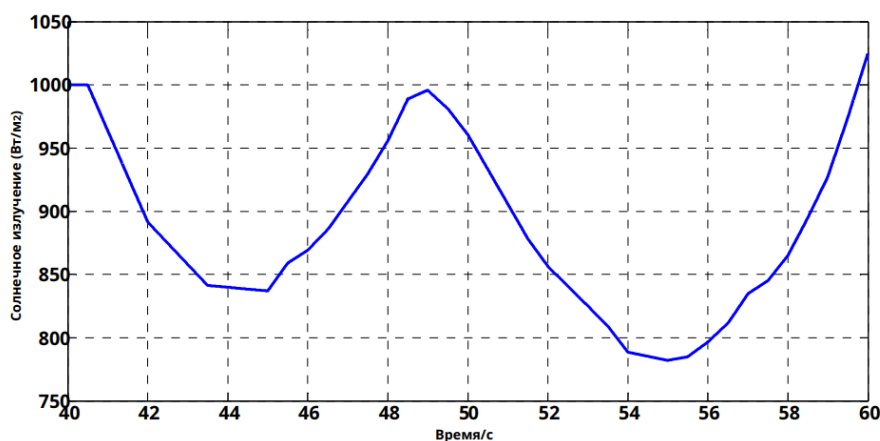


Рис. 2. Изменение приходящей на поверхность ФЭП инсоляции с учетом качки и движения судна

Для анализа особенностей функционирования ФЭП при ее размещении на морских судах в программном комплексе Matlab/Simulink была построена модель фотоэлектрической панели, эквивалентная схема которой представлена на рисунке 3 [5]. Данная модель состоит из 5 подсистем, представленных на рисунке 4. В качестве объекта моделирования был выбран солнечный модуль HVL-390/HJT, основные технические характеристики которого приведены в таблице 1.

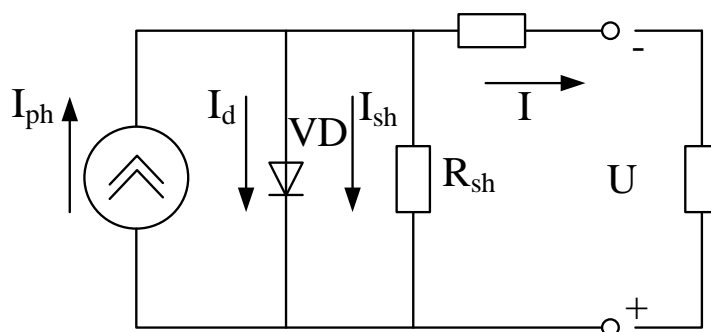
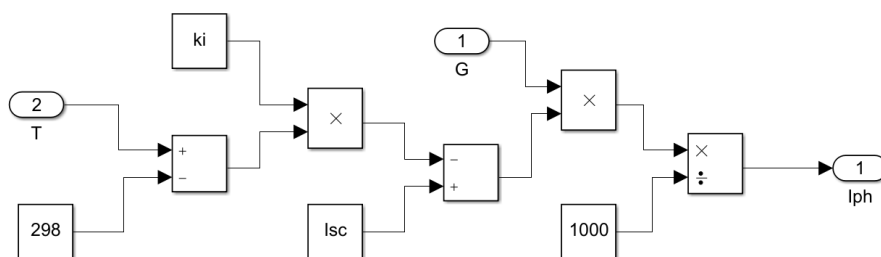
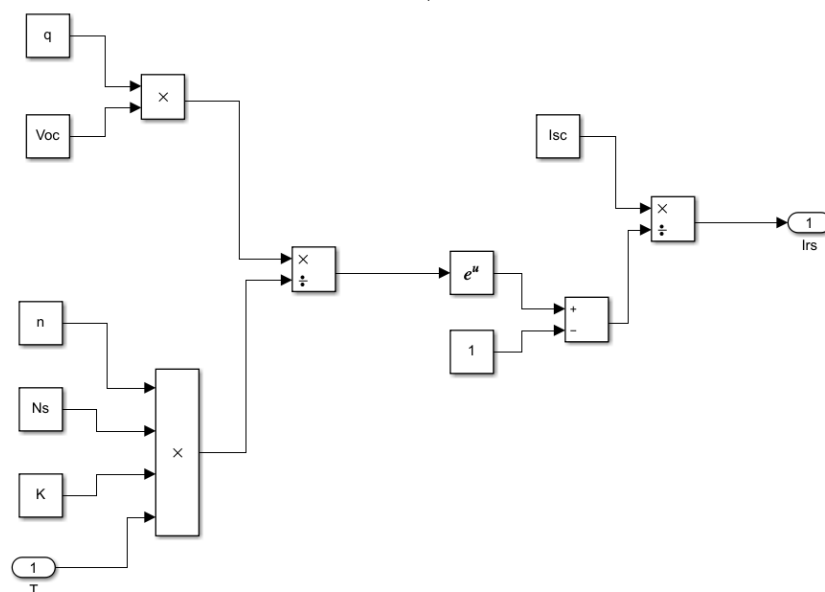


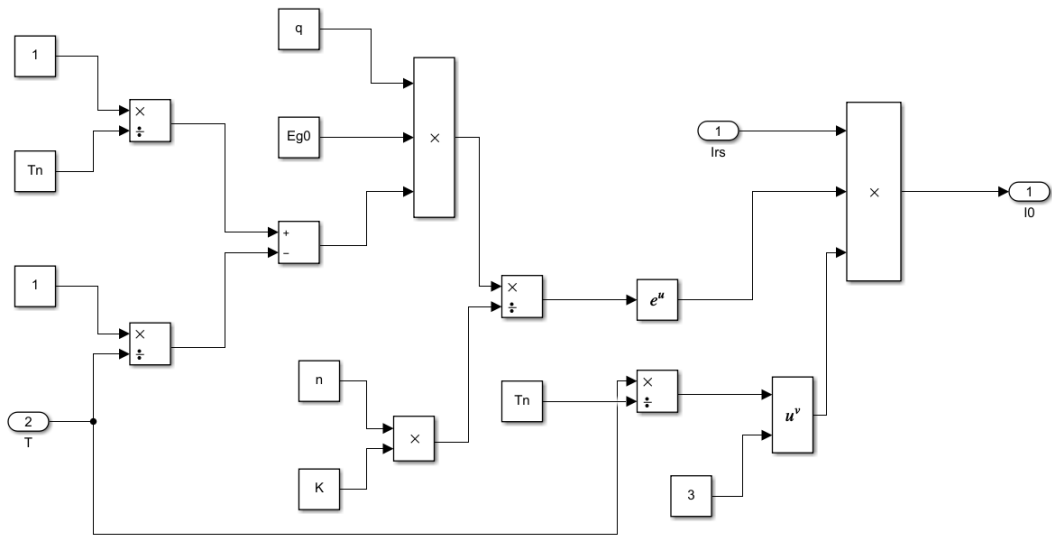
Рис. 3. Однодиодная схема замещения фотоэлемента



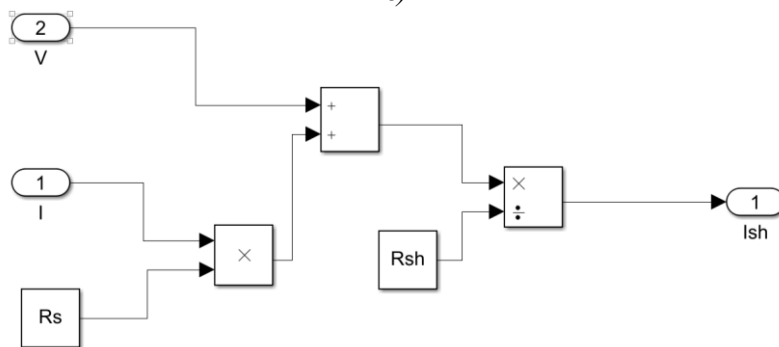
а)



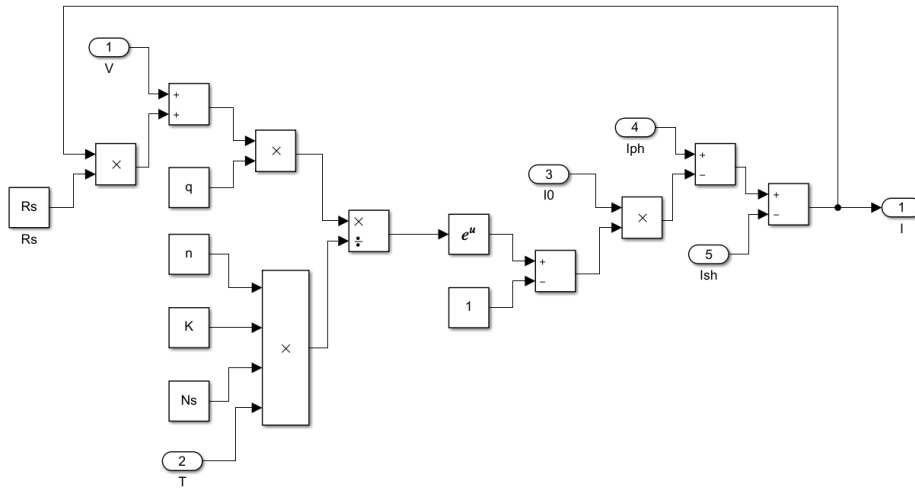
б)



b)



c)



d)

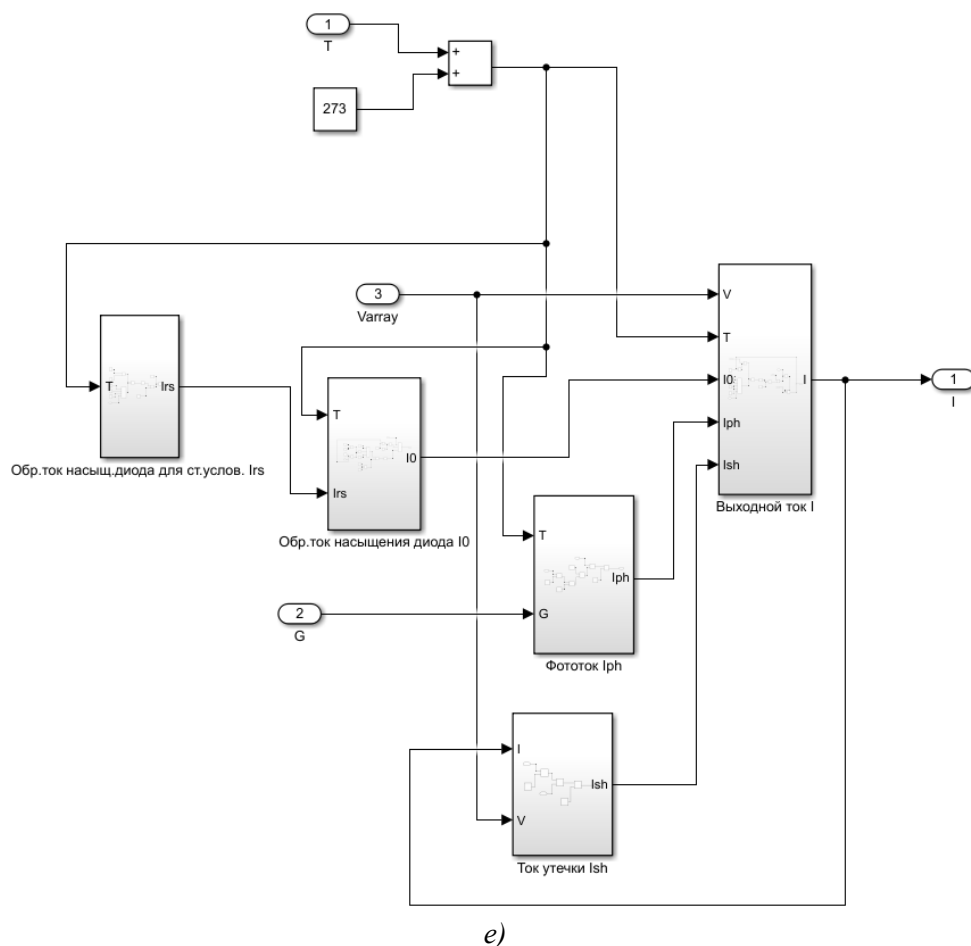


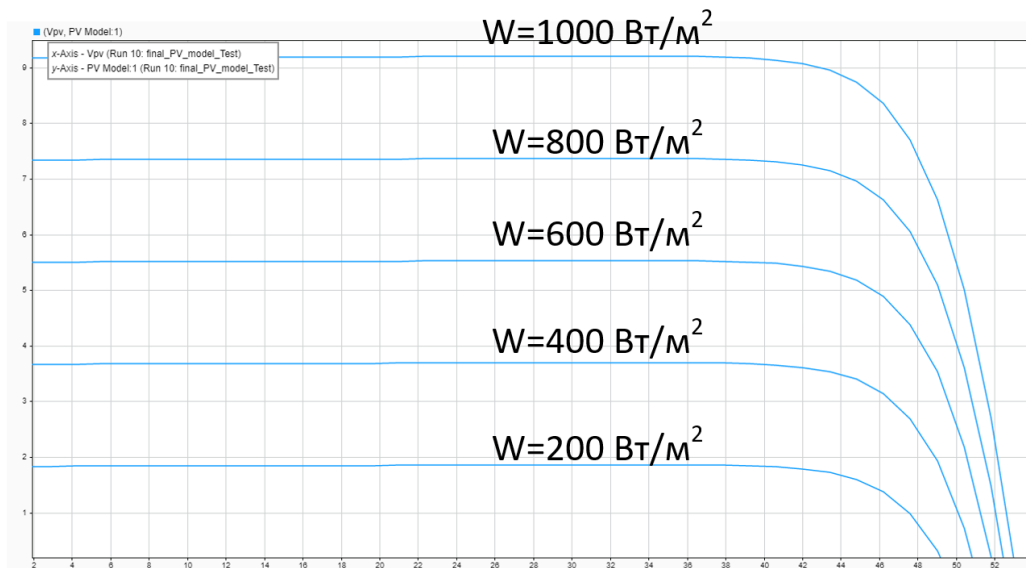
Рис. 4. Подсистемы модели фотоэлектрической панели, реализованной в Matlab/Simulink  
 а) контур расчета фототока, б) контур расчета обратного тока насыщения диода для стандартных условий, в) контур расчета обратного тока насыщения диода, г) контур расчета тока утечки, д) модель для расчета выходного тока солнечной панели, е) общий вид модели ФЭП

Таблица 1

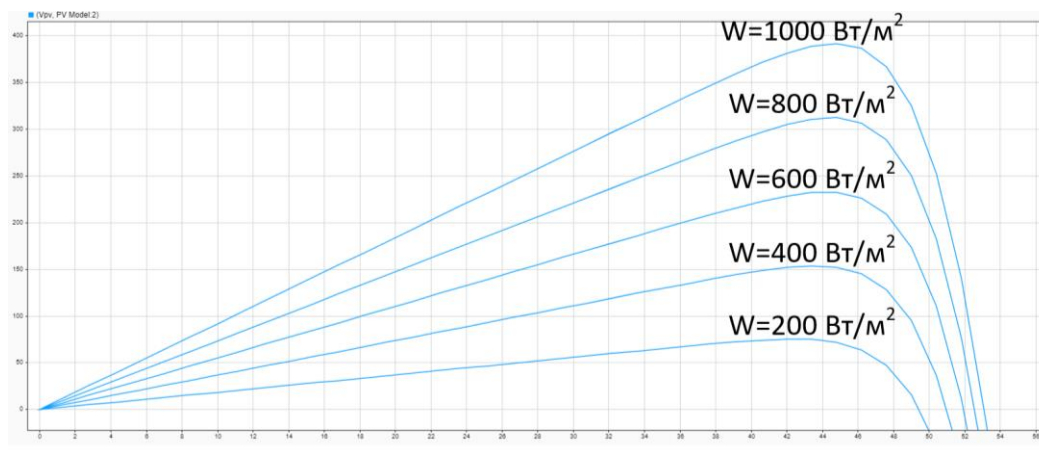
**Основные технические параметры солнечного модуля HVL-390/НТ [6]**

Параметр	Значение
Номинальная мощность, Вт	390
Ток в рабочей точке Pmax (Impp), А	8,76
Ток короткого замыкания (Isc), А	9,18
Напряжение холостого хода (Voc), В	53,08
Напряжение в рабочей точке Pmax (Vmpp), В	44,71
Температурный коэффициент Pmax, %/°C	-0,285
Температурный коэффициент Voc, %/°C	-0,244
Температурный коэффициент Isc, %/°C	0,055

Вольт-амперные и вольт-ваттные характеристики, полученные по результатам моделирования солнечного модуля HVL-390/НТ при различных значениях приходящей на поверхность ФЭП инсоляции, представлены на рисунке 5. Данные характеристики описывают поведение ФЭП для стационарного (неподвижного) состояния судна при температуре окружающей среды 25 °С.



а)



б)

Рис.5. Вольт-амперные (а) и вольт-ваттные (б) характеристики солнечного модуля HVL-390/HJT

Для судовой системы электроснабжения на базе ВИЭ на стабильность выходной мощности влияет не только изменение во времени инсоляции, но и качание судна под действием волнения и ветра. Изменение выходной мощности ФЭП при расположении солнечных модулей на палубе, согласно результатам моделирования приходящей на ФЭП инсоляции в программном комплексе Matlab/Simulink, представлено на рисунке 6.

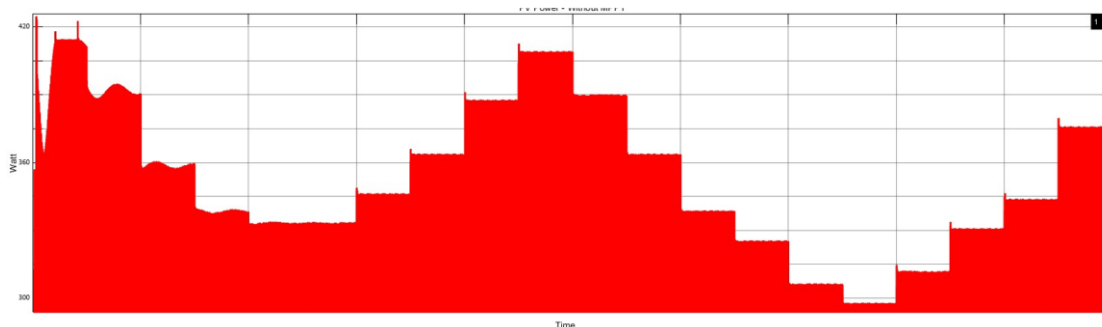


Рис.6. Выходная мощность солнечного модуля HVL-390/HJT в условиях качки судна

Выходная мощность ФЭП зависит от параметров движения судна, причем частота колебаний зависит от частоты качки судна, поэтому период колебаний мощности и тока составляет несколько

секунд или десятков секунд. Подобное непрерывное колебание мощности приводит к ускоренному старению аккумуляторных батарей из-за инициированных неглубоких циклов заряда и разряда.

Прерывистый режим работы ФЭП требует наличия в системе накопления электроэнергии накопителя с большим количеством циклов заряда-разряда, поэтому для снижения влияния прерывистого характера выходной мощности фотоэлектрических панелей предлагается внедрение в систему электроснабжения с ФЭП двух видов накопителей: суперконденсаторов и литий-ионные аккумуляторных батарей (рисунок 7). Различные свойства двух типов накопителей позволят повысить надежность и стабильность работы системы электроснабжения.

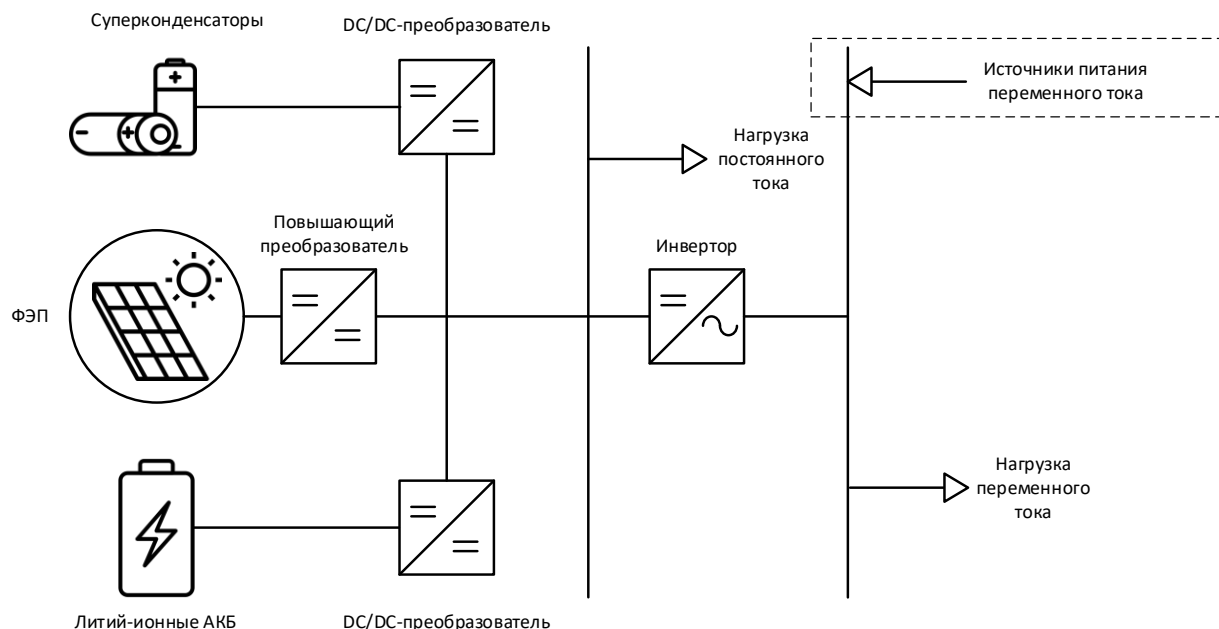


Рис. 7. Схема судовой системы электроснабжения

Литий-ионные аккумуляторные батареи обладают высокой эффективностью, высокой мощностью и высокой плотностью энергии. Суперконденсаторы обладают высокой удельной мощностью, возможностями быстрого заряда и быстрого разряда, что актуально для кратковременно работающих энергоёмких потребителей. Суперконденсаторы обладают малой деградацией и значительно превосходят другие накопители по числу циклов заряда-разряда. Данные особенности позволяют использовать гибридную накопительную систему на базе суперконденсаторов и аккумуляторных батарей для разных задач: суперконденсаторы позволяют решить проблемы прерывистой энергии от ФЭП путем быстрого ее аккумулирования, а также позволяют выработать большое количество электроэнергии за короткий период времени для больших нагрузок судовой системы электроснабжения, в то время как литий-ионные АКБ обеспечат потребности базовых нагрузок. Использование суперконденсаторов для покрытия пиков нагрузки позволит снизить в данные моменты времени потребность системы в аккумуляторных батареях, тем самым предотвратив чрезмерный разряд батарей и предотвратив снижение их срока службы. Сравнительная характеристика данных типов накопителей представлена в таблице 2 [3].

При быстро меняющихся условиях выработки электроэнергии ФЭП точное отслеживание точки максимальной мощности является важным фактором правильной работы всего генерирующего комплекса. Поэтому для получения максимальной мощности от ФЭП при постоянном изменении приходящей на поверхность ФЭП инсоляции и, соответственно, непрерывном изменении выходной мощности, необходимо использование МРРТ-контроллера для отслеживания точки максимальной мощности (Maximum Power Point Tracker).

## Сравнительная характеристика накопителей электроэнергии

	Литий-ионные аккумуляторные батареи	Ультраконденсаторы
Преимущества	Высокая эффективность (90-97%) Низкий саморазряд (<5% в месяц) Быстрое время отклика (с нуля до полной мощности) (<5 мс) Высокая надежность	Высокая эффективность (85-98%) Быстрое время отклика (с нуля до полной мощности) (<5 мс) Большой жизненный цикл - более 500 000 рабочих циклов Широкий диапазон рабочих температур (-40 до +65 °C)
Недостатки	Высокая стоимость Срок службы сокращается из-за глубокого разряда Высокие требования к защите	Высокая стоимость Короткое время разряда-заряда Низкая плотность энергии Высокий показатель саморазряда

Структурная схема повышающего преобразователя постоянного тока, построенного в среде Matlab/Simulink для определения максимальной мощности фотоэлектрической панели в любой момент времени, представлена на рисунке 8. Повышающий преобразователь имеет на выходе дроссель, обеспечивающий непрерывность входного тока и стабильность рабочей точки ВАХ по току, что необходимо в быстро меняющихся условиях выработки электроэнергии ФЭП. При этом происходит увеличение напряжения на всем диапазоне регулирования, что позволяет подстраивать напряжение на выходе ФЭП под необходимое напряжение на входе накопителей.

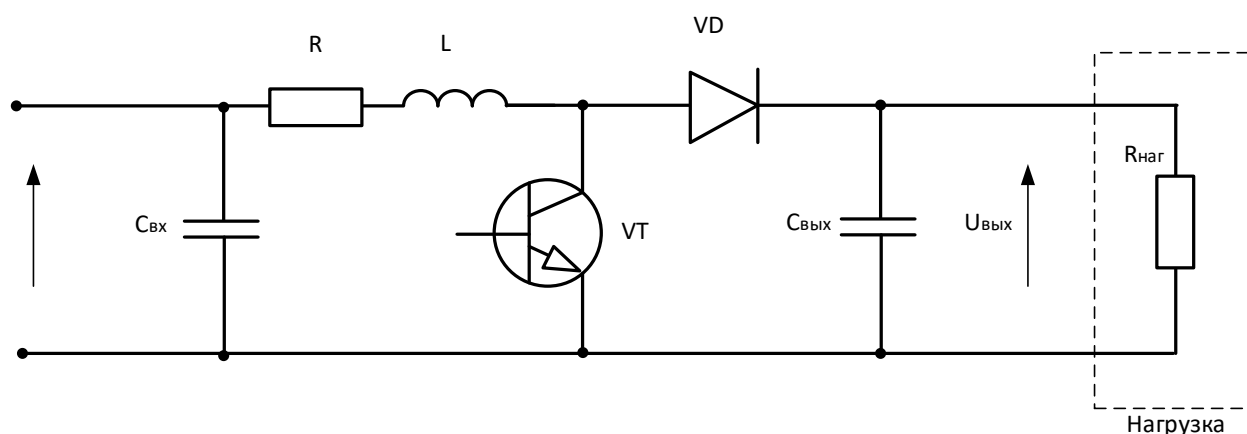


Рис.8. Структурная схема повышающего преобразователя постоянного тока

Для оптимизации выходной мощности возможно использование следующих алгоритмов: метод возмущения и наблюдения, метод возрастающей проводимости, метод постоянного напряжения, методов с использованием нейронных сетей. В данной работе в качестве алгоритма поиска точки максимальной мощности используется метод Р&О (возмущение и наблюдение) из-за его простоты реализации [7]. Поиск точки максимальной мощности на ВАХ ФЭП осуществляется за счет измерения параметров системы – напряжения и тока, далее осуществляется расчет мощности и, в случае необходимости, изменение напряжения. Реализация данного алгоритма в математическом виде представляется следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{dP}{dU} > 0; U = U + \Delta U \\ \frac{dP}{dU} = 0; U = U_m \\ \frac{dP}{dU} < 0; U = U - \Delta U \end{cases} \quad (1)$$

Построенная в Matlab/Simulink модель фотоэлектрической станции с повышающим преобразователем постоянного тока и реализованным алгоритмом поиска максимальной мощности при

расположении ФЭП на судне представлена на рисунке 9. Результаты моделирования работы солнечного модуля HVL-390/HJT в условиях качки судна при наличии повышающего преобразователя постоянного тока представлены на рисунке 10. Как показано на графике, достижение максимальной мощности происходит практически мгновенно без ярко выраженных колебаний, продемонстрированных на схеме без повышающего преобразователя постоянного тока (рисунок 6).

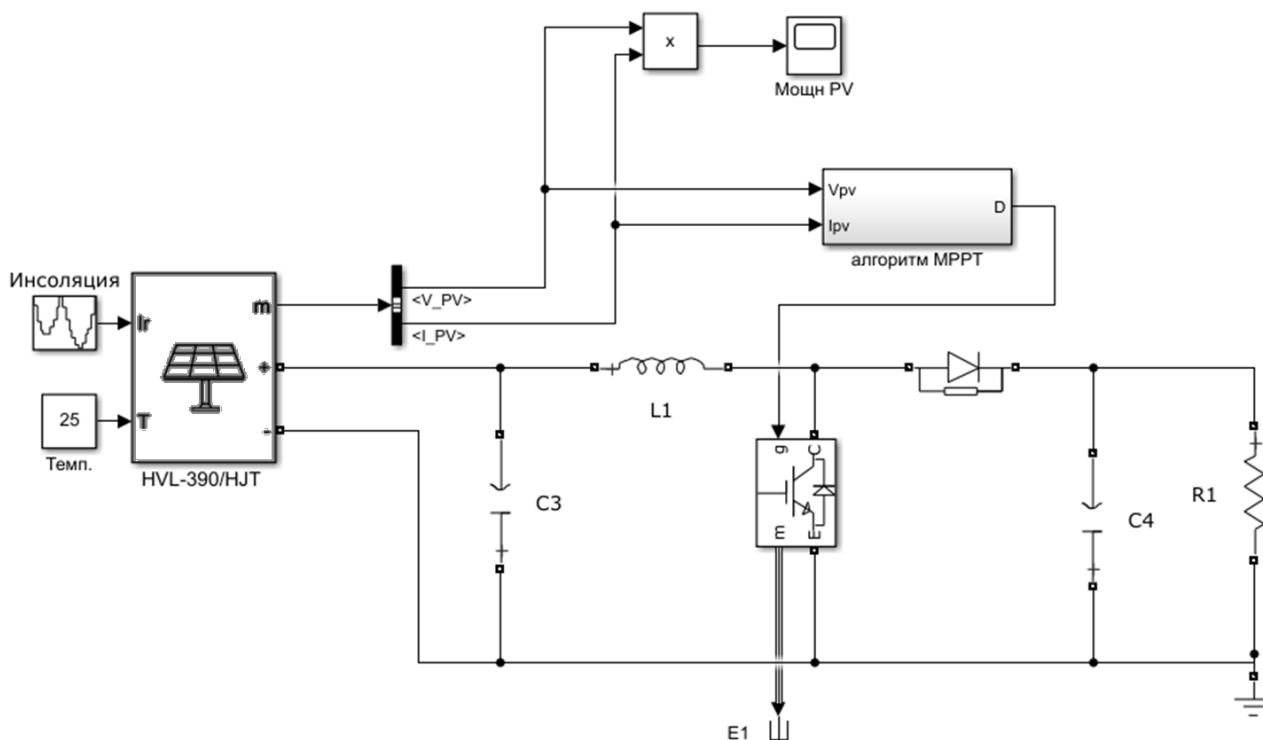


Рис.9. Модель фотоэлектрической станции с повышающим преобразователем постоянного тока

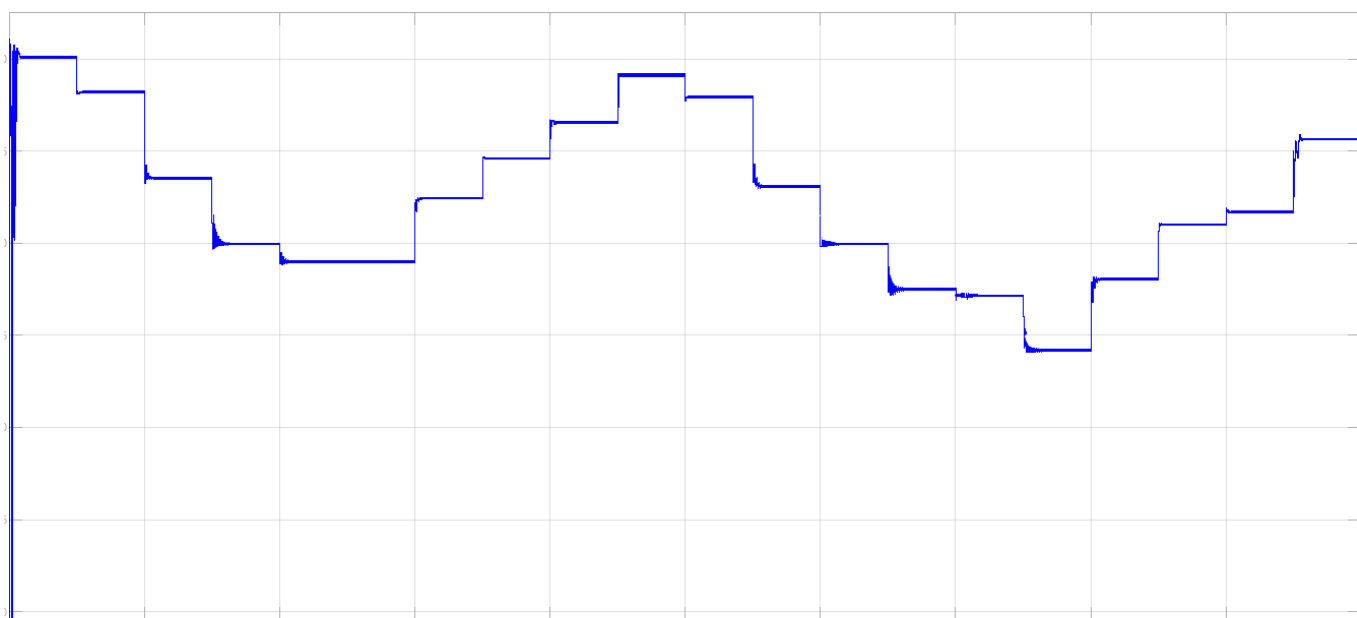


Рис.10. Выходная мощность солнечного модуля HVL-390/HJT в условиях качки судна при наличии повышающего преобразователя постоянного тока



## Заключение

В отличие от береговых фотоэлектрических систем, ФЭП на судне подвергаются непрерывному изменению их положения относительно солнца, что приводит к постоянной изменчивости характеристик генерации ФЭП. По результатам выполненного анализа построенной в ПК Matlab/Simulink модели ФЭП при ее расположении на движущемся судне было предложено внедрение в судовую систему электроснабжения гибридной системы накопления электроэнергии с использованием литий-ионных аккумуляторных батарей, отвечающих за низкочастотные колебания мощности в системе, и суперконденсаторов, отвечающих за высокочастотные колебания мощности. Для поддержания необходимого уровня напряжения в системе электроснабжения при быстро меняющихся условиях выработки электроэнергии ФЭП и для повышения эффективности работы солнечной электростанции предложен к внедрению в систему электроснабжения преобразователь постоянного тока. Результаты моделирования повышающего преобразователя постоянного тока с заданным алгоритмом поиска точки максимальной мощности показали эффективность работы МРРТ-контроллера и практически полное отсутствие пульсаций при резком изменении входящей на поверхность ФЭП инсоляции.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. International Maritime Organization: Prevention of Air Pollution from Ships [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/AirPollution.aspx>.
2. Правила предотвращения загрязнения воздушной среды с судов. Приложение VI (пересмотренное) к Международной конвенции по предотвращению загрязнения с судов 1973 года, измененной Протоколом 1978 года к ней (МАРПОЛ 73/78) [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/499014496>
3. Mutarraf, M.U.; Terriche, Y.; Niazi, K.A.K.; Khan, F.; Vasquez, J.C.; Guerrero, J.M. Control of Hybrid Diesel/PV/Battery/Ultra-Capacitor Systems for Future Shipboard Microgrids. *Energies* 2019, 12, 3460. <https://doi.org/10.3390/en12183460>
4. Lan, H.; Bai, Y.; Wen, S.; Yu, D.C.; Hong, Y.-Y.; Dai, J.; Cheng, P. Modeling and Stability Analysis of Hybrid PV/Diesel/ESS in Ship Power System. *Inventions* 2016, 1, 5. <https://doi.org/10.3390/inventions1010005>
5. Кугучева, Д. К. Оценка влияния условий эксплуатации на функционирование фотоэлектрических панелей / Д. К. Кугучева, М. С. Харитонов // Балтийский морской форум: Материалы IX Международного Балтийского морского форума. В 6-ти томах. XIX Международная научная конференция, Калининград, 04–09 октября 2021 года. – Калининград: Калининградский государственный технический университет, 2022. – С. 599-605.
6. Солнечный модуль HVL-390/HJT [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.hevelsolar.com/catalog/solnechnye-moduli/modul-fotoelektricheskii-hvl-390hjt/>
7. Русскин, В. А. Исследование алгоритмов поиска точки максимальной мощности для повышающего преобразователя напряжения солнечного инвертора / В. А. Русскин, С. М. Семенов, Р. К. Диксон // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 4. – С. 78-87.

## STUDY OF THE FUNCTIONING OF PHOTOVOLTAIC POWER PLANTS ON SEA VESSELS

<sup>1</sup>Kugucheva Darya Konstantinovna, postgraduate student, department of energy

<sup>2</sup>Kharitonov Maxim Sergeevich, dr.(eng), associate professor of the department of energy

<sup>1,2</sup>Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,  
e-mail: <sup>1</sup>kuguchevad@vk.com

*The article presents the results of studies of the mode of operation of photovoltaic panels in conditions of continuous movement and motion of the vessel. A mathematical model of a photovoltaic panel has been built in the Matlab/Simulink software package, taking into account changes in the insolation coming to the surface. The features of the operation of storage devices in the intermittent operation of panels are outlined and approaches to building a reliable ship power supply system based on renewable energy sources using two types of storage devices - lithium-ion batteries and supercapacitors - are identified. Solutions to improve the efficiency of a solar power plant are proposed and tested on a mathematical model.*

УДК 537.613

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОМБИНИРОВАННОЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ УСТРОЙСТВ НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ

<sup>1</sup>Молчанов Сергей Васильевич, канд. физ.-мат. наук, доцент,  
доцент образовательно-научного кластера «Институт высоких технологий»

<sup>2</sup>Чижма Сергей Николаевич, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры  
электрооборудования и автоматики судов

<sup>3</sup>Яковлев Александр Сергеевич, аспирант образовательно-научного кластера  
«Институт высоких технологий»

<sup>1,3</sup>ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет им. И. Канта»,  
Калининград, Россия, e-mail: <sup>1</sup>smolchanov@kantiana.ru; <sup>3</sup>aiakovlev@kantiana.ru

<sup>2</sup>Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ»,  
Калининград, Россия, e-mail: <sup>2</sup>chisn@yandex.ru

*Рассматриваются характеристики магнитомягких и магнитотвердых материалов, параметры неодимовых магнитов, производится моделирование магнитной системы с целью повышения индукции магнитной системы, состоящей из комбинации различных магнитных материалов при уменьшении содержания дорогостоящих магнитотвердых материалов.*

*Введение.* В настоящее время наблюдается быстрое развитие и рост производства электрических машин, использующих постоянные магниты. Такие электрические машины используются, например, в качестве электродвигателей в электрическом транспорте, в качестве электрогенераторов – в ветряных электростанциях. Во всех этих устройствах важным элементом конструкции являются постоянные магниты, которые позволяют использовать магнитное поле для генерации энергии, механического движения деталей. Актуальным является разработка конфигураций магнитных систем электрических систем, позволяющим при определенной комбинации постоянных магнитов и ферромагнитных материалов повышать эффективность этих машин [1]. Наиболее распространёнными в силу своих характеристик в настоящий момент являются неодимовые магниты Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B

(неодим-железо-бор). Однако, неодим является редкоземельным элементом, это определяет повышенную стоимость самих магнитов на его основе и соответственно изделий, в которых они применяются [2]. По этой причине, задача по разработке магнитных систем, позволяющих достигнуть требуемого уровня магнитных характеристик при использовании более дешевых материалов, также является актуальной на сегодняшний день.

Одним из решений этой задачи может быть применение при изготовлении подхода на основе совмещения в одной магнитной системе магнитотвёрдых и магнитомягких материалов в различных пропорциях и конфигурациях. Создание таких конфигураций позволяет сократить количество используемого в изделии дорогостоящего магнитотвёрдого материала за счёт замены некоторой его части магнитомягким. В данной статье приведены результаты исследований параметров разработанных конфигураций магнитных систем, состоящих как из цельных магнитов, так и из комбинаций магнитомягких и магнитотвердых материалов.

*Характеристики магнитных материалов и выбор.* Постоянные магниты изготавливаются из магнитотвёрдых материалов (МТМ), что означает их способность сохранять полученную от внешнего магнитного поля намагниченность. МТМ это сплавы, обладающие коэрцитивной силой свыше 7960 Ампер/метр (100 эрстед). Данные материалы имеют высокую остаточную намагниченность, и их основное назначение - получение постоянных магнитов. Постоянные магниты на основе МТМ используют для получения магнитных полей значительной напряженности [3]. Характеристикой этой способности материала служит зависимость, называемая петлёй гистерезиса (рис. 1), которая отображает зависимость вектора намагничивания от напряженности внешнего электрического поля. Она характеризуется максимальным значением индукции в режиме насыщения  $B_m$  остаточной индукцией  $B_r$  и коэрцитивной силой  $H_c$ . Коэрцитивная сила – это величина напряжённости внешнего магнитного поля, необходимая для полного размагничивания материала от точки насыщения  $B_m$  до 0, измеряется она в тех же единицах измерения, что и напряжённость магнитного поля – ампер/метр. Также следует отметить, что используемые при изготовлении постоянных магнитов материалы являются ферромагнетиками, что означает их очень высокую магнитную проницаемость  $\mu$  ( $10^4$ - $10^5$  Генри на метр) – величину коэффициента, характеризующего связь между магнитной индукцией  $B$  и напряжённостью магнитного поля  $H$  в веществе.

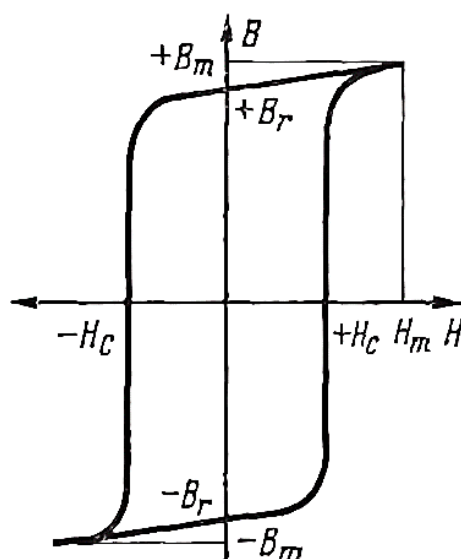


Рис. 1. Петля магнитного гистерезиса

Магнитотвёрдые ферромагнетики характеризуются высокой коэрцитивной силой ( $H_c > 20$  кА/м) и широкой петлёй гистерезиса, магнитомягкие же в свою очередь имеют низкую и близкую к нулевой коэрцитивную силу ( $H_c < 100$  А/м) и узкую петлю гистерезиса. В качестве магнитомягких материалов используется в основном железо и сплавы на его основе, такие как электротехническая сталь. В таблице ниже приведены характеристики некоторых магнитомягких материалов [4].

Неодимовые магниты, в свою очередь, выпускаются разных классов, в зависимости от содержания материалов и условий изготовления. Деление на классы происходит по рабочему температурному диапазону и производимой магнитной энергии  $W$ , измеряемой в килоджоулях на кубический метр. Ниже представлена таблица с характеристиками неодимовых магнитов класса  $N$  (Normal, рабочие температуры до 80 С°) [5].

Таблица 1

**Магнитные характеристики некоторых магнитомягких материалов**

Состав материала, %	Удельное электросопротивление $\rho$ , мкОм·см	Магнитные свойства в статических полях		
		Остаточная магнитная индукция $B$ , Тл	Коэрцитивная сила $H_c$ , А/М	Максимальная магнитная проницаемость $\mu_{max}$
99 Fe	10,0	1,30	76,0	3,80
99 Fe, 1P	41,0	1,35	75,0	5,00
97 Fe, 2Si	44,6	1,00	120,0	1,90
96 Fe, 4Si	70,5	1,00	128,0	2,10
94 Fe, 6Si	146,9	0,90	72,0	4,40
88 Fe, 12Al	95,0	1,30	36,0	8,20

Таблица 2

**Характеристики неодимовых магнитов класса  $N$**

Класс	Остаточная магнитная индукция $B$ , мТл	Коэрцитивная сила, кАмпер/метр (кЭрстед)	Магнитная энергия, кДжоуль/м <sup>3</sup> (МГаусс-Эрстед)	Рабочая температура, градус Цельсия
N30	1,080-1,130	$\geq 769$ ( $\geq 10$ )	263-287 (33-36)	80
N35	1,170-1,220	$\geq 955$ ( $\geq 12$ )	263-287 (33-36)	80
N38	1,220-1,250	$\geq 955$ ( $\geq 12$ )	287-310 (36-39)	80
N40	1,250-1,280	$\geq 955$ ( $\geq 12$ )	302-326 (38-41)	80
N42	1,280-1,320	$\geq 955$ ( $\geq 12$ )	318-342 (40-43)	80
N45	1,320-1,380	$\geq 955$ ( $\geq 12$ )	342-366 (43-46)	80
N48	1,380-1,420	$\geq 876$ ( $\geq 12$ )	366-390 (46-49)	80
N50	1,400-1,450	$\geq 876$ ( $\geq 11$ )	382-406 (48-51)	80

При разработке и моделировании магнитных конфигураций, описанных в данной статье, наиболее важной задачей было оценить соотношение характеристик цельных магнитов и предложенных сборок. По этой причине, в качестве материалов для разработки и моделирования были выбраны наиболее простые и дешёвые материалы – магниты марки  $N30$  и чистое железо. В программном обеспечении, использованном для моделирования, заложены магнитные характеристики указанных в таблицах материалов.

*Выбор метода моделирования.* В настоящее время при моделировании магнитных систем незамкнутого или открытого типа используют двухмерные или трехмерные математические модели, выбор которых зависит от геометрической сложности и набора магнитных материалов с различными характеристиками при проектировании комбинированных магнитных сборок. Задачи, решаемые при моделировании магнитных систем основываются на решениях уравнений Максвелла, получаемых с применением численных методов. В связи с постоянным развитием и совершенствованием компьютерных систем, наиболее целесообразным подходом к решению задачи является применение специализированного программного обеспечения (ПО), которое также доступно в большом количестве вариантов и предлагает различные методы для различных типов задач. Наиболее точными и сложными в вычислении методами являются метод конечных элементов (FEMM) и метод конечных разностей (FDTD) [6,7].

Оба этих метода основаны на аппроксимации искомой непрерывной функции совокупностью приближённых значений, рассчитанных в некоторых точках области – узлах. Метод конечных разностей больше подходит для решения простых задач, но при этом метод конечных элементов может работать с геометрически более сложными областями, и что более важно – получать решение сразу для всех точек рассчитываемой области, что позволяет более точно и быстро анализировать результаты. Также на основе этого метода функционирует большое количество специализированных программ для расчёта электромагнитных полей, таких как Ansys Maxwell, FEMM, JMAG Designer и др. Для решения задач, поставленных в рамках данной статьи, был выбран бесплатный программный пакет FEMM, позволяющий производить моделирование электромагнитных систем соответствующим методом в двумерной плоскости и гибкий вывод результатов для последующего анализа.

*Описание разработанных конфигураций.* Идея совмещения магнитомягких и магнитотвёрдых материалов при создании постоянных магнитов не нова [8,9]. Исследования других авторов подтверждают принципиальную возможность и потенциал использования этого подхода при создании магнитных систем различных конфигураций. В этой работе производится сравнение двух вариантов комбинированных сборок из магнитомягких и магнитотвёрдых материалов, и сравнение их характеристик на основе математических моделей в ПО FEMM.

Рассмотрим общую схему экспериментальной модели (рис.2).

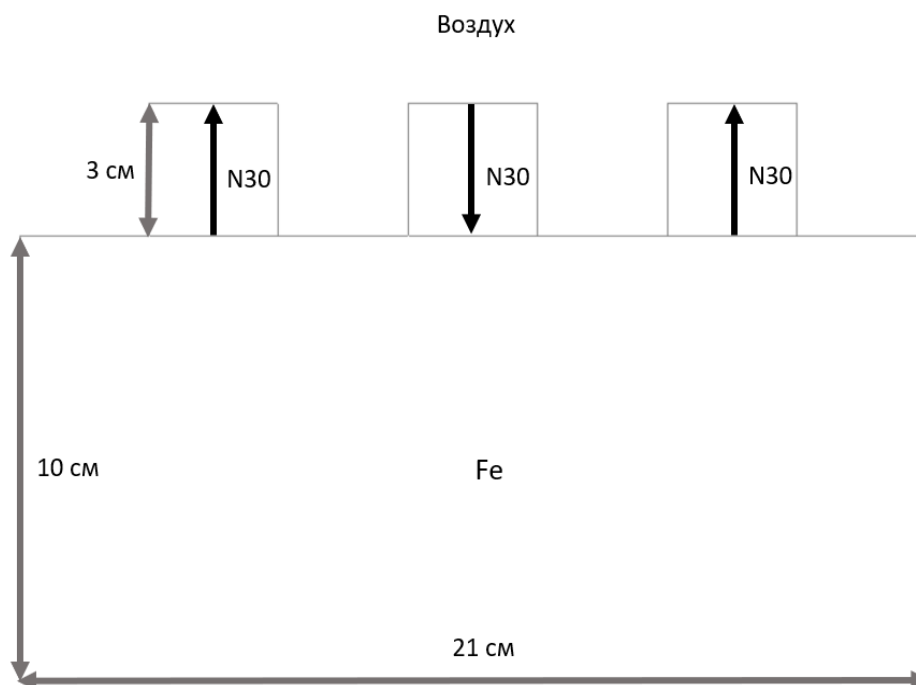


Рис. 1. Общая схема экспериментальной модели

Модель представляет из себя железную пластину, на которой размещены 3 магнита с чередующимся направлением намагниченности, расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга, равном ширине магнита (размерные величины указаны на рис. 2). Система размещена в воздушном пространстве. Такая конфигурация является примером магнитной системы с магнитопроводом и постоянными магнитами и её можно в некотором приближении считать эквивалентом участка реальной магнитной системы, например, такой как ротор электрогенератора. ПО FEMM позволяет произвести расчёты в плоском представлении, то есть центральном поперечном срезе такой системы. Для расчётов задаются граничные условия, при которых значение магнитного потенциала  $A$  равно нулю на краях выбранного диапазона.

На рис.3 схематично изображены исследуемые конфигурации магнитныхборок из неодимовых магнитов и прослоек из железа. Данные сборки размерно эквивалентны одному цельному магниту, изображённому на рис.2. В конфигурации а), изображённой слева, используется соотношение магнитотвёрдого материала к магнитомягкому 60% на 40% соответственно. За основу такой сборки приняты исследования, отражённые в статье [6].

Изображённая справа конфигурация б) основана на принципе «выталкивания» магнитного поля, основы которых были предложены Клаусом Халбахом [8]. За основу центральной части магнита взята сборка из 6 слоёв, 4 из которых составляют магниты, и 2 железо. Справа и слева размещены магниты, намагниченные перпендикулярно основной оси, причём направление выбрано таким образом, чтобы магнитное поле центрального магнита «выдавливалось» в область, в которой можно её использовать, т.е. в данном случае, вверх. В такой конфигурации соотношение магнитотвёрдого к магнитомягкому материалу составляет 71 на 29% соответственно.

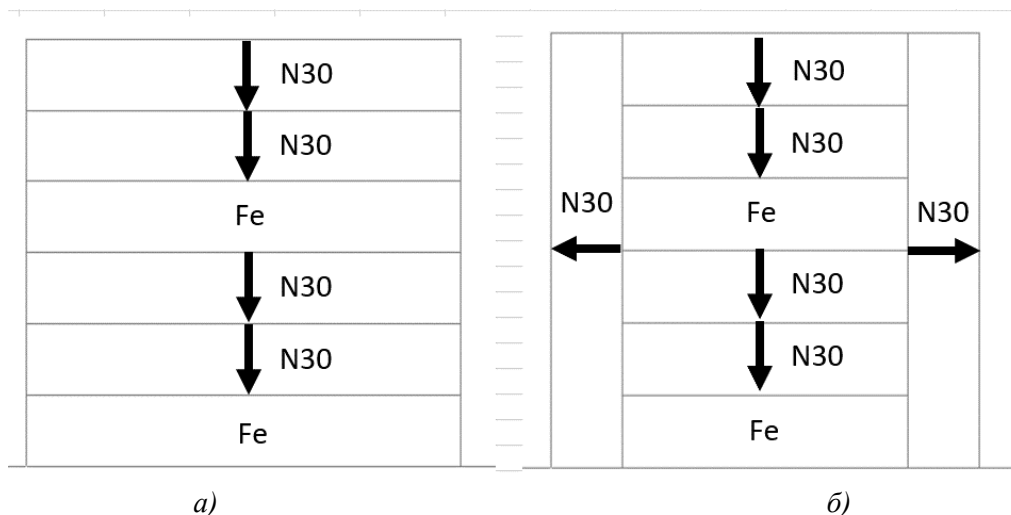


Рис. 3. Схемы предложенных комбинированных магнитных сборок

Для всех исследуемых конфигураций были произведены расчёты с использованием конечно-элементного анализа в FEMM, и построены графики магнитной индукции по перпендикулярной линии (рис.4). на расстоянии 5 мм от поверхности магнитов. Результаты расчётов отображены на общем графике (рис.5).

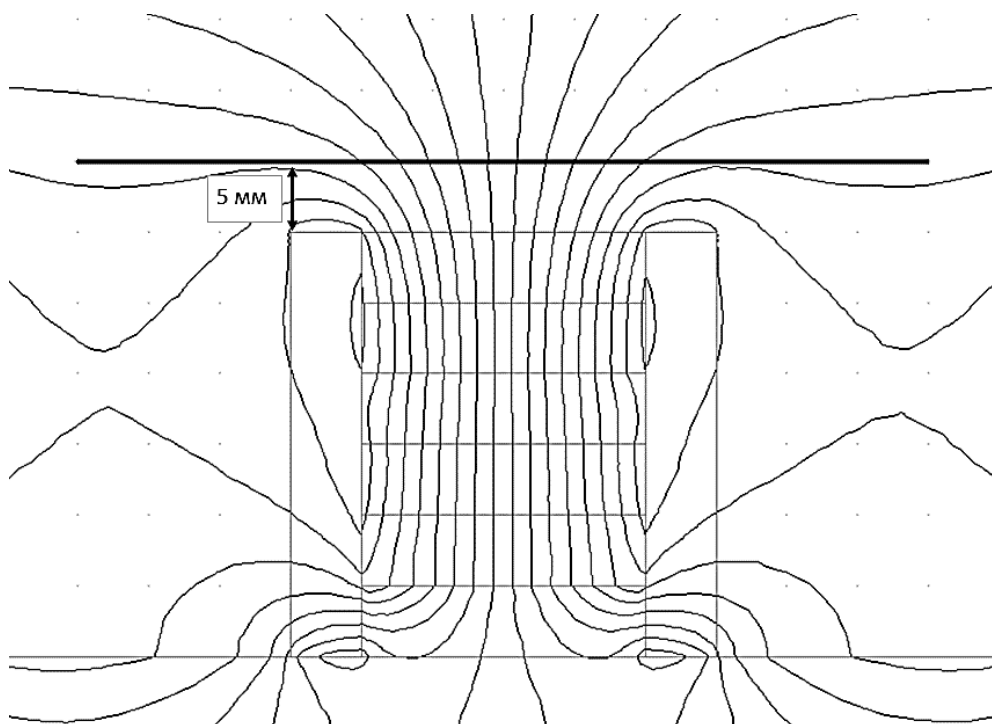


Рис. 4. Графики магнитной индукции по перпендикулярной линии

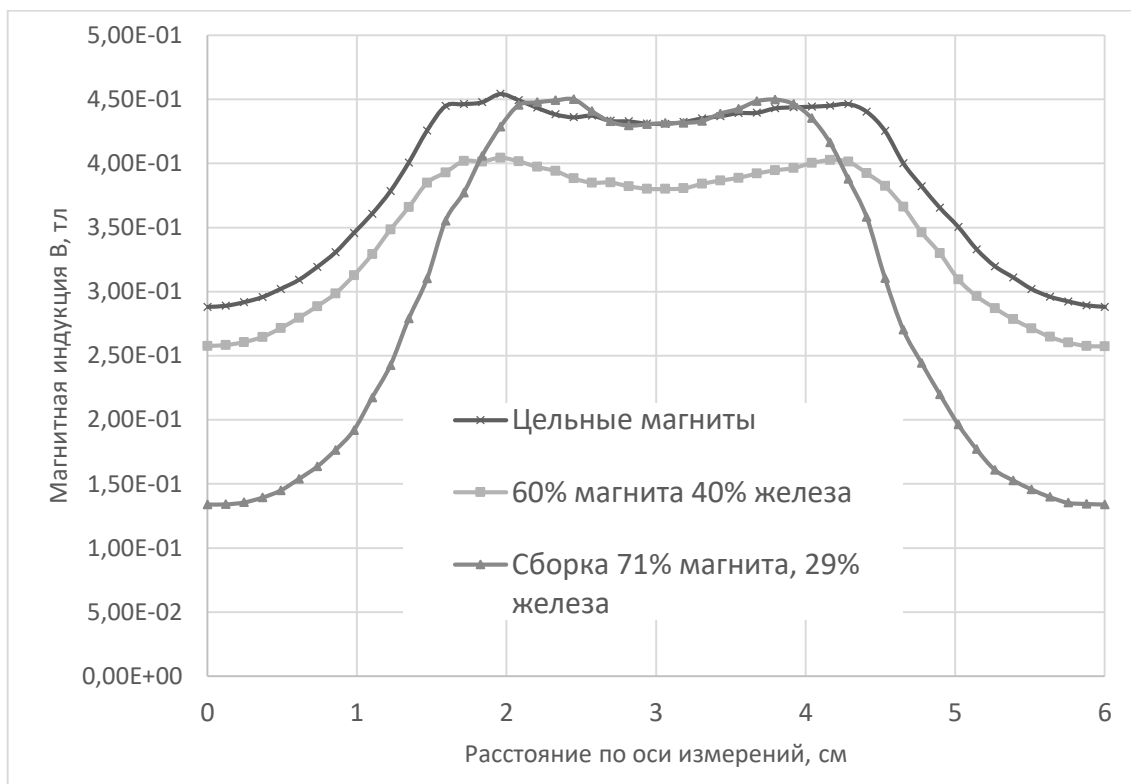


Рис. 5. Общий график результатов расчётов

Представленные графики показывают, что магнитная индукция  $B$  цельного магнита имеет максимальную величину 0,45 Тл. Однако, производимое им магнитное поле имеет более широкий профиль, т. е. оно не сконцентрировано. При этом, для конфигурации с 29% железа, максимальная величина магнитной индукции практически равна этому же значению (0,45 Тл).

**Выводы.** Как видно по результатам сравнения, представленным в таблице 3, уменьшение количества магнитотвёрдого материала в различных конфигурациях приводит к потерям в максимальной индукции гораздо меньшим относительно сэкономленного количества самого материала. При этом предложенная конфигурация 2 при экономии материала в 29% показала потерю в максимальной индукции всего в 1%, что говорит о её наибольшей применимости из трёх вариантов. При этом для данной конфигурации также наблюдается эффект концентрации магнитного поля в области над магнитом, что также может быть полезно при изготовлении определённого типа устройств.

Таблица 3

### Сравнение величин экономии и потерь в максимальном значении магнитной индукции

Вариант конфигурации	Процент экономии твёрдомагнитного материала	Процент потери в максимальной индукции
Цельные магниты	0%	0%
60% магнита 40% железа	40%	11%
Сборка 71% магнита, 29% железа	29%	1%

Таким образом можно сделать вывод, что подход, основанный на комбинировании магнитотвёрдых и магнитомягких материалов при изготовлении постоянных магнитов действительно эффективен и может быть применён в производстве в целях экономии материалов и повышения экономической эффективности производства. При этом при реальном производстве потребуется учесть увеличенное время сборки и затраты на связующие материалы (например, специализированный клей), которые возникают при создании комбинированных конфигураций.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матюнин П.А., Молчанов С.В., Чижма С.Н. Синтез и анализ высокоэффективных магнитных систем электрических машин на постоянных магнитах. Электроэнергетика и электротехника. Материалы VIII Международного Балтийского Морского Форума. Калининград, КЛГТУ, 2020, С. 129-137.
2. Розин, П.А. Применение магнитотвердых материалов в электрических машинах на транспортных средствах / П.А. Розин, А.В. Акимов // Известия МГТУ «МАМИ» № 2(20), 2014, С. 12 – 18.
3. Permanent Magnet Guidelines, Magnetic Materials Producers Association, Chicago, Illinois, USA, 1998, p. 32.
4. Производство материалов методом порошковой металлургии. Магнитные материалы. URL: <https://metalspace.ru/education-career/osnovy-metallurgii/poroshkovaya-metallurgiya/675-magnitnye-materialy.html> (дата обращения: 06.09.2022).
5. Характеристики неодимовых магнитов. URL: <https://magnitural.ru/neodimovye-magnity/harakteristiki-neodimovyh-magnitov.html> (дата обращения 06.09.2022).
6. Альчиков, В.В. Решение уравнений магнитостатики для ферромагнетиков различной формы / В.В. Альчиков // Вычислительные технологии. №8. – 2003. – С.23 – 31.
7. S. Sundaramahalingam, S. Arockiaraj, S. Alagammal, N. Vanaja. Finite Element Modelling and Simulation of Composite Magnetic Materials Using ANSYS. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE) ISSN: 2278-3075, Volume-8 Issue-8 June, 2019.
8. Кравченко, А.И. Комбинированные постоянные магниты: расширение классификации постоянных магнитов / А.И. Кравченко, А.М. Бовда // Электротехника и Электромеханика, 2003, С. 37 – 39.
9. Halbach K Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt material. Nuclear Instruments and Methods 169 (1980) pp. 1-10, doi:10.1016/0029554X80900944.

## EVALUATION OF THE EFFECT OF THE COMBINED MAGNETIC SYSTEM ON THE CHARACTERISTICS OF PERMANENT MAGNET DEVICES

<sup>1</sup>Molchanov Sergey Vasilievich, PSD of physical and mathematical sciences, docent, docent educational and scientific cluster "Institute of high Technologies"

<sup>2</sup>Chizhma Sergey Nikolaevich, doctor of engineering, docent, professor of the department of electrical equipment and ship automation

<sup>3</sup>Iakovlev Aleksandr Sergeevich, post-graduate student educational and scientific cluster "Institute of high Technologies"

<sup>1,3</sup>FSBAI HE Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia, e-mail: <sup>1</sup>smolchanov@kantiana.ru; <sup>3</sup>aiakovlev@kantiana.ru

<sup>2</sup>Baltic Fishing Fleet State Academy FSBEI HE "KSTU", Kaliningrad, Russia, e-mail: chisn@yandex.ru

*The article discusses the characteristics of soft magnetic and hard magnetic materials, the parameters of neodymium magnets, and simulates a magnetic system in order to increase the induction of a magnetic system consisting of a combination of various magnetic materials while reducing the content of expensive hard magnetic materials.*



## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ГЕНЕРАТОРАМИ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ МОРСКИХ СУДОВ

<sup>1</sup>Шабалин Леонид Дмитриевич, канд. техн. наук, доцент

<sup>2</sup>Савенко Александр Евгеньевич, канд. техн. наук, доцент

<sup>3</sup>Савенко Павел Станиславович, аспирант

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,  
Калининград, Россия, e-mail: shabalin44@mail.ru

<sup>2,3</sup>ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический  
университет», Республика Крым, Керчь, Россия, e-mail: savenko-70@mail.ru

*Рассмотрено применение автоматических систем для управления дизель-генераторными установками на морских судах. Исследованы возможности расширения функций таких автоматических систем для повышения качества электроэнергии. Экспериментальные исследования в автономной электрической системе выявили существование обменных и синфазных колебаний мощности. Методами математического моделирования установлена возможность устранения таких колебаний мощности адаптивным изменением настроек регуляторов частоты. Обоснована целесообразность применения аккумуляторных батарей, выпрямительных и инверторных преобразователей в составе судовой электростанции.*

### Введение

Опыт эксплуатации электротехнических комплексов, в том числе электростанций, морских судов различного назначения, показывает необходимость применения автоматических средств и систем управления на основе микропроцессорных систем [1,2].

Для обеспечения надлежащего качества электроэнергии разработан целый ряд алгоритмов, методов и подходов на основе математического моделирования оптимальных режимов работы судовых источников и потребителей электроэнергии, объединенных функциональными связями [3,4]. Особое внимание уделено обеспечению качественной параллельной работе дизель-генераторных агрегатов в составе электростанций морских судов. Однако, развитие современной морской электроэнергетики требует дополнительных исследований для разработки алгоритмов совместной эксплуатации разнотипных источников, учитывающих их взаимное влияние и качество электроэнергии морского судна в целом. Разработанные методы и алгоритмы направлены на постепенный переход к экологически чистой эксплуатации морских судов класса автоматизации А1, а в перспективе и к беспилотным судам неограниченного района плавания. Учитывая технологические особенности, а также удаленность автономных морских объектов от баз технического обслуживания их функционирование возможно обеспечить только на основе систем автоматического управления [5,6]. Для реализации автоматической системы управления электротехническим комплексом морского судна необходимо идентифицировать взаимосвязи между его элементами и составными частями и условия оптимальности процессов, имеющих место в составе управляемого комплекса системы [7].

В литературных источниках [1,2,4] содержится крайне мало информации об автономных электротехнических комплексах морских судов с точки зрения взаимного влияния источников электроэнергии и колебаний мощности. Практически невозможно познакомиться с результатами экспериментальных исследований о качестве электроэнергии на современных морских судах. Между тем, это очень важный вопрос для любой энергетической системы, а тем более автономного электротехнического комплекса, особенно в условиях работы Арктических территорий.

## Общие сведения и особенности работы устройства DECS-100

Рассмотрим функциональные возможности одного из современных устройств DECS-100 производства компании АВВ (рис. 1), которое обеспечивает управление генерирующим источником в локальной электрической системе.

DECS-100 имеет до четырех режимов функционирования, выбираемых с помощью программного обеспечения BESTCOMS. Режим автоматического регулятора напряжения и ручной режим являются стандартными свойствами. Реактивная мощность и коэффициент мощности являются опциями.

В режиме автоматического регулятора напряжения (AVR) DECS-100 регулирует среднеквадратическое выходное напряжение генератора. Он выполняет это, считывая выходное напряжение генератора и подстраивая выходной постоянный ток возбуждения для поддержания напряжения на заданном значении регулирования. Заданное значение регулирования настраивается с помощью контактных входов «Выше» и «Ниже», «Вспомогательного входа» или с помощью программного обеспечения BESTCOMS. Точка регулирования в определенных условиях может быть также изменена с помощью функции «Падение» или функции «Пониженная частота».

В ручном режиме, известном также как «Режим регулятора тока возбуждения» (FCR), DECS-100 поддерживает постоянный ток возбуждения на заданном уровне. Заданное значение уровня тока подстраивается от 0 до 7 А постоянного тока приращениями по 0,1 А постоянного тока с помощью контактных входов «Выше» и «Ниже», дополнительного «Вспомогательного входа» или с помощью программного обеспечения BESTCOMS. Уровень возбуждения ручного режима должен быть подсчитан до включения этого режима.

В режиме регулирования реактивной мощности DECS-100 поддерживает реактивную мощность генератора на заданном уровне при параллельном соединении с бесконечной шиной. DECS-100 вычисляет реактивную мощность генератора, используя значения считанного выходного напряжения и тока генератора. Затем он подстраивает постоянный ток возбуждения для поддержания реактивной мощности на заданном уровне. Регулирование реактивной мощности включается и выключается с помощью программного обеспечения BESTCOMS. Если программное обеспечение включено, то регулирование реактивной мощности включается и выключается с помощью цепи входного контакта «Регулирование реактивной мощности/коэффициента мощности» (52J/K). Заданное значение реактивной мощности подстраивается от 100-процентного поглощения до 100-процентной генерации с помощью контактных входов «Выше» и «Ниже», дополнительного «Вспомогательного входа» или с помощью программного обеспечения BESTCOMS.

В режиме регулирования коэффициента мощности DECS-100 поддерживает коэффициент мощности генератора на заданном уровне при параллельном соединении с бесконечной шиной. DECS-100 вычисляет коэффициент мощности генератора, используя значения считанного выходного напряжения и тока генератора. Затем он подстраивает постоянный ток возбуждения для поддержания коэффициента мощности на заданном уровне. Регулирование коэффициента мощности включается и выключается с помощью программного обеспечения BESTCOMS. Если программное обеспечение включено, то регулирование коэффициента мощности включается и выключается с помощью цепи входного контакта «Регулирование реактивной мощности/коэффициента мощности» (52J/K). Заданное значение коэффициента мощности подстраивается от 0,6 запаздывания до 0,6 опережения с помощью контактных входов «Выше» и «Ниже», дополнительного вспомогательного входа или с помощью программного обеспечения BESTCOMS.

DECS-100 имеет свойство компенсации реактивного падения для распределения реактивной нагрузки при параллельной работе генератора. Нагрузка генератора с запаздывающим коэффициентом мощности (индуктивная) уменьшает выходное напряжение генератора. Нагрузка генератора с опережающим коэффициентом мощности (емкостная) увеличивает выходное напряжение генератора. Падение регулируется до 10% при номинальном линейном токе фазы В (ток 1 ампер или 5 ампер, проходящий через клеммы СТ1 и СТ2) и коэффициенте мощности, равном 0,8. Свойство падения включается и выключается с помощью цепи входного контакта «Параллельная компенсация генератора» (клеммы 52L и 52M). Падение также выключается при работе в режимах регулирования реактивной мощности или коэффициента мощности.

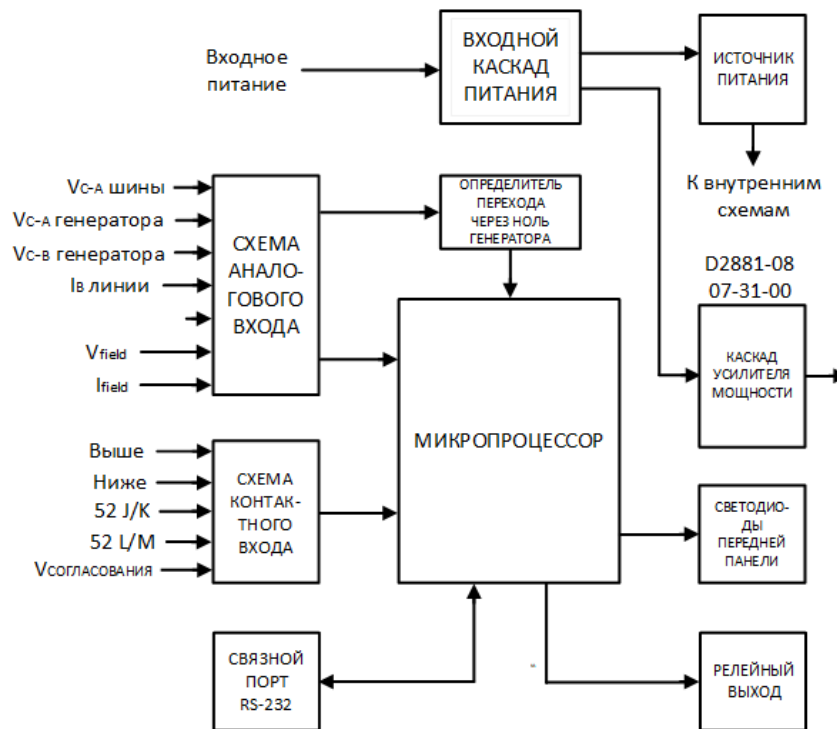


Рис. 1. Упрощенная блок-схема DECS-100

Если частота генератора падает ниже выбранного заданного значения частоты излома, то DECS-100 автоматически подстраивает заданное значение напряжения, чтобы напряжение генератора соответствовало выбранной зависимости в относительных единицах (PU – per unit) напряжения от частоты. Управление пониженной частоты выключается ниже 12 герц. С помощью программного обеспечения BESTCOMS частота излома настраивается в диапазоне от 40 до 65 герц с приращениями 0,1 герца, а PU-зависимость напряжения от частоты может быть выбрана с наклоном от 0 до 3 с приращениями 0,01. Наклон, равный 0, в действительности выключает функцию пониженной частоты. DECS-100 имеет минимальную точку регулирования равную примерно 30 процентам от номинального заданного значения.

Защита DECS-100 имеет три защитные функции: чрезмерное напряжение генератора, потеря считывания напряжения генератора и чрезмерное напряжение цепи возбуждения. Каждая защитная функция имеет соответствующий индикатор передней панели, который светится, если эта функция активна. Об активных защитных функциях также сообщается с помощью BESTCOMS.

Состояние чрезмерного напряжения генератора может конфигурироваться (в BESTCOMS) для замыкания релейного выхода DECS-100, отключения DECS-100, выполнения обоих действий или невыполнения никаких действий. Если считанное напряжение генератора превышает настраиваемое заданное значение уровня напряжения в течение настраиваемой временной задержки тревоги, то DECS-100 начинает выбранное действие. Если DECS-100 сконфигурирован для замыкания релейного выхода, то в состоянии чрезмерного напряжения генератора включится индикатор «Чрезмерное напряжение генератора» на передней панели и в BESTCOMS, и замкнется релейный выход на клеммах AL1 и AL2. Если DECS-100 сконфигурирован для отключения аппаратуры, то в состоянии чрезмерного напряжения регулятор DECS-100 выключится по истечении временной задержки тревоги. Светодиод «Чрезмерное напряжение генератора» будет светиться в течение пяти секунд, когда DECS-100 будет включен после отключения из-за чрезмерного напряжения генератора. Заданное значение уровня напряжения настраивается в диапазоне от 100 до 120% от установки напряжения системы. Временная задержка тревоги настраивается в диапазоне от 0 до 10 секунд.

Состояние чрезмерного напряжения цепи возбуждения может конфигурироваться (в BESTCOMS) для замыкания релейного выхода DECS-100, отключения DECS-100, выполнения обоих действий или невыполнения никаких действий. Если напряжение цепи возбуждения превышает настраиваемое заданное значение уровня напряжения в течение фиксированной 10-секундной

временной задержки, то DECS-100 начинает выбранное действие. Если DECS-100 сконфигурирован для замыкания релейного выхода, то в состоянии чрезмерного напряжения цепи возбуждения включится индикатор «Чрезмерное напряжение цепи возбуждения» на передней панели и в BESTCOMS и замкнется релейный выход на клеммах AL1 и AL2. Если DECS-100 сконфигурирован для отключения аппаратуры, то в состоянии чрезмерного напряжения цепи возбуждения DECS-100 выключится по истечении 10-секундной временной задержки. Светодиод «Чрезмерное напряжение цепи возбуждения» будет светиться в течение пяти секунд, когда DECS-100 будет включен после отключения из-за чрезмерного напряжения генератора. Заданное значение уровня напряжения настраивается в диапазоне от 0 до 250 В постоянного тока. Временная задержка при чрезмерном напряжении цепи возбуждения фиксирована на 10 секундах.

Ограничители DECS-100 состоят из ограничителя перевозбуждения (OEL), срабатывающего при увеличении тока цепи возбуждения и ограничителя недовозбуждения (UEL), срабатывающего при чрезмерной опережающей реактивной мощности.

DECS-100 имеет два типа ограничения перевозбуждения: суммирующей точки или замещения. Если уровень тока цепи возбуждения превышает настраиваемое заданное значение уровня тока, то включается индикатор «Ограничение перевозбуждения» на передней панели и в BESTCOMS. Если состояние перевозбуждения сохраняется в течение временной задержки тревоги, выбираемой пользователем, то замыкается релейный выход на клеммах AL1 и AL2. Преимущество OEL типа суммирующей точки заключается в том, что он может обеспечить плавный переход в режим ограничения и из режима ограничения. Его недостаток в том, что этот тип ограничения не управляет непосредственно током цепи возбуждения, а должен действовать через нормальный регулятор напряжения, и может быть подвержен влиянию изменений напряжения на клеммах. Если используется ограничение перевозбуждения в режиме замещения, то уровень тока цепи возбуждения, при котором происходит ограничение, определяется настраиваемым заданным значением уровня тока. Если уровень тока цепи возбуждения превышает настраиваемое заданное значение уровня тока, то включается индикатор «Ограничение перевозбуждения» на передней панели и в BESTCOMS, а ток цепи возбуждения ограничивается и форсируется в соответствии с кривой обратной зависимости от времени. Преимущество OEL типа замещения заключается в том, что он обеспечивает прямое управление током цепи возбудителя без зависимости от управляющего действия нормального регулятора напряжения. Его недостаток в том, что он не обеспечивает плавный переход в режим ограничения и из режима ограничения. Если включено отключение аппаратуры, то DECS-100 выключится по истечении временной задержки. Светодиод «Ограничение перевозбуждения» будет светиться в течение пяти секунд, когда DECS-100 будет включен после отключения из-за ограничения перевозбуждения. Заданное значение уровня тока настраивается в пределах от 0 до 15 А постоянного тока. Временная задержка тревоги устанавливается в диапазоне от 0 до 10 секунд.

Если уровень опережающей реактивной мощности увеличивается выше настраиваемого заданного значения уровня реактивной мощности, то включается индикатор «Ограничение недовозбуждения» на передней панели и в BESTCOMS. Если состояние недовозбуждения сохраняется в течение настраиваемой временной задержки тревоги, то замыкается релейный выход на клеммах AL1 и AL2. Если включено отключение аппаратуры, то DECS-100 выключится по истечении временной задержки. Светодиод «Ограничение недовозбуждения» будет светиться в течение пяти секунд, когда DECS-100 будет включен после отключения из-за ограничения недовозбуждения. Заданное значение уровня реактивной мощности настраивается в диапазоне от 0 до 100% от номинальной реактивной мощности. Временная задержка тревоги устанавливается в диапазоне от 0 до 10 секунд. Функция UEL активна только во время параллельной работы, когда разомкнут контактный вход 53J/K или контактный вход 53L/M.

DECS-100 также обладает свойством настраиваемого плавного запуска, которое управляет временем, в течение которого напряжение генератора или ток цепи возбуждения достигает заданного значения регулирования. Время нарастания с помощью BESTCOMS настраивается в диапазоне от 1 до 7200 секунд с 1-секундными приращениями. Свойство пониженной частоты также активно во время плавного запуска и пользуется приоритетом в управлении напряжением генератора, чтобы минимизировать возможность выхода напряжения за установленные пределы.

Согласование напряжения полезно, когда отношения РТ в точности не согласуются. Использование BESTCOMS для ввода отношения РТ генератора и отношения РТ шины автоматически компенсирует смещение. Опция согласования напряжения в DECS-100 автоматически согласует среднеквадратический выход генератора со среднеквадратическим напряжением шины до синхронизации. DECS-100 сравнивает и согласовывает напряжение генератора с напряжением шины, регулируя постоянный ток возбуждения. Согласование напряжения включено, если напряжение шины находится в пределах 10% от выбранного номинального диапазона считывания. Пока значения напряжения генератора и напряжения шины (поданного на входы считывания напряжения DECS-100) находятся в допустимом диапазоне, согласование напряжения может быть достигнуто. Скорость, с которой DECS-100 согласовывает выходной уровень генератора с входным уровнем шины, управляется настройкой скорости согласования напряжения. Эта настройка находится в пределах от 1 до 300 секунд с приращениями, равными 0,01 секунды. Согласование напряжения может быть выключено контактными входами DECS-100. С помощью BESTCOMS можно конфигурировать контактный вход 52J/K, контактный вход 52L/M или оба контактных входа для включения и выключения согласования напряжения. Для включения согласования напряжения шины выберите 52J/K. Это позволит оставить активным свойство падения. При замыкании сетевого выключателя согласование напряжения будет автоматически выключено (через контактный вход 52J/K), а регулирование реактивной мощности/коэффициента мощности будет включено. Доступны два режима согласования напряжения: поддержки и возврата. При реализации режима поддержки заданное значение DECS-100 поддерживается на уровне напряжения шины даже при размыкании прерывателя генератора или сети. При реализации режима возврата заданное значение DECS-100 возвращается к своему исходному уровню при размыкании прерывателя генератора или сети. Возврат является режимом согласования напряжения, принятым по умолчанию.

### **Результаты исследования и обсуждение**

Потребители электрической энергии в составе электротехнических комплексов морских судов можно разделить на устанавливаемые повсеместно и зависящие от технологических и конструктивных особенностей. Однако, все они требуют обеспечения высокого качества питающей их электрической энергии. Основными источниками электрической энергии в автономных электротехнических комплексах принято считать дизель-генераторные агрегаты. Вместе с тем стало актуальным применение солнечных электрогенерирующих мощностей и аккумуляторных батарей большой емкости.

Исследования, проведенные в электротехнических комплексах морских судов [7,8], выявили существование низкочастотных колебаний мощности. Так на полученных осциллограммах в одних случаях (рис. 2) зафиксированы обменные колебания, а в других случаях (рис. 3) - синфазные колебания мощности [7,8]. Существование обменных и синфазных колебаний мощности снижает коэффициенты полезного действия генераторных агрегатов и электроприводов, уменьшает их межремонтный интервал, снижает надежность автономных объектов и может спровоцировать аварийные ситуации.

Система автоматического управления генератором DECS-100 не содержит функции, устраняющие обменные и синфазные колебания мощности генератора в различных режимах работы. Проведенное математическое моделирование показало, что причинами обменных колебаний мощности являются зазоры люфта в регуляторах частоты вращения, а синфазных колебаний мощности асимметрия в настройках коэффициентов передачи этих регуляторов.

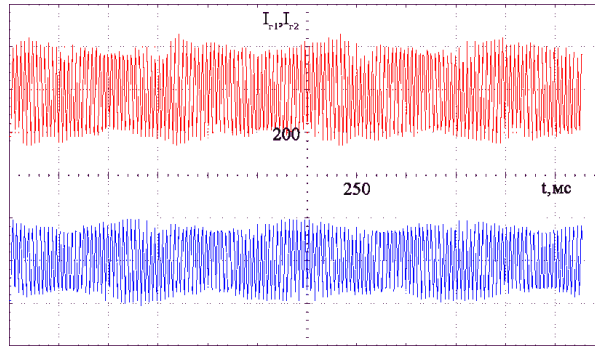


Рис. 2. Токи генераторов с обменными колебаниями

Карта зависимости амплитуды колебаний мощности от значений коэффициента усиления регулятора частоты (рис. 4), построенная по результатам математического моделирования для электротехнического комплекса судна, в котором получены осциллограммы обменных и синфазных колебаний мощности (рис. 2 и 3), показывает, что, управляя значениями

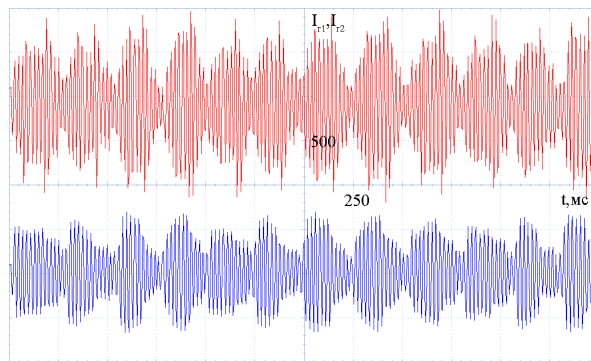


Рис. 3. Токи генераторов с синфазными колебаниями

коэффициентов передачи регуляторов частоты, можно избавиться от колебаний мощности. Для этого необходимо поддерживать симметрию настроек регуляторов, а в случае обнаружения обменных колебаний мощности уменьшать коэффициенты передачи с некоторым шагом до достижения требуемых показателей. Основными величинами, которые необходимо контролировать, являются токи источников электроэнергии с точки зрения поддержания

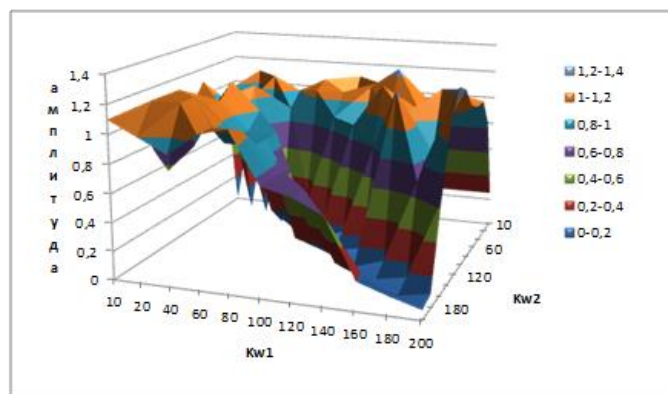


Рис. 4. Карта зависимости амплитуды колебаний мощности от значений коэффициента усиления регулятора частоты

постоянства идеальности синусоидальности их формы. Таким образом, в система автоматического управления генераторами необходимо ввести дополнительную функцию по обеспечению стабильности работы судовой электростанции в смысле отсутствия обменных и синфазных колебаний мощ-

ности. Алгоритм работы такой функции разработан и опробован на математической модели, по результатам исследований запатентована программа Restriction (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 201761332).

Для интегрирования солнечных электрогенерирующих мощностей и аккумуляторных батарей большой емкости источников электроэнергии в судовую электростанцию обосновано применение шестипульсных или двенадцатипульсных диодных выпрямителей (рис. 5) и последующего инвертирования полученного постоянного напряжения в переменное.

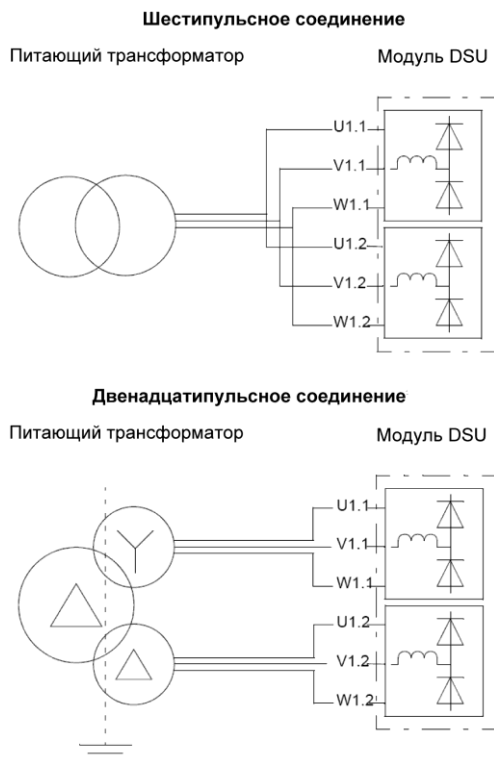


Рис. 5. Схемы шести- и двенадцатипульсного соединения

Использование таких методов и средств позволяет поставлять дополнительную мощность в судовую сеть, причем с практически идеальными синусоидальными параметрами, которые не зависят от обменных (рис. 2) и синфазных (рис. 3) колебаний мощности между дизель-генераторными установками. Более того, такие дополнительные источники позволяют их частично компенсировать.

На многих судах установлены грузовые краны и лебедки, электроприводы которых в режиме спуска груза рекуперировать электрическую энергию. Аналогично, на судах, осуществляющих укладку трубопроводов и кабелей, используются режимы компенсации качки в электроприводах подачи труб, когда во время работы в течение каждого второго из полупериодов также выделяется электроэнергия. Для предотвращения перехода дизель-генераторов в режим обратной мощности такая электроэнергия зачастую рассеивается на нагревательных элементах, но если мощность большая, то сделать это невозможно. В случае же наличия на судне аккумуляторных батарей значительной мощности рекуперированная электроэнергия используется для их зарядки. Далее напряжение с выводов аккумуляторных батарей через инверторы поступает в судовую сеть. Такое их использование позволяет восполнить дефицит электроэнергии, возникающий в переходных режимах, так как для запуска дополнительных дизель-генераторов необходимо время. Также, с помощью электроэнергии аккумуляторных батарей возможна частичная компенсация колебаний мощности.

## Заключение

Таким образом, экспериментально обнаружены новые факторы, влияющие на качество электроэнергии в автономных электротехнических комплексах морских судов, выявлены их причины и предложены методы и средства совершенствования систем автоматического управления генераторов судовой электростанции для устранения колебаний мощности в квазиустановившихся режимах

работы. Добавление функции устранения обменных и синфазных колебаний мощности в системы автоматического управления судовыми дизель-генераторными установками предусматривает адаптивное изменение настроек регуляторов частоты для обеспечения постоянства характеристик синусоидальности напряжения. Также целесообразно применение в составе электростанций морских судов аккумуляторных батарей большой мощности, солнечных генерирующих элементов, выпрямительных и инверторных преобразователей.

## 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. 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.
3. 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.
4. Martinez, M.S., Nozik, A.J., Beard, M.C. Theoretical limits of multiple exciton generation and singlet fission tandem devices for solar water splitting. Journal of Chemical Physics. 2019;151(11),114111.
5. Banin U., Waiskopf N., Hammarström L., Batista V.S., Brudvig G.W. Nanotechnology for catalysis and solar energy conversion. Nanotechnology. 2020;32(4),042003.
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. Савенко А.Е., Голубев А.Н. Обменные колебания мощности в судовых электротехнических комплексах /Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина. – Иваново, 2016. – 172 с.
8. Савенко А.Е., Савенко П.С. Использование и совершенствование автоматических систем для управления рассредоточенными источниками электроэнергии в локальных электрических системах. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022;24(4):105-115.

## IMPROVEMENT OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS FOR GENERATORS IN ELECTRICAL POWER SYSTEMS OF MARINE VESSELS

<sup>1</sup>Shabalin Leonid Dmitriyevich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor

<sup>2</sup>Savenko Aleksandr Yevgen'yevich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor

<sup>3</sup>Savenko Pavel Stanislavovich, Postgraduate student

<sup>1</sup>Kalininsrad State Technical University, Kaliningrad, Russia, e-mail: shabalin44@mail.ru

<sup>2,3</sup>Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Crimea Republic, Russia, e-mail: savenko-70@mail.ru

*The use of automatic systems for the control of diesel generator sets on sea vessels is considered. The possibilities of expanding the functions of such automatic systems to improve the quality of electricity have been studied. Experimental studies in the local electrical system revealed the existence of power exchange and common-mode oscillations. Using mathematical modeling methods, it was established that such power oscillations can be eliminated by adaptively changing the frequency controller settings. The expediency of using rechargeable batteries, rectifier and inverter converters as part of a ship power plant is substantiated.*



## СЕКЦИЯ «СТАЦИОНАРНЫЕ И ТРАНСПОРТНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ»

### SECTION "STATIONARY AND TRANSPORT POWER PLANTS"

УДК 536.22

#### ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОНЕНТОВ ОРГАНИЧЕСКИХ ЭНЕРГОНОСИТЕЛЕЙ: АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ. ЦИКЛОАЛКАНЫ

<sup>1</sup>Беркова Елена Анатольевна, ст. преподаватель

<sup>2</sup>Александров Игорь Станиславович, д-р техн. наук, доцент

<sup>3</sup>Плавич Андрей Юрьевич, канд. техн. наук, доцент

ФГБОУ ВО «КГТУ», Калининград, Россия, e-mail: <sup>1</sup>elena.berkova@klgtu.ru;

<sup>2</sup>igor.aleksandrov@klgtu.ru; <sup>3</sup>andrey.plavich@klgtu.ru

*Выполнен критический анализ экспериментальной исследованности термодинамических свойств технически важных компонентов органических энергоносителей – циклоалканов. Обзор и оценка полноты экспериментального исследования в различных областях параметров состояния выполнялась для двух веществ – этилциклогексан и пропилциклогексан. Основными критериями оценки были: погрешность экспериментального определения свойств, метод измерения и чистота исследуемого образца. Анализировалась информация о термодинамических свойствах отечественных и зарубежных авторов, полученная как в прошлом веке, так и в последние годы. На основе проведенного анализа делается вывод о том, что имеется массив опорных данных для разработки фундаментальных уравнений состояния. Указанный массив рекомендуется дополнить данными молекулярного моделирования, а также расчетными данными для повышения устойчивости разрабатываемых уравнений и расширения диапазона их применимости.*

Нафтеносодержащие углеводороды (циклоалканы) преобладают в углеводородном составе большинства нефтей и газовых конденсатов. Они являются компонентами суррогатных топлив, а также используются в качестве сырья или реагентов в различных процессах нефтяной и нефтехимической промышленности. То есть, они относятся к интересным, с промышленной точки зрения веществам, для которых нужна надежная и непротиворечивая информация о термодинамических свойствах в широком интервале параметров. Удобной компактной формой хранения информации о термодинамических свойствах веществ в аналитическом виде является уравнение состояния. Наличие надежного уравнения состояния позволяет оперативно выполнять расчеты, а также проводить моделирование свойств смесей, в которые рассматриваемое вещество входит как компонент. Для одного из представителей рассматриваемой группы веществ, циклогексана, имеется надежное уравнение состояния зарубежных ученых [1]. Однако для производных циклогексана – этилциклогексана и пропилциклогексана надежные уравнения состояния отсутствуют.

Для разработки точного уравнения состояния, обладающего хорошими экстраполяционными возможностями необходимо наличие надежных экспериментальных данных о термодинамических свойствах в широком диапазоне параметров состояния. В данной работе проведен анализ базы об экспериментальных данных для некоторых технически важных циклоалканов, а также проведен расчет по некоторым свойствам для восполнения недостатка экспериментального исследования. Результаты проведенного анализа будут использованы для разработки надежных уравнений состояния указанных веществ с последующей реализацией в виде таблиц стандартных справочных данных о термодинамических свойствах.

**Термические свойства.** Плотность этилциклогексана, в основном, исследована в области жидкой фазы. Подробные исследования проводились в работе Гусейнова [2]. Измерения выполнялись в жидкой фазе методом гидростатического взвешивания с погрешностью 0,1%. В работе [2] измерения проводились в диапазоне температур 293-523 К при давлениях до 50 МПа. Исследования зарубежных авторов [3] выполнены в узком диапазоне температур при давлениях, не превышающих 10 МПа. Для газовой фазы этилциклогексана имеются лишь расчетные данные, полученные по методике зарубежных авторов [4]. Данные в критической области также получены расчетным путем с использованием кроссоверного уравнения состояния по [5, 6].

Для пропициклогексана  $P, V, T$ -зависимость исследована только в жидкой фазе. В работе Лаесека [7] приводятся значения плотности в диапазоне параметров 270-470 К и 0,1-40 МПа. Чистота исследуемого образца составляла 96,68%. Погрешность измерения составляла 0,07-0,14 %. Расчетные данные по [8] для плотности пропициклогексана в жидкой фазе приводятся в узком диапазоне параметров 323-383 К и 30 МПа.

**Термодинамические свойства на линии равновесия «жидкость-газ».** Измерения давления насыщенных паров рассматриваемых веществ выполнялись зарубежными авторами по различным методикам. Для этилциклогексана в литературе имеются данные Виллинхэма [9], в которых температурный диапазон исследования составляет 324-405 К. Исследования Мокбела [10] охватывают более широкий диапазон температур 215-427 К. Погрешность эксперимента в [10] заявлена авторами в 0,2 % при давлениях выше 1 кПа и 1,0 % при более низких давлениях. Чистота исследуемого образца составляла 98 %. В работе Ахитана [11] давление насыщенных паров этилциклогексана приводится в диапазоне температур 303-393 К. Чистота исследуемого образца по данным авторов [11] составляла 99 %. Кроме этого, для давления насыщенных паров этилциклогексана имеются расчетные данные [5, 6].

Плотность насыщенной жидкости этилциклогексана исследована рядом зарубежных авторов в относительно узком диапазоне [12, 14, 15]. Имеются пробелы в данных в окрестности тройной точки. Исключение составляют данные Янина [13], являющиеся наиболее широкодиапазонными. Также имеются расчетные данные плотности насыщенной жидкой фазы этилциклогексана, полученные по методике [15].

Теплоемкость этилциклогексана на линии насыщения исследована в работе Янина [13]. Измерения проводились в диапазоне температур 293-473 К. В работе Герасимова [18] расчетным путем получены значения теплоемкости на линии насыщения в диапазоне температур 480-590 К.

Давление насыщенных паров пропициклогексана, помимо [9, 10], исследовалось в работе Форциатти [16]. В более широком диапазоне указанное свойство исследовано в работе Мокбела [10]. В [10] нижний предел исследования по температуре составил 233 К, верхний предел – 452 К. Погрешность измерения автор оценивает в 0,2 % при давлениях свыше 1 кПа и 1,0 % при более низких давлениях. Чистота исследуемого образца пропициклогексана составляла 98 %.

Исследования плотности насыщенной жидкости пропициклогексана выполнены зарубежными авторами [12, 17]. Эти данные немногочисленны. Для исследуемого вещества наблюдается недостаток экспериментальных данных вблизи тройной точки. Наиболее широкодиапазонными являются данные Прака [17].

Теплоемкость пропициклогексана на линии насыщения исследована в работе Финка [21]. Исследования проводились калориметрическим методом. Погрешность измерения в данной работе составляла ~ 0,4%.

**Калорические свойства.** Изобарная теплоёмкость этилциклогексана исследовалась только при атмосферном давлении. Исследования проводились калориметрическим методом в работах Хуфмана [19] и Паркса [20]. Погрешность измерения в данных работах составляла ~ 0,4 %. В работах [5, 6] приводятся значения изобарной теплоемкости этилциклогексана, полученные по уравнениям состояния, разработанным в рамках флуктуационного подхода.

**Скорость звука.** Экспериментальные исследования ультразвука этилциклогексана и пропициклогексана выполнены при атмосферном давлении в узком диапазоне температур. В работе Прака [17] приводятся данные для скорости звука этилциклогексана в диапазоне температур 293-333 К. Скорость звука пропициклогексана исследована в работе Лаесека [7] в диапазоне температур 278-343 К. В таблице 1 представлен перечень экспериментальных исследований термодинамических свойств этилциклогексана и пропициклогексана.

Наряду с экспериментальными и «псевдоэкспериментальными» (расчетными) данными имеется перспектива использования данных молекулярного моделирования. Применение «*ab initio*» методов имеет строгую теоретическую основу, а включение данных моделирования в гибридный массив данных для разработки уравнения способствует дополнительному контролю и оценке качества получаемой расчётной модели.

Таблица 1

**Экспериментальные данные о термодинамических свойствах этил- и пропилциклогексана**

Год	Авторы, источник	Число точек	Диапазон исследования	
			T, К	p, МПа
<b>Этилциклогексан</b>				
<b>Плотность</b>				
1983	Гусейнов [2]	84	293-523	0,1-50
1989	Восс [3]	24	327-440	0,4-9,7
2020	Расчет по [4]	125	530-700	0,4-4,2
2020	Расчет по [5,6]	139	610-670	2,6-8,2
<b>Давление насыщенных паров</b>				
1945	Виллинхэм [9]	20	324-405	
1995	Мокбел [10]	22	215-427	
2018	Ахитаан [11]	10	303-393	
2020	Расчет по [5,6]	36	240-600	
<b>Плотность насыщенной жидкости</b>				
1944	Гарет [12]	8	273-310	
1977	Янин [13]	19	293-473	
1991	Францескони [14]	10	291-305	
2020	Расчет по [15]	49	165-608	
<b>Теплоемкость насыщенной жидкой фазы <math>C_s</math></b>				
1977	Янин [13]	19	293-473	
2020	Расчет по [18]	12	480-590	
<b>Изобарная теплоёмкость <math>C_p</math></b>				
1949	Хуфман [19]	102	12-310	0,101
1949	Паркс [20]	23	80-300	0,101
2020	Расчет по [5,6]	137	610-670	2,6-8,2
<b>Скорость звука</b>				
2018	Прак [17]	5	293-333	0,101
<b>Пропилциклогексан</b>				
<b>P,V,T – данные</b>				
2008	Лаесек [7]	162	270-470	0,1-40
2000	Френкель [8]	4	323-383	30
<b>Давление насыщенных паров</b>				
1945	Виллинхэм [9]	20	345-430	
1949	Форциатти [16]	20	346-431	
1995	Мокбел [10]	24	233-452	
<b>Плотность насыщенной жидкости</b>				
1944	Гарет [12]	8	280-310	
2018	Прак [17]	8	293-363	
<b>Теплоемкость насыщенной жидкой фазы <math>C_s</math></b>				
1965	Финк [21]	47	188-380	
<b>Скорость звука</b>				
2008	Лаесек [7]	8	278-343	0,101

Касательно рассматриваемых в данной работе веществ этот подход может оказаться весьма эффективным. Молекулы этилциклогексана и пропилциклогексана имеют достаточно компактную форму, что позволяет сократить число рассматриваемых степеней свободы молекулы с целью упрощения формы потенциала межмолекулярного взаимодействия. Например, такой подход реализован в научном программном обеспечении ms2 [22]. Тем не менее, получение данных молекулярного моделирования, имеющих достаточную точность для использования в разработке уравнения состояния, возможно на основе оптимизированных потенциалов. В свою очередь, оптимизация парамет-

ров потенциала требует минимального наличия прецизионных экспериментальных данных на линии насыщения. Таким образом, в случае применения методов молекулярной динамики к веществам со сложными молекулами первичность натурального теплофизического эксперимента выходит на передний план. Однако применение молекулярного моделирования во многих случаях позволяет снизить затраты на проведение реального эксперимента, а также безопасно изучать поведение ядовитых или взрывоопасных веществ. Применительно к рассматриваемым веществам для получения надежных данных из молекулярного моделирования достаточно учесть парные взаимодействия потенциала Леннарда-Джонса и кулоновские взаимодействия. Учет дипольных и квадрупольных взаимодействий представляется малоэффективным, учитывая особенности строения молекул исследуемых веществ.

Разработка уравнений состояния для рассматриваемых здесь веществ предполагается в виде зависимости термодинамического потенциала от его собственных переменных. В нашем случае в качестве термодинамического потенциала принимается безразмерная свободная энергия

$$\frac{a(T,\rho)}{RT} = \frac{a^0(T,\rho)+a^r(T,\rho)}{RT} = \alpha^0(\tau, \delta) + \alpha^r(\tau, \delta), \quad (1)$$

где  $a(T,\rho)$  – свободная энергия;  $\alpha^0(\tau,\delta)$  – вклад, описывающий идеально-газовые состояния;  $\alpha^r(\tau,\delta)$  – избыточная часть, описывающая свойства реального флюида;  $\delta = \rho/\rho_r$ ;  $\tau = T_r/T$ ;  $\rho_r, T_r$  – параметры приведения для плотности и температуры.

Параметрами приведения, как правило, выступают критические параметры вещества. В данной работе оценка критических параметров не производилась. Однако правильный выбор надежных значений критических свойств весьма важен при разработке уравнения состояния. От этого зависит, насколько близко будет приближение термодинамической поверхности, описываемой уравнением, к реальной поверхности состояния. Поэтому оценка критических параметров будет произведена на этапе разработки уравнения состояния соответствующего вещества. В процессе оптимизационной процедуры критические параметры могут уточняться по экспериментальным данным, что позволит более эффективно реализовать расширенный принцип соответственных состояний.

Оптимизация формы избыточной части  $\alpha^r(\tau,\delta)$  будет производиться на основе массива экспериментальных данных для соответствующего вещества. Для расчета первого слагаемого формулы (1) используется соотношение

$$\alpha^0(\tau, \delta) = \frac{h_0^0\tau}{RT_c} - \frac{s_0^0}{R} - 1 + \ln \frac{\delta\tau_0}{\delta_0\tau} - \frac{\tau}{R} \int_{\tau_0}^{\tau} \frac{c_p^0}{\tau^2} d\tau + \frac{1}{R} \int_{\tau_0}^{\tau} \frac{c_p^0}{\tau} d\tau, \quad (2)$$

где  $\delta_0 = \rho_0/\rho_c$ ;  $\tau_0 = T_c/T_0$  – приведенные идеально-газовые плотность и температура при  $p_0 = 101325$  Па и температуре  $T_0 = 298,15$  К;  $h_0^0$  – идеально-газовая энтальпия в опорной точке;  $s_0^0$  – идеально-газовая энтропия в опорной точке.

За начало отсчета термодинамических потенциалов в формуле (2) принято состояние насыщенной жидкой фазы при температуре  $T_0 = 298,15$  К, тогда  $h_0 = 0$  кДж/кг,  $s_0 = 0$  кДж/(кг·К).

Исходя из соотношений (1) и (2) видно, что для расчета калорических свойств (теплоёмкость, скорость звука и т.д.) необходима зависимость для расчета теплоёмкости идеального газа. Для построения таких зависимостей, как правило, применяются строго теоретические методы. Для этого получают спектроскопические данные с выделением важные вращательных и колебательных частот в спектре молекулы. Однако чаще всего на практике применяют обработку экспериментальных данных об изобарной теплоемкости на линии насыщения в низкотемпературной области. При отсутствии экспериментальных данных возможно применение аддитивных методов, использующих информацию о структуре молекулы. В данной работе предлагается эмпирическая зависимость полиномиального вида

$$C_p^0 = \sum_{-3}^3 c_i \left(\frac{T}{100}\right)^i, \text{ кДж/(кг·К)}. \quad (3)$$

Значения коэффициентов  $c_i$  для этилциклогексана, полученные в данной работе, представлены в таблице 2. Коэффициенты уравнения (3) получены аппроксимацией данных Хуфмана [19],

полученных в области низких температур вплоть до ~12 К. Уравнение (3), имея самостоятельную ценность, может применяться в составе индивидуальных или обобщенных уравнений состояния для расчета калорических свойств. Экстраполяция уравнения (3) возможна до температур 700-800 К.

Таблица 2

### Значения коэффициентов в уравнении (3)

<i>i</i>	<i>c<sub>i</sub></i>
-3	-3,65507
-2	6,360016
-1	-3,177397
0	0,08161365
1	0,724008
2	-0,04012927
3	0,0006777739

**Заключение.** Выполненный анализ показал наличие достаточно надежных данных о термических свойствах этил- и пропилциклогексана, которые смогут составить опорный массив данных при разработке фундаментальных уравнений состояния. Однако калорические свойства рассматриваемых веществ исследованы недостаточно полно, особенно для пропилциклогексана. Для восполнения недостатка данных в критической и сверхкритической областях для этилциклогексана выполнен расчет термодинамических свойств по теоретически обоснованным прогнозным методикам. Аналогичные расчеты планируется выполнить для пропилциклогексана. Расчетные данные необходимы для повышения устойчивости разрабатываемых уравнений и расширения диапазона их применимости. Для расчета калорических свойств и возможности их включения в процесс разработки уравнения состояния предложена эмпирическая зависимость для вычисления идеально-газовой теплоемкости этилциклогексана.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhou Y., Penoncello S.G., Lemmon E.W. An Equation of State for the Thermodynamic Properties of Cyclohexane // *J. Phys. Chem. Ref. Data.* – 2014. – Vol. 43, № 4. – P. 043105-1 - 043105-19.
2. Guseinov S.O., Shakhverdiev A.N., Naziev Y.M. // *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Neft Gaz* – 1983. – Vol. 26. – P. 50-52.
3. Voss S.F., Sloan E.D. Thermal conductivity and heat capacity of synthetic fuel components // *Int. J. Thermophys.* – 1989. – Vol. 10. – P. 1029-1040.
4. Lee B.I., Kesler M.G. A generalized thermodynamic correlation based on three-parameter corresponding states // *AIChE Journal.* – 1975. – V.21, No.3. – P.510-527.
5. Герасимов А.А., Григорьев Б.А. Обобщенное кроссоверное уравнение состояния в широкой окрестности критической точки // *ТВТ.* – 1993. – Т. 31, № 2. – С. 25.
6. Герасимов А.А. Новое обобщенное кроссоверное уравнение состояния в широкой окрестности критической точки // *Известия КГТУ.* – 2003. – № 3. – С. 30-37.
7. Laesecke A., Outcalt S.L., Brumback K.J. Density and speed of sound measurements of methyl- and propylcyclohexane // *Energy Fuels.* – 2008. – Vol. 22. – P. 2629-2636.
8. Frenkel, M. NIST Standard Reference Database 103b: Thermo-Data Engine (TDE), Version 3.0 / M. Frenkel, R.D. Chirico, V. Diky, et. al. // National Institute of Standards and Technology, Standard Reference Data Program: Gaithersburg, 2000.
9. Vapor pressures and boiling points of some paraffin, alkylcyclopentane, alkylcyclohexane, and alkylbenzene hydrocarbons / C.B. Willingham, W.J. Taylor, J.M. Pignocco, F.D. Rossini // *J. Res. Natl. Bur. Stand.* – 1945. – Vol.35. – P. 219 – 244.
10. Vapor pressures of 12 alkylcyclohexanes, cyclopentane, butylcyclopentane and trans-decahydronaphthalene down to 0.5 Pa. Experimental results, correlation and prediction by an equation of state / I. Mokbel, E. Rauzy, H. Loiseleur, C. Berro, J. Jose // *Fluid Phase Equilib.* – 1995. – Vol. 108. – P. 103-120.
11. Ahitan S., Shaw J.M., John M. Bubble Pressure Measurement and Prediction for n-Hexadecane and n-Eicosane + Cyclohexane, Methylcyclohexane, and Ethylcyclohexane Binary Mixtures from 303.15 to 393.15 K // *J. Chem. Eng. Data.* – 2018. – Vol. 63. – P. 1797-1809.

12. Garrett A.B. Scientific report / A.B. Garrett; Ohio State Univ. // Am. Pet. Inst. Res. Proj. – 1944. – Vol. 45.
13. Янин Г.С. Экспериментальное исследование изобарной теплоемкости органических жидкостей и их смесей: Автореф. дис. на соискание канд. техн. наук. – Грозный: ГНИ, 1977. – 24 с.
14. Francesconi R., Comelli F. Excess enthalpies of binary mixtures containing 1,3-dioxolane and cyclic compounds // Thermochim. Acta. – 1991. – Vol. 179. – P. 149-155.
15. Жидкие углеводороды и нефтепродукты / Под ред. М.И. Шахпоронова, Л.П. Филиппова. – М.: Изд-во МГУ, 1989. – 192 с.
16. Forziati A.F., Norris W.R., Rossini F.D. Vapor pressures and boiling points of sixty API-NBS hydrocarbons // J. Res. Natl. Bur. Stand. – 1949. – Vol. 43. – P. 555 – 563.
17. Densities, Speeds of Sound, and Viscosities of Binary Mixtures of an n-Alkylcyclohexane (n-Propyl-, n-Pentyl-, n-Hexyl-, n-Heptyl-, n-Octyl-, n-Nonyl-, n-Decyl-, and n-Dodecyl-) with n-Hexadecane / D.J.L. Prak, B.H. Morrow, S. Maskey, J.A. Harrison, J.S. Cowart, P.C. Trulove // J. Chem. Eng. Data. – 2018. – Vol. 63. – P. 4632-4648.
18. Герасимов А.А., Григорьев Б.А., Кузнецов М.А. Новые обобщенные уравнения для расчета изобарной теплоемкости углеводородов на линии насыщения // ТВТ. – 2001. – Т.39, №3. – С. 426-433.
19. Huffman H. M., Todd S. S., Oliver G. D. Low Temperature Thermal Data on Eight C<sub>8</sub>H<sub>16</sub> Alkylcyclohexanes // J. Am. Chem. Soc. – 1949. – Vol. 71. – P. 584-592.
20. Thermal Data on Organic Compounds. XXV. Some Heat Capacity, Entropy and Free Energy Data for Nine Hydrocarbons of High Molecular Weight / G.S. Parks, G.E. Moore, M.L. Renquist, B.F. Naylor, L.A. McClaine, P.S. Fujii, J.A. Hatton // J. Am. Chem. Soc. – 1949. – Vol. 71. – P. 3386-3389.
21. Finke H. L., Messerly J. F., Todd S. S. Thermodynamic Properties of n-Propyl-, n-Butyl-, and n-Decyl-Substituted Cyclohexane from 10 to 370 K // J. Phys. Chem. – 1965. – Vol. 69. – P. 2094-2100.
22. ms2: A molecular simulation tool for thermodynamic properties / S. Deublein, B. Eckl, J. Stoll, S. V. Lishchuk, G. Guevara-Carrion, C. W. Glass, T. Merker, M. Bernreuther, H. Hasse, J. Vrabec // Computer Physics Communications. – 2011. – V. 182. – P. 2350–2367.

## **THERMODYNAMIC PROPERTIES OF ORGANIC ENERGY CARRIERS COMPONENTS: ANALYSIS OF EXPERIMENTAL DATA FOR THE DEVELOPMENT OF EQUATIONS OF STATE. CYCLOALKANES**

<sup>1</sup>Berkova Elena Anatol'yevna, Senior Lecturer

<sup>2</sup>Alexandrov Igor Stanislavovich, Ph.D., associate professor

<sup>3</sup>Plavich Andrey Yur'yevich, Ph.D., associate professor

<sup>1,2,3</sup>Kalininsrad State Technical University, Kaliningrad, Russia, e-mail: <sup>1</sup>elena.berkova@klgtu.ru;

<sup>2</sup>igor.aleksandrov@klgtu.ru; <sup>3</sup>andrey.plavich@klgtu.ru

*The report contains a critical analysis of the experimental investigation of the thermodynamic properties of technically important components of organic energy carriers - cycloalkanes. A review and assessment of the completeness of the experimental study in various areas of state parameters was carried out for two substances - ethylcyclohexane and propylcyclohexane. The main evaluation criteria were: the error of the experimental determination of properties, the method of measurement and the purity of the test sample. The analysis involved data on the thermodynamic properties of domestic and foreign authors, performed both in the last century and in recent years. Based on the analysis, it is concluded that there is an array of reference data for the development of fundamental equations of state. It is recommended to supplement this array with molecular modeling data, as well as calculated data to increase the stability of the developed equations and expand the range of their applicability.*

# ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЦИЛИНДРОВЫХ ВТУЛОК СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННЫМИ ПОДВИЖНЫМИ ГАЗОВЫМИ НАГРУЗКАМИ С УЧЁТОМ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ТОЛЩИНЫ СТЕНКИ ВДОЛЬ ОБРАЗУЮЩЕЙ

<sup>1</sup>Бураковская Марина Васильевна, канд. техн. наук, доцент

<sup>2</sup>Ковальчук Леонид Игнатьевич, д-р техн. наук, профессор

<sup>3</sup>Яворский Игорь Маркович, студент

<sup>1,2,3</sup>Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ»,

Калининград, Россия, e-mail: <sup>1</sup>bgarf1988@inbox.ru; <sup>2</sup>bgarf1988@inbox.ru;

<sup>3</sup>igor0909hp@gmail.com

*Представлена разработанная авторами аналитическая модель для расчёта цилиндрических втулок судовых дизелей под действием переменных подвижных газовых нагрузок с возможностью учёта изменения толщины стенки втулки вдоль её образующей. Выполнено сопоставление с результатами расчёта численными методами. Показана целесообразность разработки и применения аналитических моделей при расчёте деталей судовых дизелей.*

## 1. Введение

Цилиндрические втулки судовых дизелей относятся к числу наиболее нагруженных деталей, подверженных действию высоких температур и механических нагрузок. Поэтому для обеспечения надёжности цилиндрических втулок, а также дизелей в целом, необходимо в процессе конструирования располагать расчётными методиками, позволяющими выполнять оценку напряженно-деформированного состояния этих деталей. В частности, при конструировании форсированных четырёхтактных дизелей в ряде случаев за счёт использования дополнительных опор-уплотнителей предотвращается охлаждение нижней части втулки, при этом полость охлаждения ограничивается на верхней части втулки [1]. Это способствует уменьшению тепловых напряжений, а также улучшению эксплуатационных показателей двигателя, однако для обеспечения надёжной работы рассматриваемого узла при его проектировании необходимо расчётным путем оценивать взаимодействие втулки с опорой-уплотнителем. Для исследования напряженно-деформированного состояния цилиндрических втулок могут быть использованы различные подходы, в частности весьма широко применяются численные методы расчёта. Наряду с этим, в [2] рассмотрен вопрос об оптимальном выборе места установки опоры-уплотнителя с использованием аналитических решений, построенных согласно [3]. При этом в работе [2] считалось, что толщина стенки цилиндрической втулки остаётся постоянной по всей её высоте. Однако в ряде случаев эта толщина оказывается переменной, поэтому необходима разработка расчётной методики, позволяющей учитывать это обстоятельство, чему и посвящена данная статья.

## 2. Методы исследования

В настоящей статье для построения аналитического решения используются методы строительной механики корабля, в частности теория изгиба балок, лежащих на сплошном упругом основании. Также использованы численные методы расчёта для сопоставления с результатами, полученными на основании разработанной методики. В [3] показана возможность применения этой теории для расчёта оболочек, применительно к цилиндрическим втулкам она использована авторами в [2], однако толщина стенки втулки принималась постоянной вдоль её образующей.

В настоящей статье рассмотрен более общий случай, когда толщина стенки цилиндрической втулки меняется по её высоте, а именно происходит ступенчатое изменение толщины стенки (рис.

1). На рисунке обозначено:  $L'$  – полная высота втулки;  $l'_в$  – высота верхней части втулки с учётом верхнего посадочного пояса;  $l_н$  – высота нижней части втулки;  $\delta_1$  – толщина стенки верхней части втулки;  $\delta_2$  – толщина стенки нижней части втулки;  $D$  – внутренний диаметр втулки.

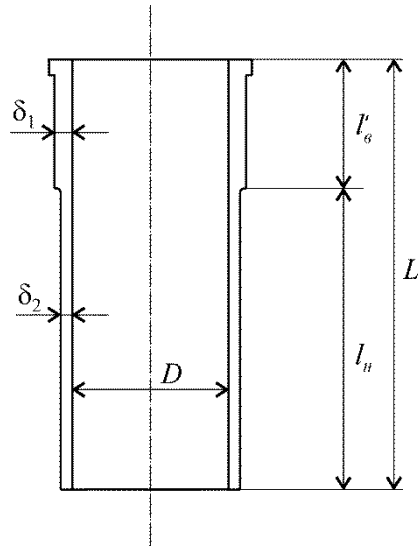


Рис. 1. Эскиз цилиндровой втулки со ступенчатым изменением толщины вдоль её образующей

Расчётная схема балки-полоски приведена на рис. 2, где приняты обозначения:  $D_{и1}, D_{и2}$  – цилиндрическая жесткость;  $K_1, K_2$  – коэффициент жёсткости упругого основания;  $w_1(x_1), w_2(x_2)$  – упругая линия;  $l_1$  – расстояние от верхнего посадочного пояса до промежуточной опоры, выполненной в виде кольца-уплотнителя;  $A$  – податливость упругой опоры;  $\mathcal{A}$  – податливость упругой заделки верхнего торца втулки в плане её поворота;  $p(c)$  – интенсивность распределённой нагрузки, действующей на балку-полоску при некотором фиксированном положении поршня  $c$ , численно равное давлению в цилиндре при этом положении поршня;  $l_в$  – высота верхней части втулки, отсчитываемая от верхнего посадочного пояса;  $L$  – высота втулки, отсчитываемая от верхнего посадочного пояса.

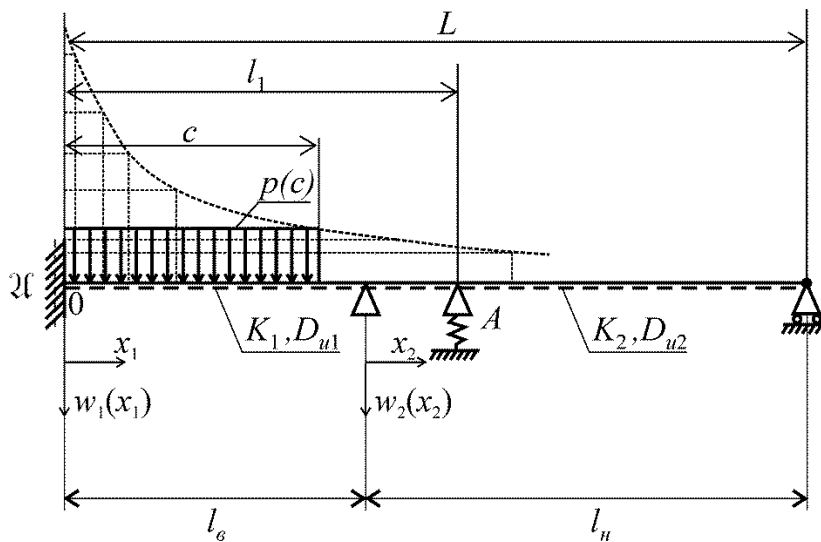


Рис. 2. Расчётная схема балки-полоски, выделенной вдоль образующей цилиндровой втулки с переменной толщиной

В соответствии с [2, 3] представленные выше параметры жёсткости балки-полоски и её основания определяются из формул:



$$D_{и1} = \frac{E \cdot \delta_1^3}{12 \cdot (1 - \mu^2)}, \quad D_{и2} = \frac{E \cdot \delta_2^3}{12 \cdot (1 - \mu^2)}; \quad (1)$$

$$K_1 = \frac{E \cdot \delta_1}{r_{ср в}^2}, \quad K_2 = \frac{E \cdot \delta_2}{r_{ср н}^2}, \quad (2)$$

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона;

$r_{ср в}$ ,  $r_{ср н}$  – средний радиус втулки для верхней и нижней части соответственно.

Дифференциальное уравнение изгиба балки-полоски в случае постоянства толщины втулки вдоль образующей можно записать в виде (для сокращения записи индексы «1» и «2» опущены):

$$D_{и} \frac{d^4 w(x)}{dx^4} + K \cdot w(x) = p(c), \quad (3)$$

где  $D_{и}$  – цилиндрическая жесткость;

$K$  – коэффициент жёсткости упругого основания;

$w(x)$  – упругая линия;

$p(c)$  – интенсивность внешней распределённой нагрузки.

Так как для рассматриваемого случая толщина стенки втулки не является постоянной по высоте, то входящие в уравнение (3) параметры жёсткости балки-полоски и основания  $D_{и}$  и  $K$  соответственно будут изменяться при изменении толщины втулки. Поэтому балка-полоска разбивается на два участка: длиной  $l_{в}$  и длиной  $l_{н}$ , в пределах каждого из этих участков указанные параметры жёсткости остаются постоянными ( $D_{и1}$ ,  $K_1$  и  $D_{и2}$ ,  $K_2$  соответственно). В месте соединения этих участков размещается фиктивная опора (рис. 2). Опора-уплотнитель размещается на расстоянии  $l_1$ , податливость этой опоры  $A$ . При этом в зависимости от взаимного расположения опоры-уплотнителя, положения поршня  $c$  и места изменения толщины втулки должны использоваться различные расчётные схемы, представленные ниже.

1. Кольцо-уплотнитель расположено на участке с толщиной  $\delta_2$ , подвижная газовая нагрузка не достигает места изменения толщины стенки втулки.

2. Кольцо-уплотнитель расположено на участке с толщиной  $\delta_2$ , подвижная газовая нагрузка действует на участке толщиной  $\delta_2$ , но не достигает места установки кольца-уплотнителя.

3. Кольцо-уплотнитель расположено на участке с толщиной  $\delta_2$ , подвижная газовая нагрузка достигает места установки кольца-уплотнителя.

4. Кольцо-уплотнитель расположено на участке с толщиной  $\delta_1$ , подвижная газовая нагрузка не достигает места установки кольца-уплотнителя.

5. Кольцо-уплотнитель расположено на участке с толщиной  $\delta_1$ , подвижная газовая нагрузка достигает места установки кольца-уплотнителя, но действует только на участке с толщиной  $\delta_1$ .

6. Кольцо-уплотнитель расположено на участке с толщиной  $\delta_1$ , подвижная газовая нагрузка достигает места изменения толщины стенки втулки.

Случай, представленный на рис. 2, соответствует расчётной схеме №1, остальные отличаются положением опоры-уплотнителя  $l_1$  и протяжённостью нагрузки  $c$ .

В общем виде решение уравнения (3) для каждого из участков балки-полоски можно записать согласно [3]. Ниже представлены уравнения для упругой линии участков балки-полоски, соответствующие расчётной схеме №1:

$$w_1(x_1) = D_{10} \cdot V_0(\alpha_1 \cdot x_1) + D_{11} \cdot V_1(\alpha_1 \cdot x_1) + D_{12} \cdot V_2(\alpha_1 \cdot x_1) + D_{13} \cdot V_3(\alpha_1 \cdot x_1) + \frac{p(c)}{K_1} - \quad (4)$$

$$- \left\| \frac{p(c)}{4 \cdot \alpha_1^4 \cdot D_{и1}} \{1 - V_0[\alpha_1 \cdot (x_1 - c)]\};$$

$$w_2(x_2) = D_{20} \cdot V_0(\alpha_2 \cdot x_2) + D_{21} \cdot V_1(\alpha_2 \cdot x_2) + D_{22} \cdot V_2(\alpha_2 \cdot x_2) + D_{23} \cdot V_3(\alpha_2 \cdot x_2) - \quad (5)$$

$$- \left\| \begin{array}{c} \cdot \\ l_1 - l_B \end{array} \right. \frac{R}{2\sqrt{2} \cdot \alpha_2^3 \cdot D_{и2}} V_3 [\alpha_2 \cdot (x_2 - l_1 + l_B)],$$

где  $D_{10}, D_{11}, D_{12}, D_{13}, D_{20}, D_{21}, D_{22}, D_{23}$  – постоянные интегрирования, определяемые из граничных условий;

$V_0, V_1, V_2, V_3$  – функции Н.П. Пузыревского;

$R$  – реакция промежуточной опоры, функцию которой выполняет кольцо-уплотнитель;

$\alpha_1 = \sqrt[4]{\frac{K_1}{4 \cdot D_{и1}}}$ ,  $\alpha_2 = \sqrt[4]{\frac{K_2}{4 \cdot D_{и2}}}$  – безразмерные параметры.

Реакция промежуточной опоры определяется выражением

$$R = \frac{W_2(l_1 - l_B)}{A}. \quad (6)$$

Граничные условия для рассматриваемых участков балки-полоски имеют вид:

$$\begin{cases} w_1(0) = 0, \\ w_1'(0) = \mathfrak{A} \cdot D_{и1} \cdot w_1''(0); \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} w_1(l_B) = w_2(0), \\ w_1'(l_B) = w_2'(0), \\ D_{и1} \cdot w_1''(l_B) = D_{и2} \cdot w_2''(0), \\ D_{и1} \cdot w_1'''(l_B) = D_{и2} \cdot w_2'''(0); \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} w_2(l_H) = 0, \\ w_2''(l_H) = 0. \end{cases} \quad (9)$$

### 3. Результаты и их обсуждение

По разработанной методике был выполнен расчёт цилиндровой втулки судового дизеля при следующих исходных данных:  $\delta_1 = 19$  мм – толщина стенки верхней части втулки;  $\delta_2 = 15$  мм – толщина стенки нижней части втулки;  $D = 200$  мм – диаметр втулки;  $l_B = 115$  мм – высота верхней части втулки, отсчитываемая от верхнего посадочного пояса;  $l_H = 385$  мм – высота нижней части втулки;  $E = 1,5 \cdot 10^5$  МПа – модуль упругости первого рода материала втулки. Давление на такте расширения в зависимости от положения поршня (угла поворота коленчатого вала) определялось в соответствии с [2]. Результаты расчёта представлены на рис. 3.

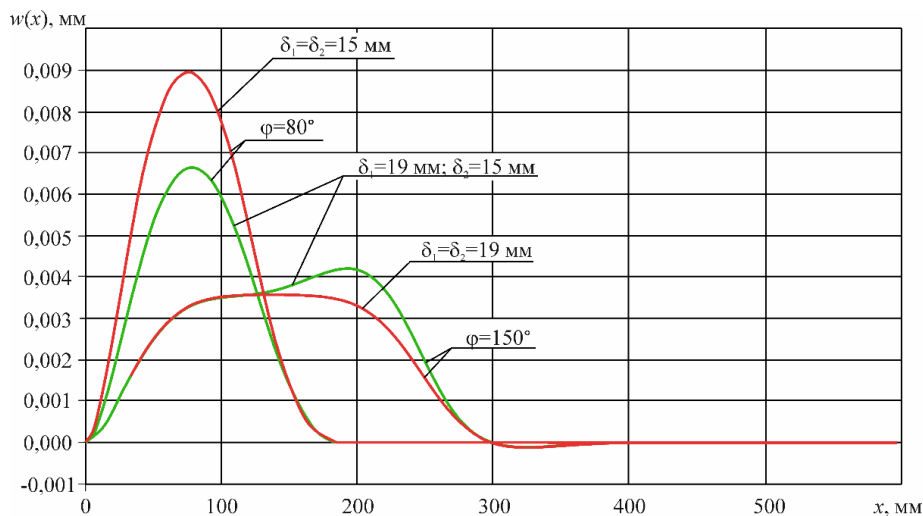


Рис. 3. Результаты расчёта с использованием предложенной методики

Там же приведены кривые, построенные для случая, когда толщина стенки втулки остаётся неизменной по высоте. Сопоставление показывает, что изменение толщины оказывает существенное влияние на параметры деформирования втулки.

#### 4. Расчёт с использованием численных методов

Как уже отмечалось, для определения напряженно-деформированного состояния деталей ДВС в настоящее время широко применяются численные методы. Поэтому для сопоставления с результатами, полученными с применением предложенной методики, был выполнен расчёт втулки по МКЭ. Для этого использовался компьютер, оснащенный процессором AMD Ryzen 3 3200G 3,6GHz, и имеющий 32 ГБ оперативной памяти. Разбиение модели на конечные элементы и результаты расчёта перемещений втулки представлены на рис. 4.

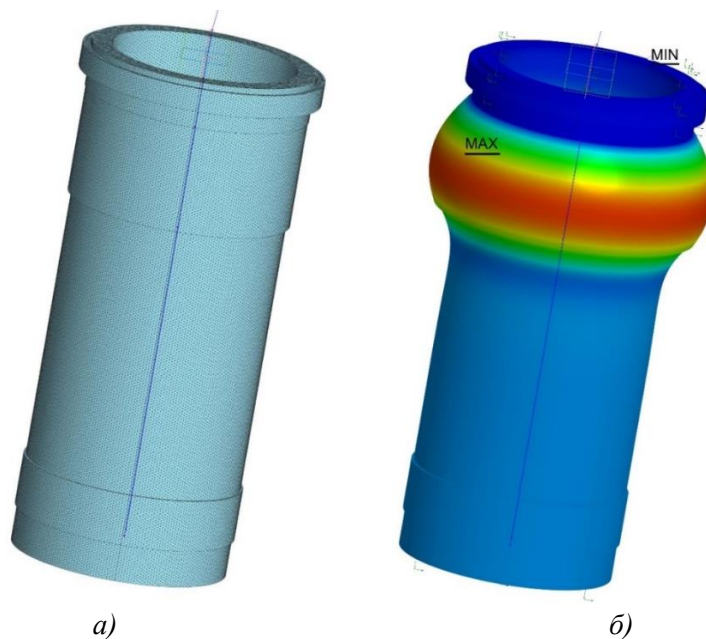


Рис. 4. Расчёт с использованием МКЭ: а) – построение сетки конечных элементов; б) – результаты расчёта перемещений втулки

На рис. 5 дана зависимость от шага сетки конечных элементов  $h$  времени расчёта  $T$  и отклонения результатов расчёта  $\varepsilon$  по предложенной модели и с использованием МКЭ. Здесь значение  $\varepsilon$  определялось выражением

$$\varepsilon = \frac{w_a - w_{\text{ч}}}{w_a} \cdot 100\%, \quad (10)$$

где  $w_{\text{ч}}$  – наибольшие перемещения, рассчитанные с использованием МКЭ;  
 $w_a$  – наибольшие перемещения, рассчитанные с использованием разработанной методики.

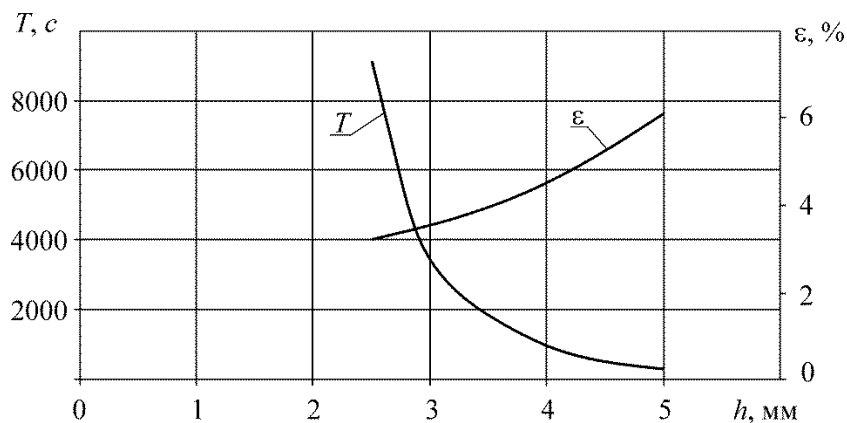


Рис. 5. Зависимость времени расчёта  $T$  и отклонения  $\varepsilon$  от шага сетки конечных элементов

Видно, что при уменьшении шага сетки конечных элементов  $h$  расхождение между численным и аналитическим решением составляет порядка 3%, однако при этом время расчёта увеличивается до нескольких часов при среднем уровне загрузки центрального процессора порядка 92%. Дальнейшее уменьшение шага  $h$  на используемом оборудовании осуществить не удастся вследствие недостатка вычислительных мощностей. Таким образом, достоинством предлагаемого аналитического метода является его низкая требовательность к вычислительным мощностям с обеспечением достаточной для практического применения точности расчёта.

## 5. Заключение

Разработанная методика расчёта позволяет выполнять оценку напряженно-деформированного состояния втулок судовых дизелей, имеющих не постоянную вдоль образующей толщину стенок, под действием подвижных газовых нагрузок. Это существенно расширяет возможности предложенной авторами методики [2]. Сопоставление результатов расчёта с использованием представленной модели и численных методов показывает целесообразность использования аналитических решений при расчёте деталей судовых ДВС.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брук Л. Новые двигатели серии E7 компании Mack // Автомобильная промышленность США. – 1989. – № 8. – С. 17-19.
2. Ковальчук Л.И., Бураковский Е.П., Алексеев И.Л., Бураковский П.Е. Закономерности изменения НДС по образующей цилиндрических втулок дизелей от воздействия переменных подвижных газовых нагрузок // Автомобильная промышленность. – 2013. – №3. – С. 7-10.
3. Папкович П.Ф. Труды по строительной механике корабля: в 4т. – Л.: Судпромгиз, 1962. Т. 1. – 576 с.

## STUDY OF DEFORMATION OF CYLINDER BUSHINGS MARINE DIESEL ENGINES BY VARIABLE MOVING GAS LOADS, ACCORDING TO THE EFFECT OF CHANGING THE WALL THICKNESS ALONG THE GENERATING SLEEVE

<sup>1</sup>Burakovskaya Marina Vasilievna, Ph. D., assistant professor

<sup>2</sup>Kovalchuk Leonid Ignatievich, Dr. Sci. (Eng), Professor

<sup>3</sup>Yavorskiy Igor Markovich, student

Baltic Fishing Fleet State Academy, Kaliningrad, Russia,

e-mail: <sup>1</sup>bgarf1988@inbox.ru; <sup>2</sup>bgarf1988@inbox.ru; <sup>3</sup>igor0909hp@gmail.com

*This article presents an analytical model developed by the authors for calculating the cylinder bushings of marine diesel engines under the action of variable moving gas loads with the possibility of taking into account changes in the wall thickness of the bushing along its generatrix. A comparison with the results of calculations by numerical methods is made. The expediency of the development and application of analytical models in the calculation of parts of marine diesel engines is shown.*

## СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИНЕЯ НА ПОВЕРХНОСТИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЗДУХООХЛАДИТЕЛЕЙ С ПЛОСКИМИ РЕБРАМИ

<sup>1</sup>Кошелев Сергей Валерьевич, канд. техн. наук, заведующий лабораторно-исследовательским центром холодильных систем

<sup>2</sup>Ейдеюс Альгирдас Йозапович, канд. техн. наук, консультант-наставник

<sup>1,2</sup>Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ», Калининград, Россия, e-mail: kaf\_xktk@bgarf.ru

*Работа посвящена анализу данных о процессе инееобразования и поиску современных способов определения основных параметров инея на поверхности низкотемпературных воздухоохладителей. Рассматриваются особенности определения плотности, массы, температуры поверхности и толщины слоя инея. Излагаются и оцениваются восемь методов опытного определения толщины слоя инея на плоской и трубчато-ребристой поверхности. По результатам анализа выбирается метод, подходящий для применения в разработанной экспериментальной установке.*

### Введение

В процессе работы холодильных машин (ХМ) и тепловых насосов (ТН) наблюдается намерзание на поверхности воздухоохладителей (ВО) образующегося из сконденсированной влаги инея. Для поддержания эффективной работы ХМ и ТН периодически необходимо удалять намерзший слой инея. Существует несколько способов его удаления, но все они подразумевают вывод из работы обмерзшего воздухоохладителя, либо временную остановку холодильной машины в целом. Частота и длительность оттаивания зависит от параметров ребрения ВО и условий его работы. Планирование оттаивания требует точной информации об изменении показателей слоя инея по времени и направлено на экономию энергоресурсов.

Доступную литературу по росту и накоплению инея на теплопередающих поверхностях можно разделить на три группы [1]: а) исследование зарождения и роста кристаллов, а также структуры инея; б) изучение свойств инея (плотности, теплопроводности, теплоемкости и др.) на простых поверхностях (пластины, цилиндры) и реальных ВО при различных условиях тепло-массообмена; в) теоретический и численный анализ влияния инея на эффективность теплопередающей поверхности.

Многообразие конструктивных и режимных параметров ВО усложняет экспериментальное и расчетное определение структуры и физических свойств образующегося инея, а также моделирование изменяющихся показателей работы ВО в условиях инееобразования при фиксированных исходных данных. Отмечается, что процесс формирования и роста инея не до конца понятен, а некоторые результаты противоречивы [2]. В частности, до сих пор нет единого мнения о преобладающих потенциалах переноса влаги из воздуха к твердой поверхности и в слой инея. Большинство исследований относится к ВО коммерческих ХМ и тепловых насосов. Лишь несколько работ посвящено низкотемпературным ВО [3,4]. Между тем, сложное влияние температуры охлаждаемого воздуха на инееобразование обсуждается уже в книге [5]. В последние годы больше внимания уделяется влиянию характеристик вентилятора на намерзание льда на ВО [6].

Точные данные о скорости образования инея и изменении его теплофизических свойств необходимы для правильного проектирования новых и подбора существующих ВО, а также для организации их оттайки. В условиях инееобразования приходится учитывать диаметр труб  $d_t$ , их число и расположение в пучке, продольный  $s_2$  и поперечный  $s_1$  шаг труб, толщину  $\delta_p$  и шаг  $s_p$  ребер, а также температуру охлаждаемого воздуха  $t_v$  и охлаждаемой поверхности  $t_n$ , наряду с влажностью  $\phi$  и скоростью воздуха  $v_a$  [7,8]. Установлено, что при обмерзании лучшие показатели эффективности имеют ВО с плоскими ребрами [9].

Надлежащее проектирование ВО предполагает обоснованное определение конструктивных и режимных его параметров, которые обеспечивают минимум необратимых потерь. В условиях инееобразования важная роль принадлежит вентилятору. Выполненный в статье [10] анализ показал, что при минимуме приращения энтропии в ВО увеличивается частота его оттаек. Поэтому оптимизировать необходимо работу всей ХМ, включая процессы намораживания и оттаивания инея. Анализ данных о плотности инея, образующегося на плоских поверхностях, приводится в нашей статье [11].

### Физические модели образования и роста инея

По современным представлениям в процессе образования инея на охлаждаемой поверхности выделяют несколько этапов (стадий, периодов). Чаще других используется деление Haysli и др. (1977), в котором выделяются три периода [12,13]: 1 – рост кристаллов; 2 – рост слоя инея; 3 – полного роста слоя инея [14].

В статье [15] по материалам других исследователей несколько подробнее рассмотрено изменение формы и размера кристаллов на твердой поверхности и в слое инея, с сохранением трех периодов, которым присвоены наименования: 1 – капельная конденсация; 2 – затвердевание и рост кончиков (иголок); 3 – уплотнение и большой (массовый) рост. Характерная (критическая) длительность первого периода  $\tau_c$  зависит от условий инееобразования (температура, естественная или вынужденная конвекция воздуха, температура и шероховатость поверхности). Второй период заканчивается, когда сравнительно однородный пористый слой формируется на поверхности. В третьем периоде слой инея представляется в целом однородным (гомогенным) и обладает характеристиками пористой среды, структура и показатели которой зависят от физических и термодинамических свойств инея в конкретных условиях.

При исследовании местных (локальных) изменений толщины и морфологии инея авторы статьи [16] дают такое описание процесса. Водяной пар конденсируется на холодной поверхности в виде мелких переохлажденных капель воды. Затем они вырастают до более крупных капель, которые со временем замерзают и образуют частицы льда на поверхности, что обычно рассматривается как начало формирования инея. Перистые, стержнеобразные или игловидные кристаллы затем вырастают на вершине частиц образовавшегося льда. Эти кристаллы сначала растут в направлении, перпендикулярном холодной поверхности, примерно с одинаковой скоростью. Сказанное происходит в первом периоде инееобразования. Во втором периоде кристаллы льда растут не только в направлении, перпендикулярном поверхности, но и параллельном ей. Образующиеся у вершин кристаллов ветки постепенно сцепляются и слой инея становится более однообразным. В третьем периоде температура поверхности инея достигает  $0^{\circ}\text{C}$  из-за роста толщины и термического сопротивления слоя. На его поверхности вместо льда появляется влага, которая впитывается в иней и замерзает. Очевидно, что такое описание третьего периода подходит лишь при условии охлаждения теплого воздуха. Кстати, в заключении статьи [16] отмечается, что экспериментально при охлаждении воздуха с температурой точки росы от  $1,1^{\circ}\text{C}$  до  $17^{\circ}\text{C}$  появление воды на поверхности не обнаружено, хотя толщина слоя инея доходила до 6 мм. Некоторые авторы объясняют появление влаги на поверхности инея выделением теплоты сублимации при замерзании водяного пара.

Статья [17] целиком посвящена формированию инея на холодной поверхности с температурой от  $-20^{\circ}$  до  $0^{\circ}\text{C}$  при температуре воздуха  $t_b=22^{\circ}$  и влажностью  $\phi_b=15-85\%$ . Основное внимание в ней уделено образованию инея на ранней стадии, т.к. росту инея в третьем периоде посвящено много работ. Эксперименты выполняемые с использованием системы цифровых образов, включающей микроскоп, CCD (charge-coupled device) камеру и компьютер. По-прежнему отмечается, что инееобразование начинается с формирования и роста капель воды, замерзания переохлажденных капель, формирования и роста кристаллов льда на замерзших каплях. Далее происходит рост кристаллов с одновременным разрушением некоторых из них. В итоге формируется и растет слой инея, который в дальнейшем стареет и становится более плотным. Для конкретного эксперимента приводятся 12 фотографий формирования и роста инея на медной пластине с пояснениями к ним. На основе выполненных наблюдений произведена классификация начальных кристаллов, которые формируются на бусинах намерзшего льда. Выделены 4 типичные группы кристаллов, показанных на рисунке 1 [17] в виде 6 фотографий: 1–неправильные (irregular) (a); 2–хлопьевидные (flake) (b); 3–игольчатые (needle) (c) и столбовидные (pole) (d); 4–перистые (feather) (e, f). Показано, что время

зарождения  $\tau_3$  и диаметр замерших капель  $d_k$  уменьшается с понижением температуры холодной поверхности. Например, для опыта с  $t_a = 22^\circ\text{C}$  и  $\varphi = 50\%$  время замерзания  $\tau_3 = 1200$  с при  $t_{\text{п}} = -6^\circ\text{C}$ , а при  $t_{\text{п}} = -18^\circ\text{C}$   $\tau_3 = 50$  с. В этих же условиях диаметр капель  $d_k = 0,88$  мм при  $t_{\text{п}} = -6^\circ\text{C}$ , а при  $t_{\text{п}} = -18^\circ\text{C}$   $d_k = 0,03$  мм.

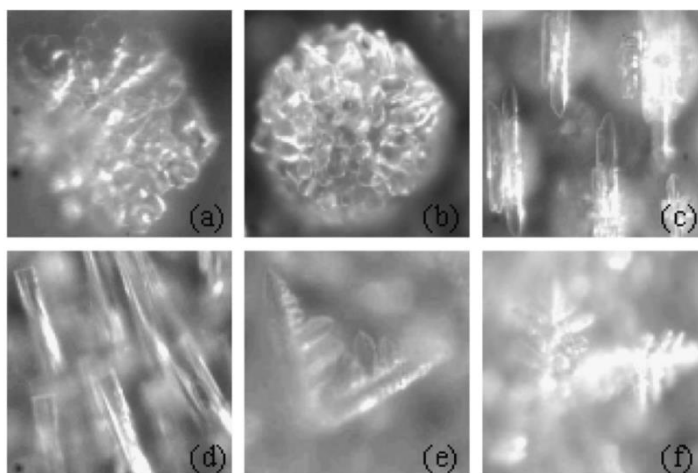


Рис. 1. Виды кристаллов

В процессе обмерзания ВО тепловых насосов (ТН) и ХМ также наблюдаются три стадии роста инея [18,19]. В начальной стадии продолжительностью 10-15 минут сконденсированная вода замерзает и формирует прозрачный тонкий слой льда на поверхности труб и ребер. Затем появляется зернистый лед и растет постепенно на образовавшемся слое, пока не сформируются столбовидные кристаллы. На этой стадии роста толщины слоя инея  $\delta_{\text{и}}$ , холодопроизводительность ВО и эффективность ТН значительно повышаются. На второй стадии столбовидные кристаллы льда растут больше по радиусу, чем по длине, а скорость роста толщины  $\delta_{\text{и}}$  замедляется или остается неизменной. Производительность ВО мало зависит от изменяющейся структуры инея. На третьей стадии кристаллы растут преимущественно по длине и постепенно становятся преобладающими. В итоге формируется пушистый слой инея. Темп роста толщины слоя  $\delta_{\text{и}}$  повышается в 2-4 раза по сравнению со второй стадией, а производительность ВО понижается в несколько раз. При циклической работе ТН и постоянной температуре наружного воздуха длительность начальной и третьей стадии почти не изменяются, если влажность  $\varphi = 65-85\%$ . Длительность же второй стадии уменьшается с ростом влажности  $\varphi$ . Если влажность не изменяется, то длительность второй стадии оказывается минимальной при  $t_{\text{в}} = 0^\circ\text{C}$ .

При построении математических моделей (ММ) ВО в условиях инеобразования нередко рассматривается лишь третий период роста инея. Расчеты массопередачи по коротким интервалам времени в существующих ММ можно разделить на три категории [12]. 1) Приращение массы инея  $\Delta m_{\text{и}}$  делится на две части, одна из которых увеличивает плотность  $\Delta m_{\rho}$ , а другая – толщину слоя  $\Delta m_{\delta}$ . Считается, что увеличение плотности  $\Delta m_{\rho}$  обусловлено диффузией молекул водяного пара в пористую среду. Часть  $\Delta m_{\rho}$  находится как разность  $\Delta m_{\rho} = \Delta m_{\text{и}} - \Delta m_{\delta}$ . Значения  $\Delta m_{\text{и}}$  находят по уравнению материального баланса или опытным путем. 2) Предложенный в статье подход [13] упрощает накопление инея в третьем периоде до диффузии водяного пара в пористую среду. При этом необходимо задавать толщину  $\delta_{\text{и}0}$  и плотность  $\rho_{\text{и}0}$  на ранней стадии в качестве начальных условий. Исследования показывают, что ранняя стадия оказывает заметное влияние на весь процесс накопления инея. 3) Теплоприток к ВО рассчитывается по эмпирическим зависимостям, а приток массы – из соотношения Льюиса (обычно  $Le = 1$ ). Эта модель считается полумпирической квазистационарной. Область ее применения ограничена наличием уравнений теплоотдачи, подходящих для условий наружной теплоотдачи, изменяющихся по мере обмерзания ВО.

### Способы измерения параметров инея

Приборы для измерения **плотности инея**  $\rho_{\text{и}}$  пока не созданы. Особенность заключается в том, что толщина слоя  $\delta_{\text{и}}$  редко превышает 5 мм, а длительность его формирования на практике

составляет от долей часа, до нескольких суток. Обычно плотность  $\rho_{\text{и}}$  определяют делением массы инея  $M_{\text{и}}$  на объем  $V_{\text{и}}$ . Точное измерение этих составляющих имеет свои трудности. Оно предполагает применение самых современных средств измерения.

**Массу инея**  $M_{\text{и}}$  чаще всего определяют путем сбора и взвешивания талой воды по окончании процесса инеобразования. Из-за смачиваемости поверхностей не всю воду удастся собрать. Иногда остаточную влагу собирают с помощью гигроскопичных материалов, которые потом взвешивают. Во многих случаях интерес представляет темп накопления инея, т.е. скорость изменения массы  $M_{\text{и}}$  за короткое время. В лабораторных условиях осуществляют непрерывное взвешивание охлаждаемой поверхности вместе с инеем. В случае простой геометрии поверхность (пластина, труба) используют полупроводниковый микрохолодильник и высокочувствительные весы [20].

При исследовании инеобразования на ВО вместо хладагента применяют хладоноситель (раствор этилен-гликоля), который подают через гибкие шланги [21, 22]. Взвешивание ВО с инеем, производят через одинаковые промежутки времени, например, 10 минут. Чтобы исключить вибрацию, вентилятор останавливают на время измерения массы (1 мин). Из-за относительно высокой массы ВО точность измерения массы  $M_{\text{и}}$  оказывается невысокой, несмотря на сложное создание лабораторной установки. Известны попытки периодического измерения массы инея на ВО за счет использования быстро извлекаемой пластины, которая составляет как бы часть ВО. Нередко массу  $M_{\text{и}}$  рассчитывают по балансу влаги в воздухе до и после ВО. Этот подход требует точного определения расхода и влагосодержания воздуха. Сравнительно малые скорости воздуха в фронтальном сечении ВО препятствуют точному измерению расхода без применения выравнивающих устройств и мерных сопел. При температуре воздуха  $t_{\text{в}} < -15^{\circ}\text{C}$  возникают сложности измерения относительной влажности  $\varphi$  и определения влагосодержания  $d_{\text{в}}$ . Расчетные данные о  $M_{\text{и}}$  принято сопоставлять с результатами ее измерения, полученными любым способом за тот же период времени. Такая оговорка обусловлена диффузией водяного пара из воздуха в слой инея.

Измерение **объема инея**  $V_{\text{и}}$  имеет свои особенности. Наблюдения показывают, что даже на плоской горизонтальной пластине с постоянной температурой поверхности  $t_{\text{п}}$  и неизменными параметрами поступающего воздуха, слой инея оказывается неравномерным. Форма его искажается по краям пластины, а толщина  $\delta_{\text{и}}$  на начальном участке повышенная из-за более высокого влагосодержания потока воздуха [21]. Распределение толщины  $\delta_{\text{и}}$  в реальном ВО имеет весьма сложный характер. На первых по ходу воздуха рядах ВО образуется больше инея, чем на последующих. Неравномерное распределение слоя инея по высоте ребер обусловлено искривлением температурного поля пластин. Оседание инея на трубах между пластинами подвержено влиянию пониженной температуры металла и завихрениям набегающего потока. Отдельные участки многорядных ВО недоступны не только для измерения, но и для наблюдения.

Измерения **толщины слоя инея**  $\delta_{\text{и}}$  необходимы как для определения его объема  $V_{\text{и}}$ , так и для принятия решения о необходимости оттайки ВО. Одни методы измерения  $\delta_{\text{и}}$  реализуются с участием оператора, а другие автоматизированы. Для управления оттайкой инея предпочтительны измерители с дискретным электрическим сигналом [23]. В обзоре [24] и статье [20] рассматривается восемь методов измерения толщины  $\delta_{\text{и}}$  и приводятся ссылки на первоисточники. Первые три из них считаются прямыми, а остальные непрямыми. Прямые методы предполагают использование цифрового микрометра, микрометра с конусом или микроскопа со сканирующими зондом. Непрямые методы основаны на использовании перемещаемого лазерного пучка, анализе фотографий бокового вида, формировании цифрового образа поверхности, а также на конверсии оптических сигналов и потока нейтронов. Чтобы как-то отразить особенности метода, им присвоены наименования, которые приводятся ниже в вольном переводе. Описание методов измерения  $\delta_{\text{и}}$  с поясняющими рисунками приводится ниже.

## 1. Одноточечные измерения бокового вида

Данный метод впервые был применен Biguria и Wenzel в 1970 году, а затем Sengupta и др. в 1998 году. В их экспериментах использовалось оптическое устройство, состоящее из телескопа с катетометром. Телескоп имеет перекрестие на линзе объектива, и он был размещен с другой стороны тестового участка, напротив охладителя. Таким образом, верхний слой инея можно было наблюдать сбоку. Телескоп можно было перемещать вертикально по шкале, состоящей из основной



шкалы и нониуса, что сводило к минимуму погрешность измерения. Медные маркеры были установлены в нескольких местах на исследуемом участке, чтобы гарантировать, что значения толщины измеряются в одной и той же точке. Перекрестную проволоку объектива устанавливали на одном конце маркера и получали показания шкалы. Затем телескопу разрешалось двигаться вверх или вниз, чтобы совместить поперечную проволоку с другим концом маркера. Разница между начальным и конечным показаниями дает толщину слоя инея в этом конкретном месте. Зная диаметр оголенной трубы, можно было рассчитать толщину слоя инея. В 1997 году этот метод был использован для проверки разработанной Lee и др. одномерной модели образования инея на холодной плоской поверхности. Вместо катетометра для измерения толщины слоя инея использовали цифровой микрометр (Рис. 2а). Стоит отметить, что зонд цифрового микрометра был изготовлен из акриловой смолы, чтобы предотвратить таяние инея при контакте с инеем. К недостаткам этого метода можно отнести следующее: (1) низкая точность с неопределенностью, связанной с толщиной слоя инея, составляющую примерно  $\pm 0,1$  мм, (2) влияние на процесс инееобразования во время измерения, (3) измерения только в одной точке, а не на всем слое инея из-за неравномерного обмерзания, возникшего в результате неравномерного распределения температуры поверхности и окружающего влажного воздуха.

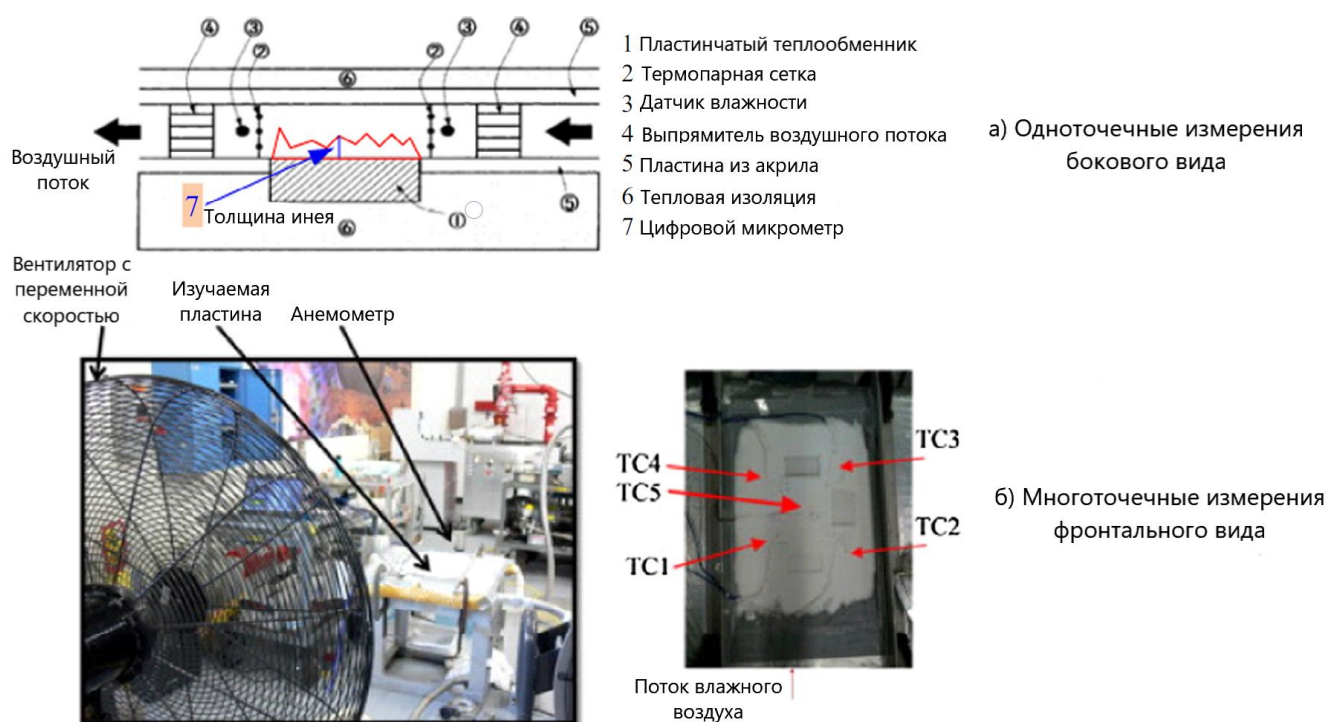


Рис. 2. Методы измерения толщины слоя инея с анализом бокового и фронтального вида

## 2. Многоточечные измерения фронтального вида

Другое экспериментальное исследование по росту и уплотнению инея на плоской поверхности для ламинарного течения с переменной влажностью было проведено Kandula в 2012 году, который представил и использовал метод нониуса для измерения толщины инея. Как показано на рис. 2(б), иней образовался на алюминиевой гидрофильной поверхности квадратной плоской пластины, шероховатость ее поверхности приблизительно находилась в пределах от 0,8 до 3,2 мкм. Тестовая пластина охлаждалась жидким азотом, который подавался из сосуда дьюара LN2, в то время как остальная часть пластины, окружающая тестовую секцию, была изолирована азрогелем. Во время начального охлаждения пластины тестовая пластина была покрыта пластиковой пленкой, чтобы предотвратить отложение инея на поверхности пластины. Как только пластина достигала установившейся температуры, пластиковую пленку удаляли и начинали измерения. Толщина слоя инея на пластине была практически одинаковой и измерялась на пластине в пяти точках (от TC1 до TC5), как показано на рис. 2(б); точка TC5 находилась в центре пластины. Для измерения толщины

слоя инея использовали прецизионный штангенциркуль с индикатором часового типа (точность 0,127 мм). Толщину слоя инея находили как среднее значение пяти измеренных величин. Среднее значение по двум точкам измерения использовалось в более поздней работе Wang. Вместо измерения цифровым микрометром в этом методе использовался нониусный измеритель. Это повысило точность процесса измерения. При этом пять положений фиксировались в начале измерения толщины слоя инея. После того, как были собраны данные с пяти позиций, было рассчитано их среднее значение, которое использовалось в качестве толщины инея. Этот метод более приемлимый, однако спаи термопары и процесс измерения могут повлиять на образование инея. В конечном счете, среднее значение по пяти позициям все еще не является полностью точным представлением всего слоя инея. Основную трудность вызывает установка спаев термопар на теплообменнике. Этот метод не нашел широкого применения на практике.

### 3. Многоточечные измерения с применением сканирующего зондового микроскопа (СЗМ)

В своем экспериментальном исследовании этот метод предложили в 2014 году Matsumoto и др. Как видно на рис. 3(а), основной корпус СЗМ помещен в камеру, в которой можно контролировать влажность, давление и температуру. Температуру поверхности испытуемой пластины определяют на основе зависимости между температурой датчика и температурой поверхности, которая была получена ранее. Принцип измерения толщины слоя инея показан на рис. 3(б). В СЗМ различные взаимодействия между поверхностью тестовой пластины и зондом происходили на конце кронштейна и измерялись, когда зонд сканировал поверхность тестовой пластины. Для точного обнаружения этих взаимодействий был использован метод оптического рычага, в котором отражение от лазерного луча, облучающего заднюю часть кронштейна, обнаруживается с помощью фотодиодного детектора. Кроме того, применяется динамический режим, в котором смещения в вертикальном направлении могут быть получены за счет прерывистого контакта между образовавшейся инеем и кончиком зонда. Толщина слоя инея определяется по величине перемещений зонда. Для непрерывного измерения формы льда, зонд используется после того, как ширина кончика зонда изношена до фиксированного значения. Процедура сканирования зонда представлена на рис. 3(в). Распределение образовавшегося инея можно измерить, используя данные о смещениях по всем проходам зонда во всем диапазоне сканирования. В этом методе можно получить данные о толщине слоя инея на плоской поверхности по нескольким линиям. Значения толщины слоя инея были значительно ближе к средней толщине всего слоя инея. Однако весь процесс измерения требует значительного количества времени. После того, как все данные по одной линии будут собраны, толщина слоя инея предыдущей линии будет уже больше, так как толщина слоя инея будет меняться во времени непрерывно. Кроме того, во время измерения толщины слоя инея трудно предотвратить разрушение кристалла инея сканирующим зондом. Поэтому, хотя толщину слоя инея можно измерить, этот метод тоже не точен. Кроме того, первоначальная стоимость зонда высока, что делает его неудобным для применения.

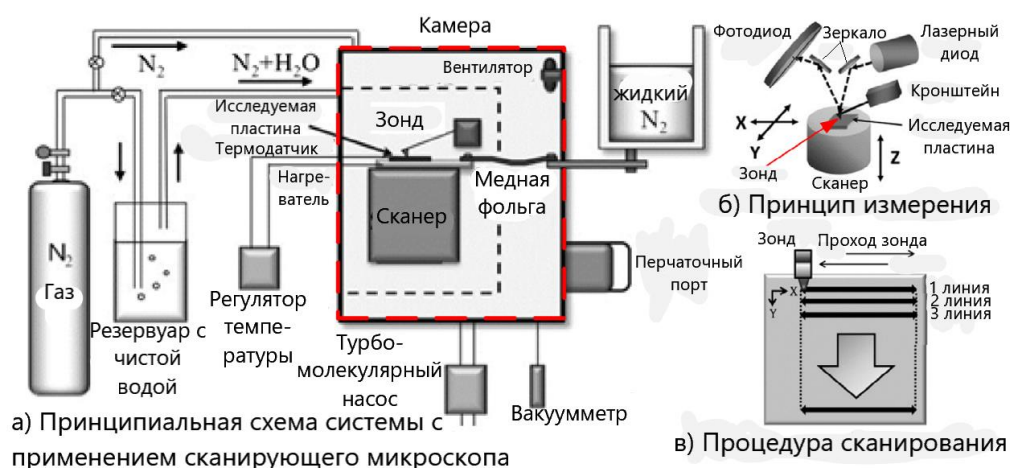


Рис. 3. Метод измерения толщины слоя инея с применением сканирующего зондового микроскопа

#### 4. Одноточечные измерения с прибором перемещения лазера

Это один из непрямых методов измерения, который использует лазер для непрямого измерения толщины слоя инея в одной точке. В таких измерительных системах применяются методы интерферометрии и дифракции, как показано на рис. 4(а) и 4(б). Qu и др. в 2006 году использовали метод интерферометрии для измерения толщины инея и, таким образом, смогли проанализировать локальные изменения толщины и морфологии слоя инея на поверхности глыбы при естественной или принудительной циркуляции воздуха над ним. Как показано на рис. 4(в), лазерный датчик перемещения располагался в нижней части экспериментальной установки и направлен к месту образования слоя инея. Заявлено, что погрешность измерения толщины слоя инея составляет 0,01 мм. Dong в 2000 году использовали метод дифракции для измерения толщины слоя инея, образовавшегося на поверхности испарителя, и таким образом смог визуально и быстро определить скорость инеобразования. Между обмерзшей и эталонной поверхностью было пространство, когда свет проходил через это пространство, возникали дифракционные полосы. Затем область, покрытая инеем, расширялась, пространство сужалось, а дифракционные полосы смещались. По изменению положения дифракционных полос можно точно определить скорость инеобразования. Как указано, измерение было с точностью до 0,01 мм. По сравнению с одноточечным измерением по нониусу, лазерный метод измерения является бесконтактным и имеет следующие преимущества: он очень точен, работает в режиме реального времени и удобен. Однако тепло, аккумулируемое самим лазером, может разрушить температурное поле холодной поверхности. Сильное проникновение лазера может привести к неисправности. Кроме того, высокая начальная стоимость также ограничивает его применение.

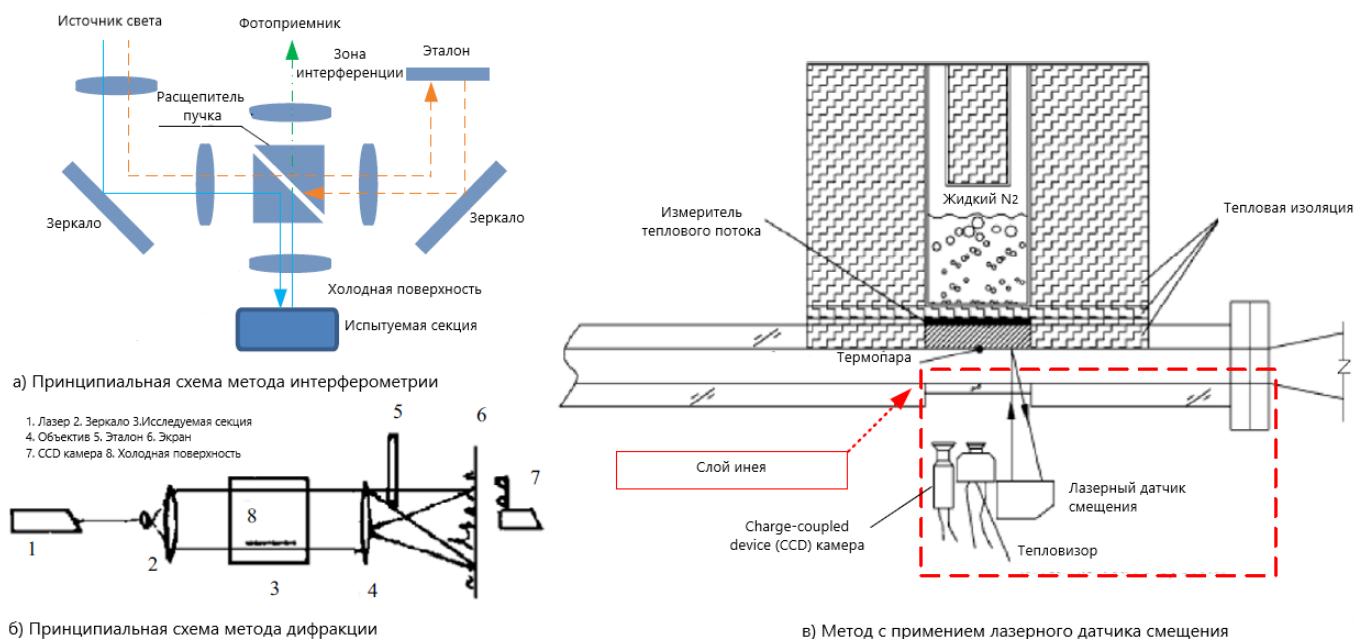
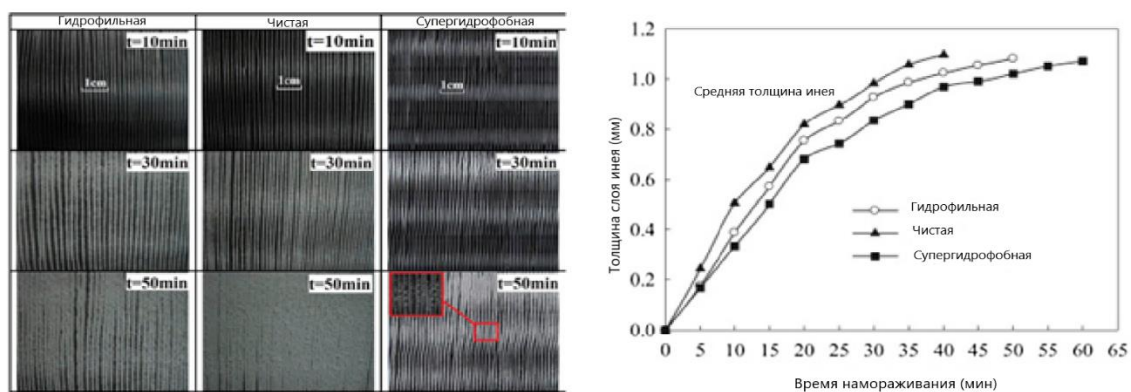


Рис. 4. Методы измерения толщины слоя инея с применением лазера

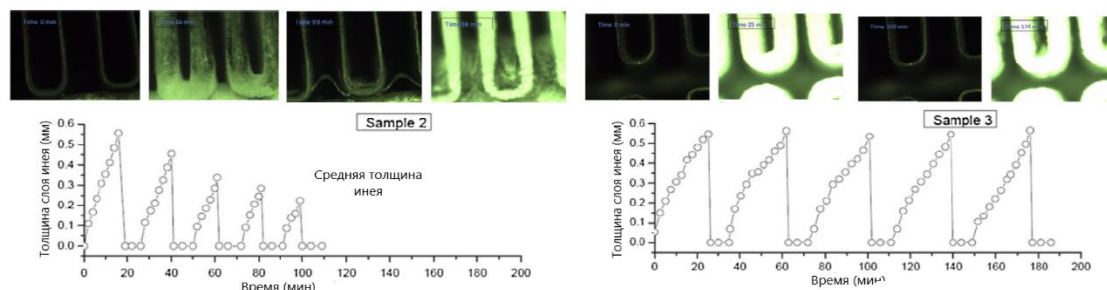
#### 5. Однолинейные измерения путем анализа фотографий бокового вида

Этот метод является наиболее широко используемым методом в открытой литературе, особенно в исследованиях обледенения и оттаивания для систем охлаждения и тепловых насосов. В рамках этого метода, на изображениях сравнивают изменения межреберного пространства во время процесса инеобразования. Помимо того, что он не влияет на процесс инеобразования, его самым большим преимуществом является то, что он удобен при монтаже и применении. Однако из-за того, что учитывается вид только одной боковой линии, неравномерность слоя инея снижает ее точность. Поэтому его применяют при условии, что слой инея на пластине почти однороден. Этот метод был использован Wang в экспериментальном исследовании по изучению влияния характеристик поверхности на процесс инеобразования трех различных типов трубчато-ребристых теплообменников в

2015 году. Изображения роста слоя инея для трех типов теплообменников показаны на рис. 5(а). Испытания по измерению толщины слоя инея проводились трижды для каждого теплообменника. В расчетах использовались средние значения трех опытов, как показано на рис. 5(а). Погрешность экспериментальных данных о толщине слоя инея составила 10,1%. Точно так же Storey и Jacobi использовали лазерный метод визуализации плоскости для измерения толщины слоя инея с погрешностью 0,2 мм.



а) Анализ фотографий бокового вида: анализ контуров объектов



б) Анализ цифрового образа бокового вида: количество серых объектов

Рис. 5. Метод измерения толщины слоя инея с применением анализа фотографий бокового вида

## 6. Измерения путем формирования цифрового образа бокового вида

В отличие от прямого сравнения толщины слоя инея с изображениями бокового вида, цифровая обработка изображений представляет собой метод измерения толщины слоя инея и количественного анализа процесса инеобразования. Этот подход может помочь идентифицировать объекты или другие данные в цифровых изображениях, разделяя изображение на несколько частей. Для отделения кристаллов инея от фона применялся метод порогового деления. Сначала исходное изображение преобразуется в оттенки серого, затем метод порогового деления делит пиксели серого изображения на две части. С помощью этого метода исходное изображение преобразуется в бинарное изображение. Для анализа изменения толщины слоя инея во времени всегда измеряется толщина слоя инея в средней части поверхности ребра. В качестве эталона используется расстояние между двумя соседними трубами. На рис. 5(б) показаны изображения инеобразования и значения толщины слоя инея, измеренные для двух образцов. Толщина слоя инея колеблется от 0 до 1 мм, а точность измерения толщины слоя инея составляет примерно 0,02 мм. Толщину слоя инея измеряли и рассчитывали каждые 2 минуты в процессе замерзания и оттаивания. Ожидается, что толщина инея в реальном времени будет измеряться косвенно и количественно. Подобно ранее упомянутому однолинейному анализу фотографий бокового вида, измерение путем формирования цифрового образа бокового вида менее точно, когда слой инея накапливается неравномерно. Кроме того, необходимы цифровая камера с зарядовой связью и специальное программное обеспечение для обработки изображений. В отличие от ранее упомянутых методов, в этом методе может быть установлено подключение к Интернету. Это позволяет использовать дополнительные интеллектуальные приложения, а также уменьшить количество ручных настроек или операций.



## 7. Измерения с конверсией оптических (инфракрасных) сигналов

Для контроля степени обмерзания поверхности наружного блока воздушного теплового насоса, разработан метод измерения преобразования оптического сигнала, основанный на фотоэлектрической технологии. Как показано на рис. 6(а), фотоэлектрические датчики, окруженные трубкой (TEPS), состоят из фотоэлектрического датчика, тестовой секции, печатной платы и соединительной рамы; два TEPS соединены вместе попарно, чтобы покрыть всю трубу. Рабочая часть изготовлена из теплопередающего материала, он находится в плотном контакте с трубой через соединительную рамку, чтобы обеспечить одинаковый рост инея на испытательном участке и трубе. Таким образом, сложная задача контроля степени обмерзания поверхности теплообменника наружного блока теплового насоса трансформируется в измерение степени обмерзания на тестовом участке. Основным компонентом TEPS является фотоэлектрический датчик, который преобразует толщину инея в сигнал напряжения. Как показано на рис. 6(а), фотоэлектрический датчик состоит из излучателя и приемника, а тестовая часть расположена в проходе между ними. Как только электрический источник выдает ток  $I_D$ , излучатель испускает постоянные инфракрасные лучи в приемник через проход. Инфракрасный поток поглощается приемником и преобразовывается в ток  $I_C$ , на который будет влиять степень обмерзания в проходе. Этот метод имеет следующие преимущества: он не требует большого пространства и незначительно влияет на процесс намораживания. Однако из-за того, что исследуемый иней образуется на трубе, а не непосредственно на поверхности ребра, невозможно избежать различий между исследуемым инеем и льдом. Следовательно, недостатком этого метода является его низкая точность, хотя, как сообщается, он чувствителен к степени намораживания. Кроме того, высокая начальная стоимость и неудобная установка затрудняют широкое применение TEPS.

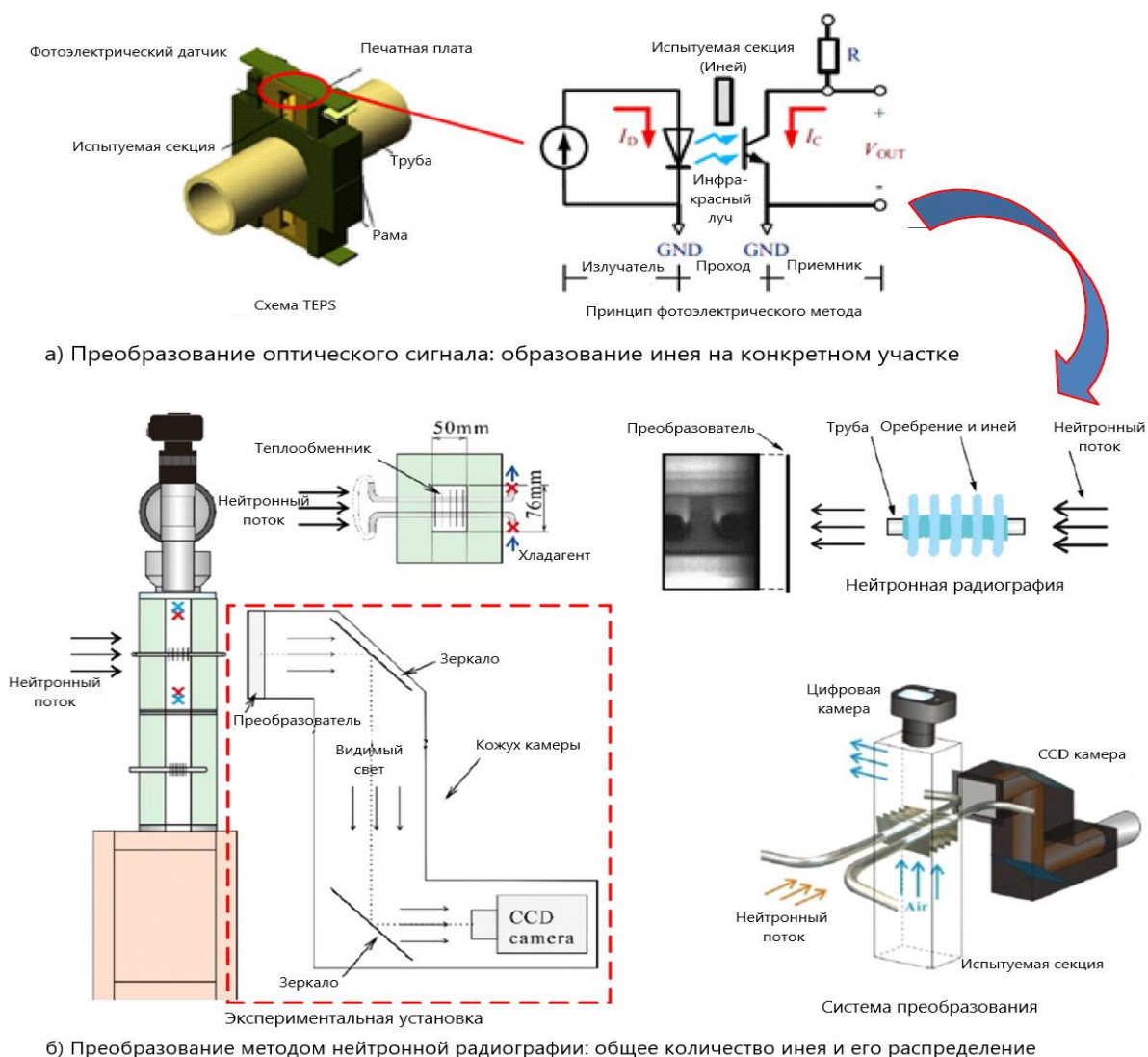


Рис. 6. Метод измерения толщины слоя инея с использованием конверсии сигналов

## 8. Измерения с конверсией потока нейтронов в цифровой образ

Подобно преобразованию оптического сигнала, преобразование с помощью нейтронной радиографии является еще одним непрямым методом измерения толщины или накопления инея. Как показано на рис. 6(б), система измерения с конверсией нейтронной радиографии включает в себя три секции, а именно экспериментальную установку для исследования инееобразования, нейтронный пучок и преобразователь. На основе нейтронной радиографии, иней, скопившийся на поверхностях ребра и трубы, может быть преобразован в изображения. Затем, анализируя эти изображения, можно получить данные об инее, включая его толщину и характер распределения. Кроме того, с помощью этого метода можно количественно измерить распределение влаги или влажного воздуха вокруг ребра и трубы. Таким образом, процесс таяния инея был дополнительно исследован экспериментально. Характеристики тепло- и массообмена были продемонстрированы Matsumoto и др. в 2015 году; в своем исследовании они напрямую получили данные об образовании инея. Этот метод и метод измерения с конверсией оптического сигнала отличаются от ранее упомянутого измерения толщины слоя инея по точкам или линиям. Во-первых, толщина слоя инея не требуется при разработке алгоритма оттаивания наружного теплообменника воздушного теплового насоса или холодильной системы. Во-вторых, для точного расчета средней плотности инея с помощью этого метода можно рассчитать среднюю толщину слоя инея. Хотя накопление инея на поверхности теплообменника можно точно измерить с помощью нейтронной радиографии, этот метод ограничен в исследованиях обледенения и / или размораживания из-за его недостатков, а именно высокой стоимости, неудобства нейтронной радиографии и требуемой большой площади. Нейтроны могут нарушить процесс обледенения и, таким образом, количественно повлиять на исследование процесса инееобразования.

Сделано качественное сравнение методов по пяти показателям. Из него следует, что высокую точность обеспечивают методы 3, 4, 7, 8; низкую стоимость имеют лишь методы 1 и 2; удобными для использования являются методы 1, 2, 5, 6; не влияют на процесс инееобразования методы 5, 6, 7; мало места занимают методы 1, 2, 7. Наибольшая точность принадлежит методу 3, который является дорогостоящим, занимает много места, неудобен в использовании и влияет на процесс формирования инея. Чаще других в настоящее время применяется метод 5 однолинейного измерения путем анализа фотографий бокового вида, несмотря на ограниченную точность, высокую стоимость и большие габариты.

Измерение **температуры поверхности инея** необходимо для экспериментального определения коэффициента его теплопроводности  $\lambda_{и}$ , а также для уточнения методик расчета плотности  $\rho_{и}$ , в которых используются данные о температурах. В разных методиках наряду с плотностью  $\rho_{и}$  используются некоторые сочетания температур: воздуха  $t_{в}$ , холодной поверхности  $t_{п}$ , поверхности инея  $t_{пи}$ , средней температуры инея  $t_{им}$  или же разность  $t_{пи} - t_{п}$ . Из-за отсутствия специальных методов и средств измерения коэффициента  $\lambda_{и}$  чаще всего на основе опытных данных его определяют по формуле:

$$\lambda_{и} = \frac{q}{(t_{пи} - t_{п}) \cdot \delta_{и}}$$

Удельный тепловой поток  $q$  находят по тепловому балансу для холодной поверхности. Точное измерение температур  $t_{пи}$  и  $t_{п}$  вызывает затруднения из-за рыхлости инея, неровной его поверхности и перемещения верхней границы слоя (роста толщины  $\delta_{и}$ ). Возлагались большие надежды на бесконтактные методы измерения температур. Инфракрасный метод измерения оказался малоэффективным из-за высокой отражательной способности кристаллов инея и рассеяния инфракрасного потока. Поиск точных средств измерения отрицательных температур шероховатых и пористых поверхностей требует дальнейшего продолжения.

### Заключение

В данной работе рассмотрены особенности образования инея на поверхности плоских пластин и трубчато-ребристых теплообменников. Изложены трудности, которые возникают при определении плотности инея  $\rho_{и}$ , массы инея  $M_{и}$ , объема инея  $V_{и}$ , толщины слоя инея  $\delta_{и}$  и температуры поверхности инея  $t_{пи}$ . Рассмотрены восемь методов определения толщины слоя инея  $\delta_{и}$ , оценены их

преимущества и недостатки. С целью получения собственных экспериментальных данных, авторы склоняются к выбору метода, который предусматривает получение цифрового образа бокового вида с применением камер машинного зрения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Singh V. Development of an advanced heat exchanger model for steady state and frosting conditions. Dissertation submitted to the Faculty of the Graduate School of the University of Maryland, College Park, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. 2009. 244p.
2. Bayrak E., Çaglayan A., Konukman A., "Experimental Investigation of Frost Formation in a Finned-Tube Evaporator under Simulated Real Operation Conditions" (2016). International Refrigeration and Air Conditioning Conference. Paper 1660.
3. Haijie Q., Weizhong L., Bo D., Zhihai Z., Weiyang Z. Experimental study of the characteristic of frosting on low-temperature air cooler. *Experimental Thermal and Fluid Science* 55 (2014) 106–114.
4. Aljuwayhel N. F. Numerical and Experimental Study of the Influence of Frost Formation and Defrosting on the Performance of Industrial Evaporator Coils. A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy (Mechanical Engineering) at the university of Wisconsin-Madison. 2006. 288p.
5. Напалков Г. Н. Тепло-массоперенос в условиях образования инея. – М. Машиностроение, 1983. С. 189.
6. da Silva D.L., Hermes C.J.L., Melo C. Experimental study of frost accumulation on fan-supplied tube-fin evaporators. *Applied Thermal Engineering* 31 (2011) 1013–1020.
7. Design and analysis of experiments / Douglas C. Montgomery, Arizona State University. Ninth edition. | Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., [2017] P. 748.
8. Ribeiro R., Hermes C., da Silva, D. Thermal-Hydraulic Optimization of Fan-Supplied Tube-Fin Evaporators for Frosting Conditions Aiming at Minimum Energy Consumption. 2018. International Refrigeration and Air Conditioning Conference. Paper 1841.
9. Yan W-M., Li H-Y., Tsay Y-L. Thermofluid characteristics of frosted finned-tube heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48 (2005) 3073–3080.
10. Ribeiro R. S., Hermes C.J.L. Algebraic modeling and thermodynamic design of fan-supplied tube-fin evaporators running under frosting conditions. *Applied Thermal Engineering* 70 (2014) 552-559.
11. Кошелев В. Л., Ейдеюс А. И., Кошелев С. В. Анализ данных о плотности инея, образующегося на охлаждаемых поверхностях // Вестник Международной академии холода. 2022. № 3. С. 80–88. DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-3-80-88.
12. Cui J., Li W.Z., Liu Y., Zhao Y.S. A new model for predicting performance of fin-and-tube heat exchanger under frost condition. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 32 (2011) 249–260.
13. Lenic K., Trp A., Frankovic B. Transient two-dimensional model of frost formation on a fin-and-tube heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 52 (2009) 22–32.
14. Léoni A., Mondot M., Durier F., Revellin R., Haberschill P. State-of-the-art review of frost deposition on flat surfaces. *International journal of refrigeration* 68 (2016) 198–217.
15. Iragorry J., Tao Y.-X., Jia S. (2004) Review Article: A Critical Review of Properties and Models for Frost Formation Analysis, *HVAC&R Research*, 10:4, 393-420.
16. Qu K., Komori S., Jiang Y. Local variation of frost layer thickness and morphology. *International Journal of Thermal Sciences* 45 (2006) 116–123.
17. Xiaomin Wu, Wantian Dai, Wangfa Xu, Liming Tang. Mesoscale investigation of frost formation on a cold surface. *Experimental Thermal and Fluid Science* 31 (2007) 1043–1048.
18. Guo X.-M., Chen Y.-G., Wang W.-H., Chen C.-Z. Experimental study on frost growth and dynamic performance of air source heat pump system. *Applied Thermal Engineering* 28 (2008) 2267–2278.
19. Liping X., Xianmin G., Zhen X. Experimental Study of Frost Growth Characteristics on Surface of Fin-tube Heat Exchanger. *Energy Procedia* 105 (2017) 5114 – 5121.
20. Song M., Dang C. Review on the measurement and calculation of frost characteristics. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 124 (2018) 586–614.
21. Sankaranarayanan K. P. Study of frost growth on heat exchangers used as outdoor coils in air source heat pump systems. Submitted to the Faculty of the Graduate College of the Oklahoma State University in partial fulfillment of the requirements for the Degree of doctor of philosophy. May, 2011. 206 p.

22. Storoni A. Development of an experimental facility for measurement of frost growth on finned tube heat exchangers. Graduation thesis. Politecnico di Milano. School of Industrial and Information Engineering. Master of Science in Energy Engineering. Anno Accademico 2017 – 2018. 114 p.

23. de Aguiar M. L., Gaspar P. D., da Silva P. D. Frost Measurement Methods for Demand Defrost Control Systems: A Review. Proceedings of the World Congress on Engineering 2018 Vol II. WCE 2018, July 4-6, 2018, London, U.K. 7 p.

24. Mengjie S., Chaobin D., Shengchun L., Zhili S., Ning M. Frost layer thickness measurement and calculation: A short review. Energy Procedia 142 (2017) 3812 – 3819.

## **METHODS FOR DETERMINING FROST PARAMETERS ON THE SURFACE OF LOW-TEMPERATURE AIR COOLERS WITH FLAT FINS**

<sup>1</sup>Koshelev Sergey Valerjevich, Ph.D., Head of LRCRS

<sup>2</sup>Eideyus Algirdas Iozapovich, Ph.D., Mentor consultant

<sup>1,2</sup>Baltic Fishing Fleet State Academy FSBEI HE "KSTU",  
Kaliningrad, Russia, e-mail: kaf\_xktk@bgarf.ru

*This work is devoted to the analysis of data on the process of frost formation and the search for modern methods for determining the main parameters of frost on the surface of low-temperature air coolers. The features of determining the density, mass, surface temperature and thickness of the frost layer are considered. Eight methods for experimentally determining the thickness of a layer of frost on a flat and tubular-ribbed surface are presented and evaluated. Based on the results of the analysis, a method suitable for application in the developed experimental setup is selected.*

УДК 621.01

## **ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ТОРЦЕВОГО УПЛОТНЕНИЯ ПРОЕКТИРУЕМОГО ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА**

<sup>1</sup>Кункевич Сергей Владимирович, канд. техн. наук, доцент

<sup>2</sup>Ермаков Александр Юрьевич, инженер-конструктор, студент

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,  
Калининград, Россия, e-mail: SKunkevich@mail.ru

<sup>2</sup>ООО «КТМЗ», Калининград, Россия, e-mail: eay@balt-energo.ru

*Используя программные средства CAD и CAE построена модель торцевого уплотнения центробежного насоса с использованием в парах трения колец из силицированного графита. Расчетным путем проведены исследования передачи теплоты от пар трения к деталям насоса. Произведен расчет величин максимальной температуры в плоскости трения от частоты вращения вала насоса.*

### **Введение**

В центробежных насосах со сквозным валом конструктору необходимо решить задачу минимизации утечки перекачиваемой жидкости из рабочей полости насоса. Поэтому практически всегда



в центробежных насосах предусматривается уплотнение вала, которое является барьером между рабочим телом внутри насоса, находящимся под давлением, и атмосферой.

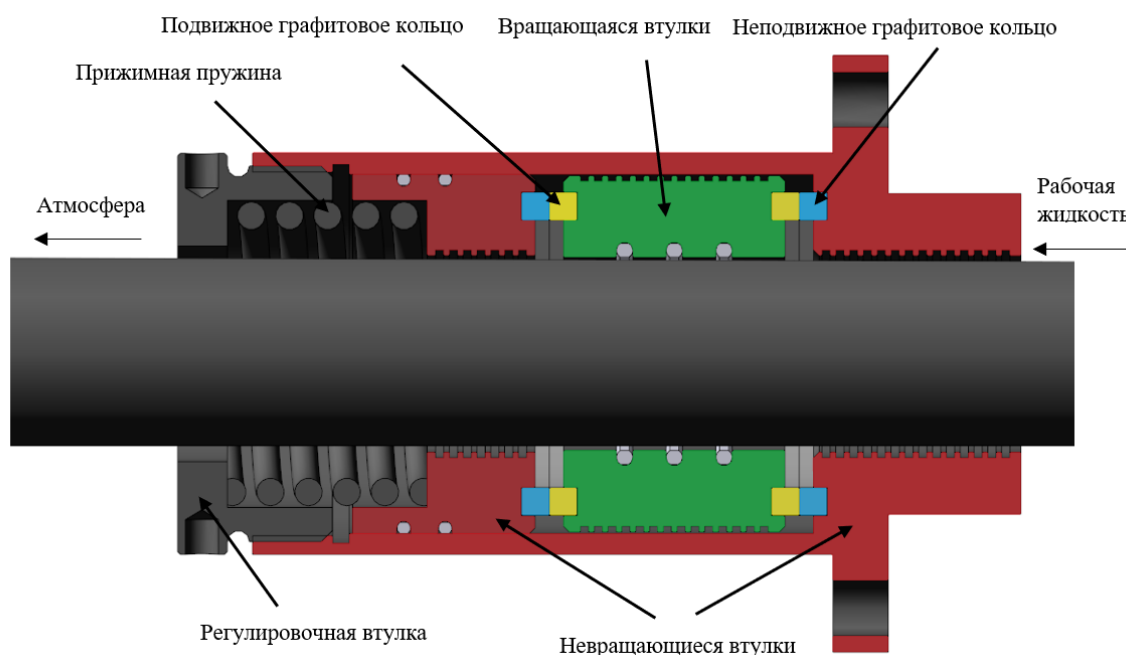
Должная работа уплотнения обеспечивает расчетные характеристики центробежного насоса, предотвращает утечку рабочего тела, особенно, если оно является горючим или токсичным. Но как только уплотнение теряет герметичность, насос практически выходит из строя, поэтому важность уплотнения вала никогда нельзя недооценивать при проектировании, эксплуатации и техническом обслуживании насоса.

## 1. Принцип работы торцевого уплотнения

Существует огромное количество типов уплотнений вала, отражающих многообразие типов насосов, поэтому решения по уплотнению нужно находить исходя из конкретной ситуации. Наиболее часто уплотнение вала включает в себя вращающуюся и неподвижную часть. При оптимальной конструкции насоса и соблюдении необходимых технических условий сборки, вращающаяся часть движется по смазочной пленке толщиной всего 250 нм. Если пленка становится значительно толще, происходит утечка перекачиваемой жидкости. Если пленка становится значительно тоньше, возрастают потери на трение, контактные поверхности перегреваются, что приводит к износу поверхностей уплотнения и нарушению герметизации.

В нашем случае из всего этого многообразия выбор пал на торцевой тип уплотнения. Торцевое уплотнение состоит из вращающейся и неподвижной части. Вращающаяся часть прижимается в осевом направлении к неподвижной части. Торцевое уплотнение, по сути, представляет собой дроссель, смонтированный по валу. Оно сводит к минимуму вероятность утечки из рабочей полости насоса.

На рисунке 1 представлен вариант торцевого уплотнения для разрабатываемого центробежного насоса. Уплотнение состоит из металлических втулок, пружины и графитовых колец трения.



Рас. 1 Торцевое уплотнение в разрезе

Вращающаяся часть уплотнения установлена на валу насоса и вращается в жидкости во время работы насоса. Неподвижная часть крепится на корпусе насоса, а графитовые кольца вклеены во втулки. Рабочая жидкость, утечку которой необходимо предотвратить, контактирует с внутренней кромкой вращающегося кольца уплотнения. Когда вал начинает вращение, разница давлений между перекачиваемой средой в корпусе насоса и в атмосфере заставляет среду проникать в зазор уплотнения между двумя плоским вращающимися поверхностями. Образуется смазочная пленка.

При этом давление в зазоре уменьшается в радиальном направлении от давления рабочей жидкости до атмосферного. Из-за давления в смазочной пленке возникает размыкающее усилие. Для противодействия ему в конструкции существует пружина, сила сжатия которой направлена в противоположную сторону к размыкающему усилию.

Если торцевое уплотнение функционирует должным образом, и жидкость не просачивается, это означает, что смазочная плёнка испаряется под действием тепла, и давление в зазоре уплотнения понизилось. Соответственно, жидкость не просачивается через уплотнение.

## 2. Моделирование работы торцевого уплотнения в режиме сухого трения

Одним из самых серьёзных моментов во время работы торцевого уплотнения, является режим сухого трения, когда работа происходит без смазочной плёнки. Это наиболее интересный режим для исследования теплообмена, ведь без интенсивного отвода тепла, вызванного трением графитовых колец, может возникнуть разрушение пар трения и нарушение работы не только уплотнения, но и всего насоса в целом.

Для моделирования температурного режима работы торцевого уплотнения был произведен его конструкторский расчет по существующей методике и подготовлена трехмерная геометрическая модель в среде КОМПАС-3D [3]. Все дальнейшие расчёты выполнены при помощи специализированной CAE системы COMSOL Multiphysics 6.0 [2].

Проведение расчёта начинается с определения глобальных параметров рассчитываемой модели: частота вращения 2980 об/мин, прижимное усилие пружины 270 Н, температура перекачиваемой воды 85 °С. Характеристики материалов выбираются из существующих справочников и внутренней библиотеки программного пакета. В качестве материала для втулки была выбрана конструкционная сталь, для колец трения – силицированный графит СГ-П, клей – эпоксидный.

На рисунке 2 представлена подготовленная геометрическая модель для расчёта методом конечных элементов. Для более удобного и функционального расчета модель была приведена к упрощённому виду.

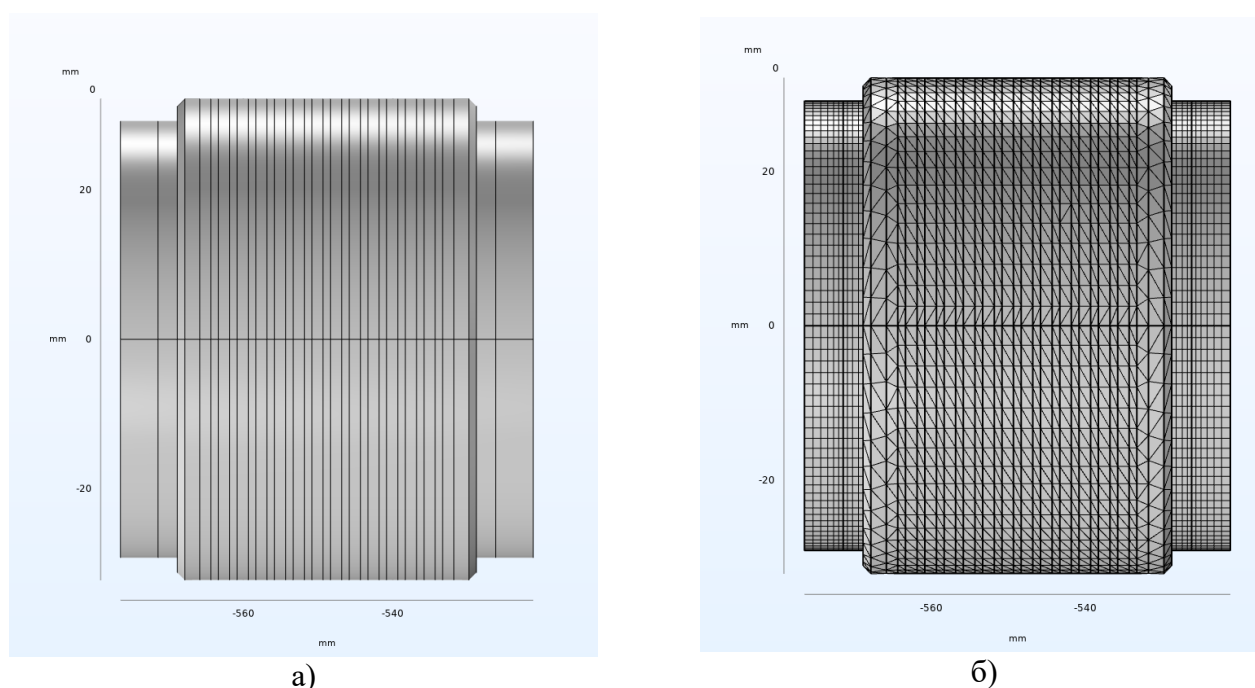


Рис. 2 Подготовленная для расчётов геометрическая модель:  
а) общий вид с упрощением несущественных деталей;  
б) построенная оптимизированная сетка

В модели уплотнения металлическая втулка и вклеенные в нее графитовые кольца (в центре) вращаются с заданной частотой, а два других кольца (крайние) остаются неподвижными. К одному

из неподвижных колец приложено расчетное прижимное усилие.

На рисунке 3 представлена визуализация расчета, выполненного методом конечных элементов. Рисунок демонстрирует распределение температуры в уплотнении, при этом бросается в глаза резкий контраст по уровням температур графитовых колец (пар трения) и вращающейся втулки, через которую осуществляется основной отвод теплоты через вал к перекачиваемой воде. С учетом отвода теплоты температура повысилась до  $148^{\circ}\text{C}$ , в то время как температура втулки осталась близкой к температуре перекачиваемой воды – около  $90^{\circ}\text{C}$ . Из этого можно судить об ухудшенной теплопередаче от графитовых колец к втулке.

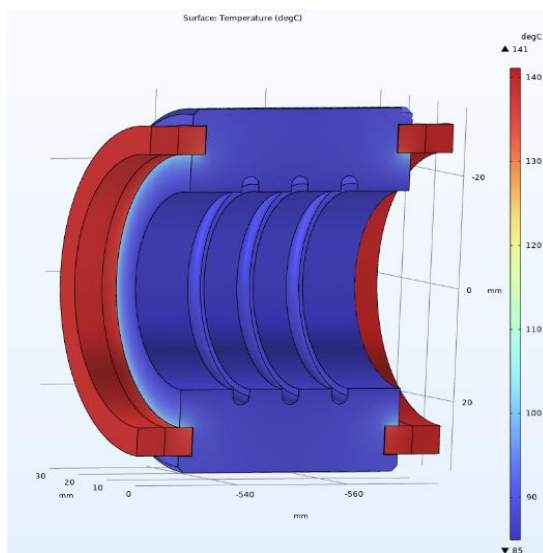


Рис. 3 Визуализация результатов расчета в разрезе

Поскольку расчет производился в 3D модели, результатом является трехмерный массив температур во всех элементах модели. Поэтому мы можем рассмотреть передачу теплоты (распределение температур) от графитовых колец к металлической втулке и далее через вал к перекачиваемой воде на одномерных графиках, сформированных посредством секущих линий, проходящих через графитовые кольца и втулку, рисунок 4.

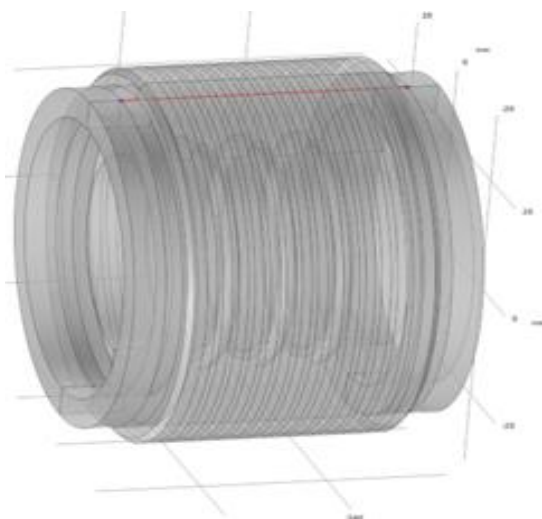


Рис. 4 Расположение секущих линий на модели

Первая секущая линия, показанная на рисунке 4, проходит от плоскости тепловыделения первой пары трения поверх образующей колец через металлическую втулку ко второй паре трения. Вторая и третья секущие линии (на рисунке не указаны) проходят эквидистантно через середину и внутреннюю образующую обоих колец и, соответственно, через втулку.

Графики, представленные на рисунке 5, наглядно демонстрирует распределение температуры в модели. Температурный разрыв в месте контакта графитовых колец и металлической втулки свидетельствует о наличии значительного температурного сопротивления, причиной которого является клеевой слой, а также значительного теплового потока [1]. Справочные значения коэффициента теплопроводности эпоксидного клея в диапазоне температур от 295 до 355 К составляют от 0,43 до 0,52 Вт/(м·К), что подтверждает изоляционные свойства материала.

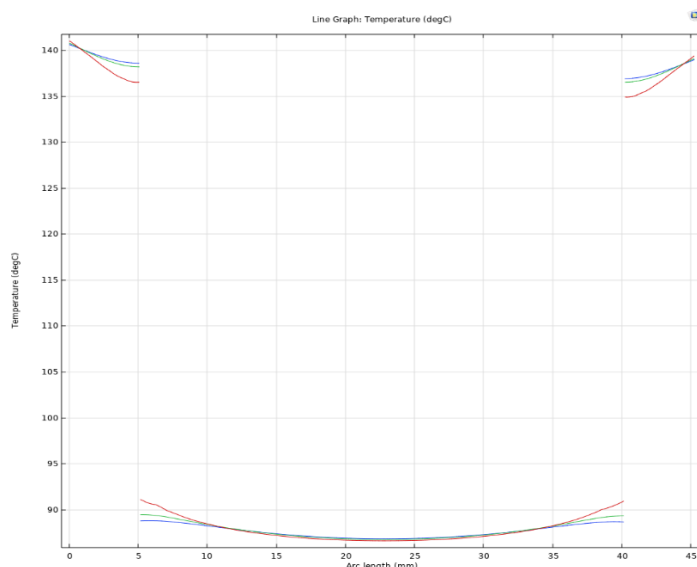


Рис. 5 Распределение температуры в модели

Чем ближе к валу находятся секущие линии, тем ниже абсолютный уровень температур и температурный перепад между кольцами и втулкой.

Главными параметрами, которые влияют на интенсивный разогрев графитовых колец, являются как физические характеристики силицированного графита (коэффициент трения равен 0,04, коэффициент теплопроводности равен 112 Вт/(м·К)), так и рабочие характеристики уплотнения, например, частота вращения. Изначально модель была просчитана на номинальную частоту 2980 об/мин. Но, поскольку насос может использоваться совместно с частотно регулируемым приводом, представляет интерес температурный режим уплотнения с переменной частотой вращения. Произведя параметрический расчет модели с изменением частоты вращения от 500 до 3000 об/мин, получена линейная графическая зависимость максимальной температуры в плоскости трения колец от частоты вращения, которая представлена на рисунке 5.

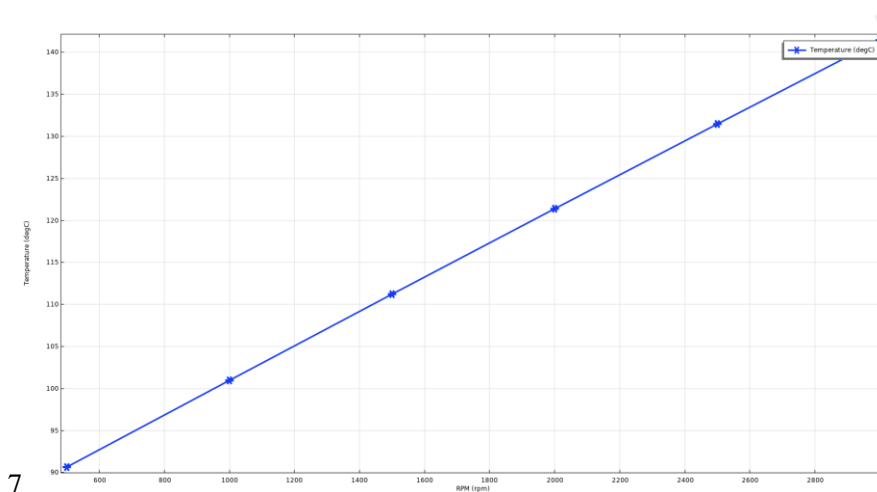


Рис. 5 График зависимости максимальной температуры в плоскости трения в зависимости от частоты вращения ротора насоса

## Заключение

1. Элементами торцевого уплотнения, работающими в очень тяжелых температурных условиях и подверженными механическому износу, являются пары трения. Поэтому выбор материала должен быть обоснован соответствующим расчетом на температурный режим и на механический износ.

2. Клеевой слой является практически изолятором, препятствующим отводу тепла от колец трения, вследствие чего графит нагревается до опасных значений, что может привести к износу колец и их разрушению. Для уменьшения температурного разрыва в термическом контакте следует применять клеи с повышенным коэффициентом теплопроводности, например, с добавками графита или металла.

3. Максимальная температура графитовых колец в плоскости трения имеет прямую линейную зависимость от частоты вращения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов В.М. Теплообмен через соединения на клеях. М., «Энергия», 1974. – 304 с.
2. Введение в Comsol Multiphysics, 2020. – 209 с.
3. Азбука КОМПАС-3D, 2018. – 451 с.

## TEMPERATURE CONDITION OF OPERATION OF THE END SEAL OF THE DESIGNED CENTRIFUGAL PUMP

<sup>1</sup>Kunkevich Sergey Vladimirovich, Ph.D. tech. Sciences, Associate Professor

<sup>2</sup>Ermakov Alexander Yurievich, design engineer, student

<sup>1</sup>Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education

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

<sup>2</sup>KTMZ LLC, Kaliningrad, Russia, e-mail: eay@balt-energo.ru

*Using CAD and CAE software tools, a model of the mechanical seal of a centrifugal pump was built using siliconized graphite rings in friction pairs. By calculation, studies of heat transfer from friction pairs to pump parts were carried out. The calculation of the values of the maximum temperature in the friction plane from the frequency of rotation of the pump shaft was made.*

## ПРЕЦИЗИОННЫЕ БЕСПРОКЛАДОЧНЫЕ ТОРЦЕВЫЕ УПЛОТНЕНИЯ КОРПУСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МНОГОСТУПЕНЧАТЫХ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ

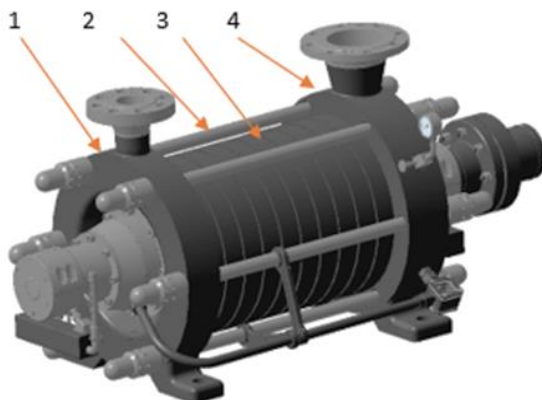
<sup>1</sup>Кункевич Сергей Владимирович, канд. тех. наук, доцент кафедры энергетики

<sup>2</sup>Толмачев Александр Викторович, канд. тех. наук, доцент кафедры энергетики

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,  
Калининград, Россия, e-mail: <sup>1</sup>skunkevich@mail.ru; <sup>2</sup>avtol03071952@mail.ru

*Многоступенчатые центробежные насосы (МЦН) имеют ряд неоспоримых преимуществ при их использовании в энергетических системах различных теплоэнергетических объектов.*

Высокий КПД, высокая надежность, широкий диапазон расходов и напоров делают МЦН незаменимыми для перекачки различных маловязких жидкостей, системах питательной воды, подачи топлива теплосиловых установок (рис. 1).



*Рис. 1. Центробежный секционный насос:*

- 1) напорная корпус-крышка; 2) шпилька; 3) корпус промежуточной ступени (секция);  
4) корпус-крышка нагнетания*

Незаменимым конструктивным узлом МЦН является торцевое кольцевое уплотнение корпуса насоса между секциями (рис.2). Герметичность такого соединения обеспечивается за счет тщательной обработки (притирки) и высоких контактных давлений сопрягаемых поверхностей. Особенно высокое напряжение возникает в последней секции, где давление рабочей жидкости наиболее велико и в некоторых конструкциях достигает 15 МПа и более. Такие рабочие давления вынуждают применять для обеспечения уплотнения высоконапряженные шпильки, стягивающие приемную и напорную крышки. В имеющейся технической литературе для герметичности торцевого беспрокладочного уплотнения приводятся коэффициенты запаса удельного контактного усилия для стали по отношению к давлению рабочей жидкости, составляющие от 2,7 до 3,2 [1]. Чрезмерный и малообоснованный запас удельного давления приводит к дополнительным деформациям и повышенным напряжениям материала корпуса и стягивающих шпилек. Тем самым повышается вероятность обрывов шпилек и образования трещин и течей на корпусных деталях. Как указано ранее, уплотнительная способность контактирующих поверхностей зависит от геометрических размеров и чистоты обработки поверхностей. В выполненных конструкциях ширина уплотнительного пояса составляет от 5 до 30 мм. Чем больше ширина пояса, тем выше герметичность соединения, однако для большого пояса необходимы и бóльшие усилия для создания необходимого давления в контакте. Чистоте обработки поверхностей не уделяется должного внимания, они выполняются с чистотой

как позволяет имеющееся станочное оборудование, поэтому, для создания герметичности требуются чрезмерные усилия в контакте.

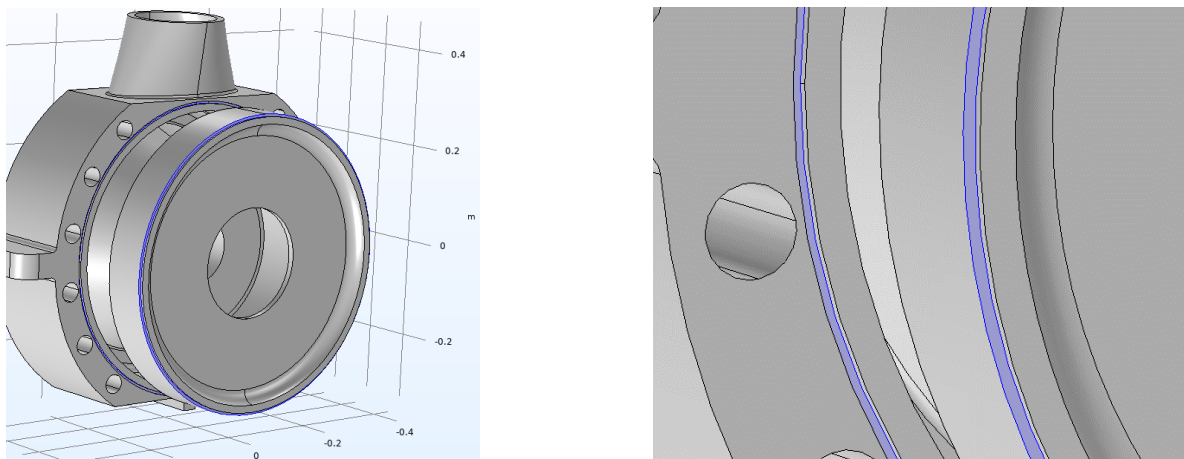


Рис. 2. Торцевое кольцевое уплотнение крышки насоса и секции. Уплотнительные пояски выделены цветом.

При контакте уплотнительных поверхностей зазор между ними представляет собой микролабиринт, образованный смыканием двух шероховатых поверхностей. При движении по лабиринту со случайным характером направления течения длина пути жидкости по лабиринту будет существенно больше течения по радиусу. Толщина лабиринта также будет переменным по пути движения параметром. Модель такого течения была рассмотрена в работах [2], [3] и [4]. При этом, в результате обработки экспериментальных данных были получены две эмпирические зависимости, сходные по структуре, но отличающиеся коэффициентами и соответственно численными результатами. Графики, построенные по этим зависимостям, приведены на рис. 3 и 4. На всех графиках снизу - вверх  $\Sigma R_a = 0.063, 0.08, 0.10, 0.125, 0.16, 0.20, 0.25, 0.32, 0.40$  – мкм

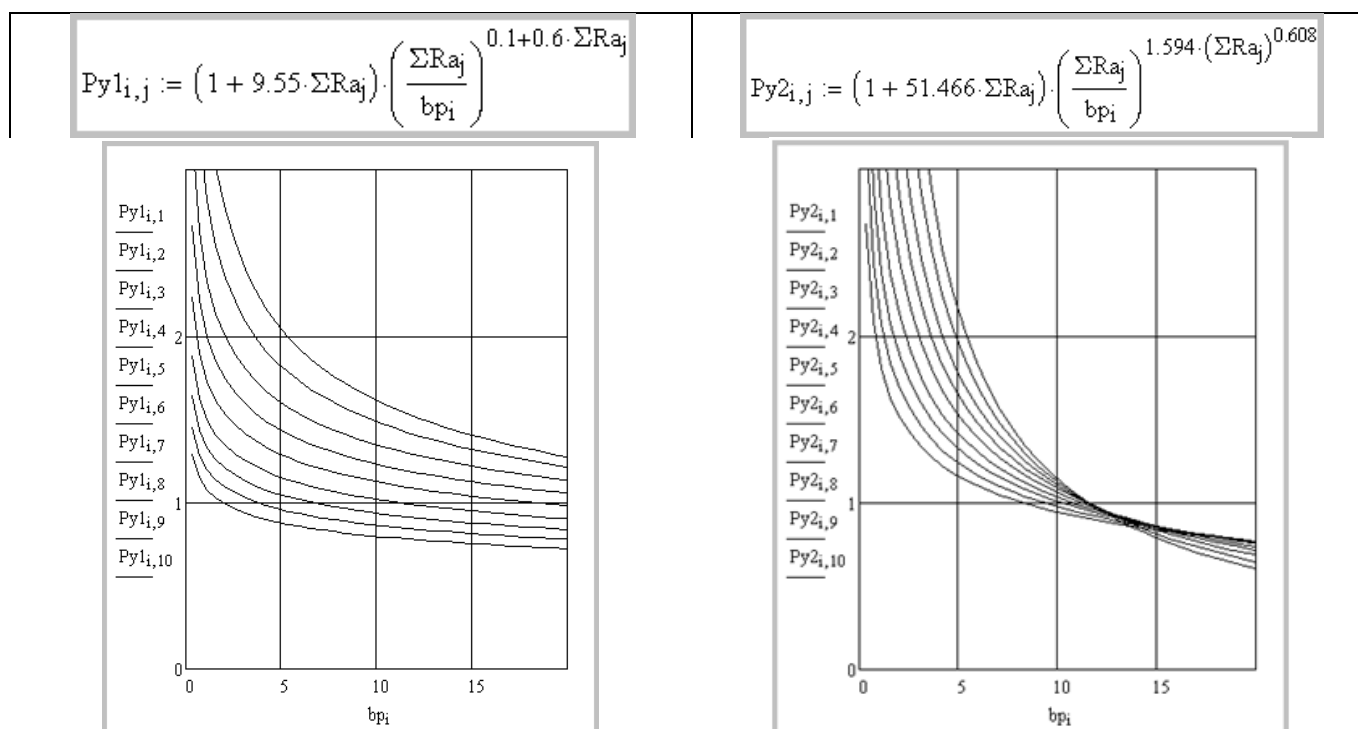


Рис. 3. Зависимость относительного уплотняющего усилия от чистоты сопрягаемых поверхностей и ширины контактного пояска

Рис. 4. Зависимость относительного уплотняющего усилия от чистоты сопрягаемых поверхностей и ширины контактного пояска



Модель 1 (рис.3) разработана применительно к распылителям форсунок для уплотнительных поясков шириной  $b_n = 0,2 - 0,8$  мм и суммарной шероховатостью  $\Sigma R_a = 0,08 - 0,16$  мкм. Использование данной модели применительно к торцевым уплотнениям МНЦ даёт нереальные (ошибочные) результаты. Для поясков с повышенной чистотой обработки расчетное давление в контакте оказывается меньше давления уплотняемой жидкости, что логически не приемлемо. Кроме того, в экспериментальных данных по модели 1 не содержались опыты с относительным контактным усилием  $P_k < 1$ , поэтому зону ниже  $P_k = 1$  для торцевых уплотнений МНЦ следует считать недостоверной.

Модель 2 (рис. 4) разработана применительно к торцевым уплотнениям плунжерных пар и нагнетательных клапанов топливных насосов высокого давления. Для данной модели характерны уплотнительные пояски шириной  $b_n = 10 - 25$  мм и суммарной шероховатостью  $\Sigma R_a = 0,32 - 0,63$  мкм. На графике видно, что часть линий с повышенной частотой обработки так же протекает в зоне менее  $P_k = 1$ . В связи с указанными недостатками предпринята попытка усовершенствовать модель торцевого уплотнения. Из обоих уравнений выбраны расчетные точки со значениями  $P_k > 1$ . Полученные массивы объединены и обработаны с учетом формулы с горизонтальной асимптотой  $P_k = 1$ . В результате обработки получена формула, не имеющая отмеченных недостатков и обладающая большей простотой. В универсальную формулу включена конструкция (симплекс) в виде отношения суммарной шероховатости к ширине уплотнительного пояска. Точность универсальной модели естественно снизилась до 10-15%, однако все значения уплотняющего усилия стали выше, чем у моделей 1 и 2, то есть универсальная формула обладает численным запасом, что позволяет применять её во всех случаях. Универсальная зависимость приведена на рис.5.

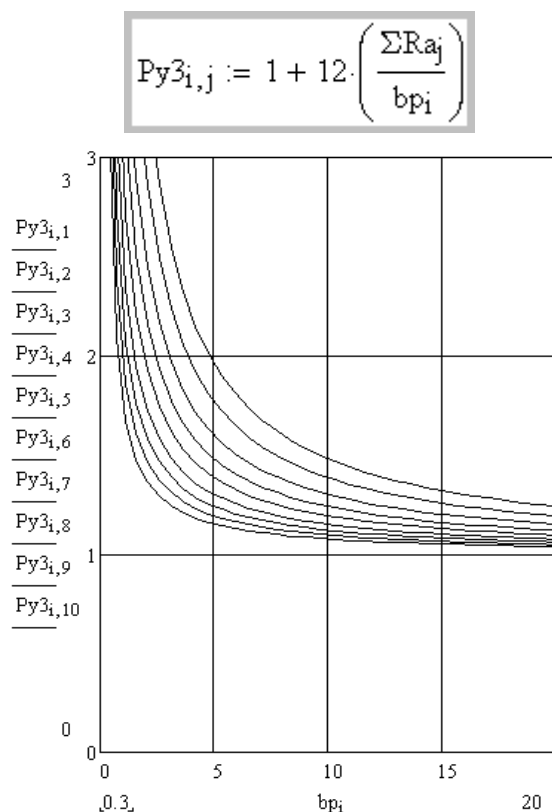


Рис.5. Универсальная зависимость относительного уплотняющего усилия от чистоты сопрягаемых поверхностей и ширины контактного пояска

Универсальная формула и графики показывают, что для достижения необходимого уплотняющего усилия целесообразно повышать чистоту обрабатываемых контактирующих поверхностей, что снизит нагрузку на стягивающие шпильки, уменьшит напряжения в деталях корпуса и снизит деформации.

Расчетное уплотняющее усилие должно создаваться равномерно каждым участком кольцевого уплотнения. В реальности, когда количество стягивающих шпилек ограничено, возникает неравномерность. В районе приложения давления гаек, контактное давление усиливается, а в промежутках между гайками давление снижается. Таким образом, неравномерность обжатия контактного кольца



может вызвать повышенные утечки в области малых давлений. Для установления степени влияния количества шпилек на неравномерность обжатия контактного кольца необходим расчет деформаций и напряжений объемной (3-D) модели крышки МЦН.

3-D модель напорной крышки разработана с применением графического пакета «Компас». Контактные напряжения в уплотнительном пояске рассчитаны методом конечных элементов. На рис. 5 представлена схема приложения сил стягивающими шпильками и противодействующими силами внутреннего давления со стороны перекачиваемой среды для питательного насоса с давлением 13 МПа. Общее тяговое усилие, создаваемое шпильками, составляет 5797 кН. Величина внутреннего давления насоса принята как 1,5 от рабочего и составляет 19,5 МПа (пробное давление). В качестве материала корпусных элементов принята легированная сталь 20X13 со следующими характеристиками: предел текучести  $\sigma_T = 700$  МПа; модуль упругости  $E = 214$  ГПа; коэффициент Пуассона  $\mu = 0,3$ ; плотность стали  $\rho = 7660$  кг/м<sup>3</sup>.

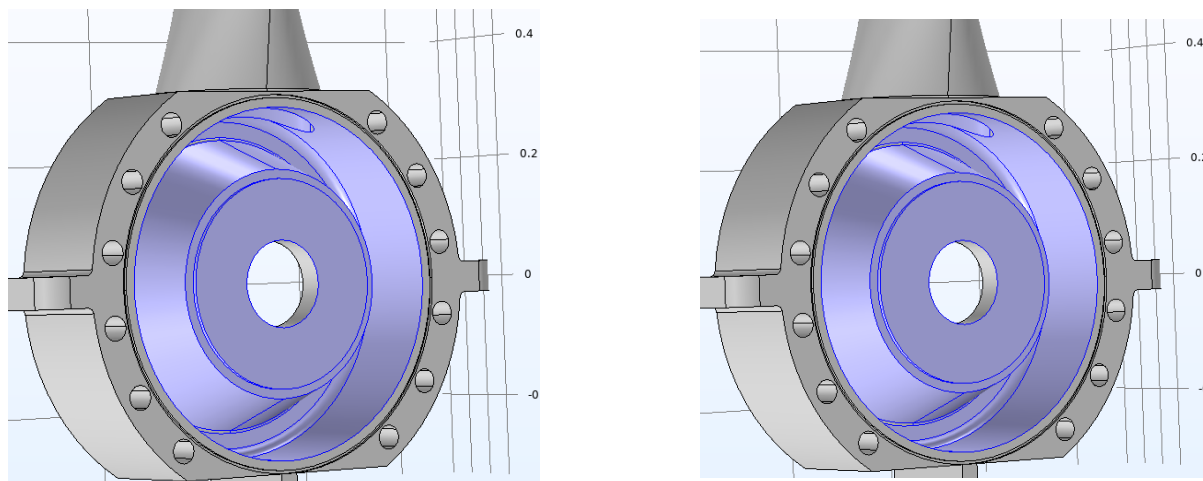


Рис. 5. Места приложения сил от стягивающих шпилек а) и воздействия внутреннего давления от перекачиваемой среды б).

На рис. 6. Представлена общая картина распределения напряжений по Мизесу в зоне контактного пояска на напорной крышке. Уровни напряжений распределены неравномерно по радиусу пояска и в целом сложно судить о том, насколько данная конструкция обеспечивает герметичность. В связи с этим было принято решение выделить характерные зоны контактных поверхностей в окрестности зоны прижима шпильки и между шпильками, рис. 7.

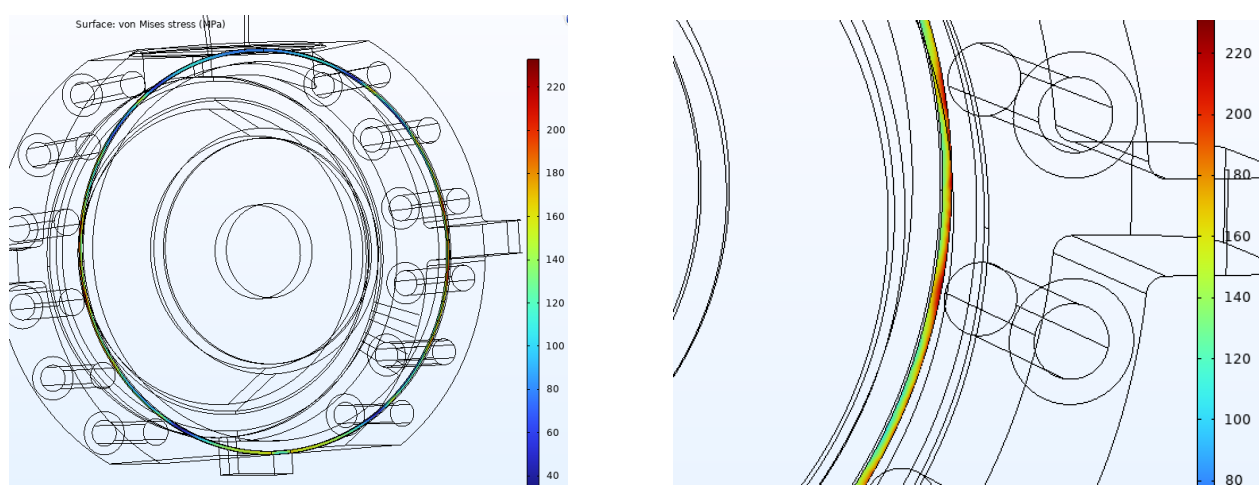


Рис. 6. Общая картина распределения напряжений по Мизесу, МПа, в зоне контактирующих поверхностей напорной крышки и секции корпуса насоса.

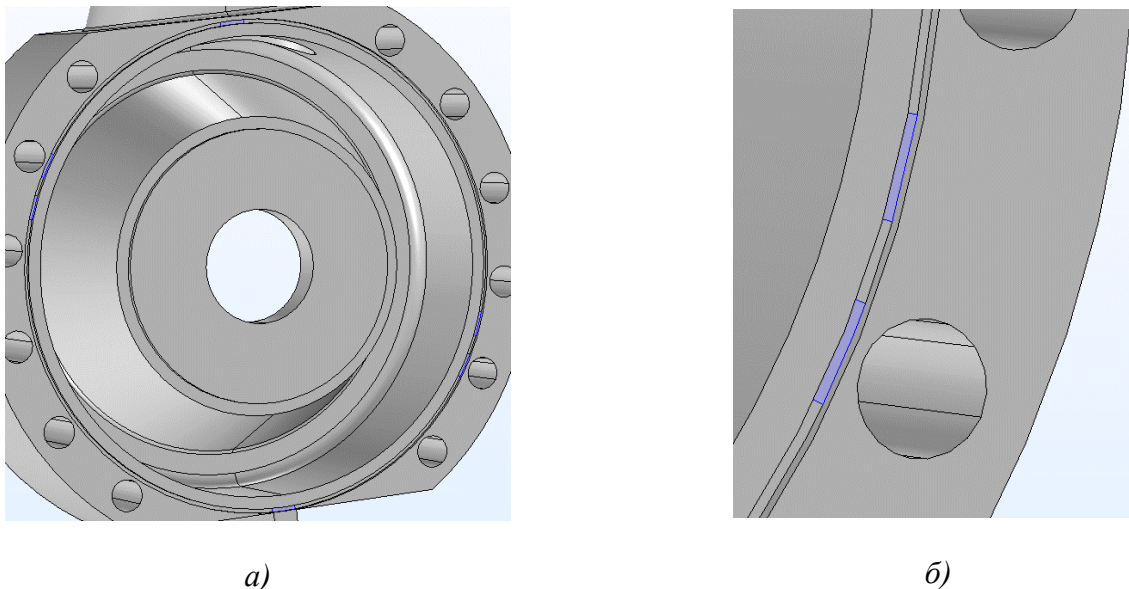


Рис. 7. Расположение характерных зон для определения усредненного напряжения в месте контакта напорной крышки и секции насоса: а) общая картина; б) расчетная зона под гайкой шпильки и между шпильками.

Всего выделено 6 зон для вычисления усредненных напряжений: в середине зон, где невозможно размещение шпилек по конструктивным особенностям (вверху и внизу крышки), а также в зоне прижима шпильки и между шпильками (б) (в двух местах справа и по диагонали, если смотреть со стороны стыка).

Для выяснения влияния количества шпилек на состояние контактных поверхностей в стыке между напорной крышкой и корпусной секцией насоса, составлены программные модели и произведены вычисления напряжений в характерных зонах для 6 вариантов с количеством шпилек 4, 6, 8, 10, 12 и 14 штук. Результаты вычислений представлены в таблице 1.

№ п/п	Количество шпилек	Напряжение по Мизесу, МПа					
		Верх	Низ	Под шпилькой (справа)	Под шпилькой (слева по диагонали)	Между шпильками (справа)	Между шпильками (слева по диагонали)
1	4	88,5	83,5	132,6	121,2	82,4	80,7
2	6	77,6	103,2	104,8	98,8	100,9	93,8
3	8	78,1	117,1	151,1	146,5	136,3	138,2
4	10	78,8	124,5	153,3	141,8	145,2	141,9
5	12	79,6	129,1	150,3	136,4	143,8	134,8
6	14	80,4	132,5	176,5	171,5	159,7	159,3

Как видно из таблицы, давление в зоне контакта под воздействием гайки шпильки значительно превосходит давление между шпильками, и эта разница увеличивается по мере увеличения расстояния между шпильками (уменьшения их количества) из-за деформации фланца вследствие упругости металла. В зонах «верх» и «низ» крышки наблюдается пониженное давление в зоне контакта вследствие значительного удаления исследуемых зон от прижимных шпилек. Кроме того, эти зоны конструктивно ослаблены наличием горизонтального среза внизу, особенно ослабленным является верхняя часть крышки вследствие прохождения выходного канала рабочей среды (утонение толщины крышки и снижение ее жесткости).

При анализе таблицы 1 видна общая тенденция увеличения давления в зонах под шпильками и между шпильками при увеличении их количества (общее стягивающее усилие при этом остается

неизменным). Заметны некоторые отклонения от общей тенденции, которые можно объяснить сложной геометрией конструкции, при которой усилия от внутреннего давления распределяются неравномерно, а также тем фактом, что характерные зоны расчета усредненных напряжений являются «плавающими» из-за изменения геометрии при расчете различного количества шпилек.

На основании проделанной работы следует сделать несколько выводов.

1. Для снижения нагрузок на детали корпуса и шпилек необходимо повышать качество обработки сопрягаемых поверхностей

2. Количество стягивающих шпилек необходимо делать как можно больше, исходя из их конструктивного размещения.

3. Каждую конструкцию торцевого уплотнения проверять на деформации, напряжения и герметичность.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марцинковский В.А. Гидродинамика и прочность центробежных насосов. В.А. Марцинковский, М. Машиностроение, 1970. - 272 с.

2. Кузькин. Расчет уплотняющих усилий и утечек в неподвижных прецизионных соединениях топливной аппаратуры дизелей / В.Г. Кузькин. Сб. научн. тр. КТИРПХ Калининград, 1980, - Вып.80. - С .62-72.

3. Патент РФ № 2 629 847 от 23.03.2013. Распылитель форсунки для дизеля. Автор Кузькин В.Г.

4. Минько А.А. Методика определения уплотняющего усилия в торцевых прецизионных разъёмах ТНВД. Сб. научн. тр. КГТУ, Калининград, 1994. - С .57-61.

## PRECISION GASKETLESS MECHANICAL SEALS HOUSING ELEMENTS OF MULTISTAGE CENTRIFUGAL PUMPS

<sup>1</sup>Kunkevich Sergey Vladimirovich, Ph.D., associate professor

<sup>2</sup>Tolmachev Alexander Viktorovich, Ph.D., associate professor

<sup>1,2</sup>Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,

e-mail: <sup>1</sup>skunkevich@mail.ru; <sup>2</sup>avtol03071952@mail.ru

*Multistage centrifugal pumps have a number of undeniable advantages when they are used in the energy systems of various heat and power facilities.*

УДК 621

## РЕАЛИЗАЦИЯ ПИТАНИЯ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ СЖИЖЕННЫМ ГАЗОМ

<sup>1</sup>Ореховский Евгений Михайлович, аспирант, ст. лаборант кафедры энергетики

<sup>2</sup>Толмачев Александр Викторович, канд. тех. наук, доцент кафедры энергетики

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,

Калининград, Россия, e-mail: <sup>1</sup>evgenij.orekhovskij@klgtu.ru; <sup>2</sup>avtol03071952@mail.ru

*Представлены первичные результаты эксперимента по работе дизельного двигателя NVD-24 на смеси дизельного топлива и сжиженного нефтяного газа. Также показана схема экспериментального стенда для реализации процесса смешения и подачи смешанного, приведены и описаны достигнутые ре-*

зультаты. Целью описанной работы является доказательство того, что работа двигателя внутреннего сгорания на сжиженном газе по дизельному циклу возможна.

На сегодняшний день большинство транспортных и стационарных дизельных установок, которые используют сжиженный газ в качестве основного топлива, работают по следующему принципу. Топливо в газообразной фазе подается в цилиндр на такте сжатия. Воспламенение горючей смеси происходит за счет впрыска небольшого количества (1-2% от массы газа) дизельного топлива, после чего происходит воспламенение жидкого топлива, а затем – горючей смеси. Так как горючая смесь предварительно приготовлена её воспламенение происходит взрывным образом. Давление резко возрастает, а затем начинается расширение (рабочий ход). Это означает, что такой двигатель работает при сгорании при постоянном объеме (по циклу Н. Отто), потому что в цилиндре происходит предварительное смесеобразование, как в бензиновых двигателях. Как известно, цикл Отто имеет повышенные температуры сгорания и не отличается высоким термодинамическим КПД в отличие от дизельного цикла. Поэтому была поставлена задача обеспечить работу двигателя на сжиженном газе, но при этом сохранить работу по циклу с подводом теплоты при постоянном давлении (цикл Г.В. Тринклера - цикл работы дизельных двигателей).

Для выполнения этой задачи необходимо сделать так, чтобы горение газового топлива в камере сгорания имело равномерный характер, а не взрывной. Это можно обеспечить только впрыском газа под высоким давлением в камеру сгорания, после чего топливо будет постепенно перемешиваться с воздухом, а под воздействием высокой температуры самовоспламеняться и гореть. Но проблема состоит в том, что газовое топливо, такое как метан, пропан, бутан и пр., имеет температуру самовоспламенения существенно больше, чем у дизельного топлива. Поэтому при простом впрыске газа в камеру сгорания двигателя нет полной уверенности в том, что газ будет самовоспламеняться также как и дизельное топливо, что ставит под сомнение возможность стабильной работы двигателя.

Температуры самовоспламенения разных видов топлив приведены в табл. 1.

Для решения этой проблемы возникло предложение растворить в сжиженном газе некоторое количество дизельного топлива, которое будет теоретически воспламеняться в первую очередь и впоследствии воспламенит газовую фазу топлива.

Таблица 1

### Параметры горючих газов и дизельного топлива

Вид топлива	Давление жидкой фазы, бар	Плотность жидкой фазы, кг/м <sup>3</sup>	Температура самовоспламенения, °С
Дизельное топливо	1	840	230
Пропан	16	505	466
Бутан	1.5	580	429
Этан	38	560	515
Метан	-	416	537

Чтобы проверить работоспособность этой модели, был модернизирован экспериментальный стенд на базе трехцилиндрового дизельного двигателя NVD-24. Сам двигатель остался без конструктивных изменений, модернизации подверглась лишь часть топливной системы – к топливопроводу ведущему к ТНВД было подсоединено специально сконструированное смесительное устройство, в котором возможно осуществить смешение дизельного и газового топлив в различных пропорциях. В нашем случае газовым топливом является пропан-бутановая смесь в соотношении 1:1.

Принципиальная схема и фотография смесительного узла показаны на рис. 1 и 2.

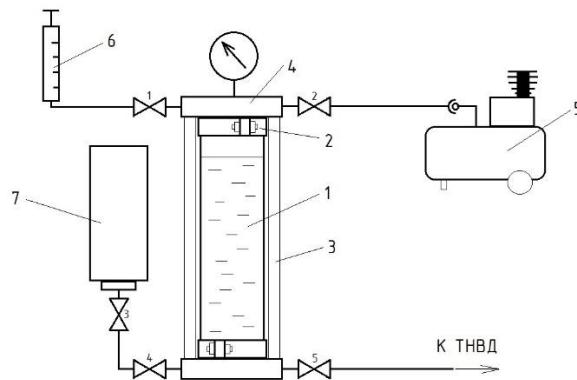


Рис. 1. Принципиальная схема устройства смесителя

1 – Смесительный аккумулятор 700 мл.; 2 – Стяжной хомут; 3 – Резьбовая шпилька;  
 4 – Фланец-крышка; 5 – Воздушный компрессор с ресивером;  
 6 – Поршневой дозатор дизельного топлива (150 мл.); 7 – Газовый баллон.

Эксперимент проводился в следующей последовательности.

- заливка дизельного топлива (краны 1 и 5 открыты, краны 2, 3, 4 закрыты. Через шприц дозатор 6 дизельное топливо заливается в смесительный аккумулятор 1.

- двигатель запускается штатно сжатым воздухом и прогревается до рабочей температуры на частоте 600 об/мин и без нагрузки.

- двигатель останавливается, доливается необходимое количество дизельного топлива, так чтобы смесительный аккумулятор был заполнен наполовину.

- Подключение газового баллона 7 и заливка в аккумулятор пропано-бутановой смеси. Для этого кран 1 закрывается и открывается кран 2. Компрессором 5 в аккумулятор подается давление воздуха 4 бар, что примерно равно давлению газа в баллоне 7. После, открываются краны 3 и 4, из шприца 6 удаляется поршень и немного приоткрывается кран 1, так чтобы давление в емкости очень медленно падало. Тем самым достигается медленный выход воздуха в атмосферу, а газ из баллона начинает медленно перетекать в емкость, заполняя ее. Кран 1 закрывается, когда емкость будет полностью заполнена. Так как сжиженный газ обладает меньшей плотностью, чем дизельное топливо (Табл. 1), то при подаче, газ будет подниматься сквозь толщу жидкости и тем самым перемешиваясь с дизельным топливом. Смесь получилась однородного цвета и консистенции без расслоений, это свидетельствует о безграничной растворимости пропано-бутановой смеси с ДТ.

- После заполнения аккумулятора, краны 3 и 4 закрываются, компрессором 5 создается давление равное 6 бар. Оно необходимо для того, чтобы вовремя всасывания топливной смеси плунжерной парой в ТНВД не происходило образование пузырьков газа, иначе топливный насос не сможет осуществить полноценную подачу топлива к форсунке. Это давление было определено в ходе эксперимента.

- двигатель готов к работе на газодизельной смеси, запускается в штатном порядке.



Рис. 2. Монтажа смесительного устройства на двигателе NVD-24

После пуска двигателя установлена частота вращения 600 об/мин, так же как и при работе на дизельном топливе. Была зафиксирована стабильная устойчивая работа двигателя на холостом ходу, без посторонних шумов. Сравнительные параметры: максимальное давление сгорания, температура выхлопных газов, температура охлаждающей воды на выходе из цилиндра приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Параметры работы двигателя NVD-24 на дизельном топливе на газодизельной смеси**

Параметр	Работа на ДТ	Работа на газодизельной смеси
Рабочие обороты, об/мин	600	600
Степень нагрузки, %	0	0
Максимальное давление сгорания $P_z$ , кг/см <sup>2</sup>	48	46
Температура выхлопных газов, °С	135	150
Температура охлаждающей воды в цилиндре, °С	34	37

Как видно из таблицы 2, параметры работы двигателя на газодизельной смеси практически идентичны параметрам работы двигателя на дизельном топливе. Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что при работе двигателя с впрыском газодизельной смеси в объемной пропорции 1:1 происходит более плавное продолжительное горение топлива, поэтому значение  $P_z$  ниже, а температура выхлопных газов выше по сравнению работой на ДТ (рис.2, 4)

При этом, было установлено, что рейка ТНВД, при работе на газодизельной смеси, имеет смещение в сторону увеличения подачи. Это объясняется меньшей плотностью смеси по сравнению с ДТ. Таким образом, штатная конструкции ТНВД не позволит создать цикловую подачу для обеспечения номинальной мощности.



Рис. 3. Показания термометра выхлопных газов



Рис. 4. Показания термометра охлаждающей воды в головке цилиндра

**Вывод:** проведенный эксперимент показал, что в рядовом дизельном двигателе возможно организовать сгорание смеси горючего газа в жидкой фазе с дизельным топливом по циклу Тринклера с высоким КПД. При этом двигатель работает устойчиво без пропусков вспышек. Важно уточнить, что впрыск смеси выполнялся через штатную пружинную форсунку. То есть при модернизации двигателя изменения в его конструкции будут минимальны.



## DIESEL ENGINE POWER SUPPLY LIQUEFIED GAS

<sup>1</sup>Orekhovskii Evgeniy Mihaylovich, PhD student, senior laboratory assistant of the Department of "Energy"

<sup>2</sup>Tolmachev Alexander Viktorovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of "Energy"

<sup>1,2</sup>Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,  
e-mail: <sup>1</sup>evgenij.orekhovskij@klgtu.ru; <sup>2</sup>avtol03071952@mail.ru

*This article presents the primary results of an experiment on the operation of the NVD-24 diesel engine on a mixture of diesel fuel and liquefied petroleum gas. The scheme of the experimental stand for the implementation of the mixing process and the supply of mixed is also shown, the results achieved are presented and described. The purpose of the described work is to prove that the operation of an internal combustion engine on liquefied gas on a diesel cycle is possible.*

УДК 621.43.068.4 / 629.052.9

### **ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КЛАПАНАМИ СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ**

<sup>1</sup>Русаков Сергей Михайлович, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой электрооборудования и автоматики судов

<sup>2</sup>Кондратенко Владислав Сергеевич, курсант

<sup>1,2</sup>Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ», Калининград, Россия, e-mail: <sup>1</sup>rusakov.sm@bgarf.ru; <sup>2</sup>kondratenkov6@gmail.com

*Целью работы является разработка предложений, обеспечивающих повышение надежности и безопасности работы системы управления клапанами системы очистки отработавших газов судовых дизелей. Новизна определяется тем, что впервые на основе опыта эксплуатации системы обоснован выбор более надежных запорных клапанов и предложена схема их взаимной блокировки, исключая возникновение аварийной ситуации. Основные выводы: используемые системы очистки выхлопных газов судовых дизелей нуждаются в модернизации, в частности, в замене клапанов на более надежные и удобные в эксплуатации и обслуживании и в совершенствовании их системы управления.*

С 1 января 2020 года действуют поправки к приложению VI Международной конвенции по предотвращению загрязнения с судов (Конвенция МАРПОЛ), ограничивающие предельное содержание серы в судовом топливе величиной равной 0,5% [1].

Для снижения содержания в выхлопных газах диоксида серы SO<sub>2</sub> и других вредных окислов SO<sub>x</sub>, помимо использования более дорогих низкосернистых топлив, у судовладельцев есть и другие варианты. Можно переоборудовать двигательные установки под использование сжиженного природного газа или очищать выхлопные газы судов, продолжая использовать недорогое высокосернистое топливо.

Способ очистки выхлопных газов на больших судах – грузовых, танкерах, круизных лайнерах и паромах с одним или несколькими двигателями реализуется посредством специально разработанных современных систем для судовых дизельных двигателей (EGCS) [2]. Они основаны на запатентованной технологии для различных загрязнителей, являются гибкими, компактными и простыми в установке. Поставляются в различных конфигурациях: разомкнутого типа (open loop), за-

мкнутые (closed loop) и гибридные (hybrid). Системы очистки выхлопных газов обеспечивают строгие требования по выбросам в зонах контроля выбросов (ECAS), или в зонах контроля выбросов серы (SECAs). В этих морских районах установлены более строгие меры контроля для минимизации выбросов в воздух с судов, как определено Приложением VI Протокола МАРПОЛ 1997 года.

Метод удаления выбросов SO<sub>x</sub> основан на процессе мокрой очистки в скрубберной башне (скруббере). Выбросы SO<sub>x</sub> улавливаются и нейтрализуются морской водой. Скруббер – это химический реактор для абсорбции загрязняющих веществ, содержащий один или несколько насадочных слоев и форсунки распыления заборной воды. Морская вода подается в башню на разных стадиях очистки как в верхней части насадки, так и в нижней. Реакция фактической нейтрализации оксида серы происходит в основном в набивочном слое (слоях). Капельный сепаратор (демистер) установлен в верхней части скруббера.

Системы разомкнутого контура (open loop) используют только морскую воду для нейтрализации SO<sub>2</sub>, содержащегося в выхлопных газах, без использования химических агентов. Вариант с разомкнутым контуром отличается простотой и гибкостью как с точки зрения установки благодаря ограниченному количеству компонентов, так и с точки зрения эксплуатации и обслуживания. Башня (скруббер), где происходит процесс удаления SO<sub>2</sub> (DeSO<sub>x</sub>), изготавливается из коррозионно-стойкого сплава. В этой системе часть морской воды прокачивается через впускной блок контроля мутности, а сбрасываемая вода - через блок контроля воды (БКВ) и затем уходит за борт.

В режиме разомкнутого контура в качестве технологической воды используется морская вода. Щелочность – соленость и карбонаты - действуют как технологические реагенты для снижения содержания оксидов серы (SO<sub>x</sub>) до желаемого уровня. Использование заборной воды снижает температуру и скорость потока газа. Конструкция скруббера обеспечивает интенсивное смешивание заборной воды и выхлопного газа для обеспечения перехода SO<sub>2</sub> в заборную воду благодаря его естественному сродству с бикарбонатной/карбонатной составляющей заборной воды. Система с разомкнутым контуром устроена как прямоточная, с одинарным впрыском заборной воды. В скруббере происходит поглощение продуктов сгорания, затем эта вода обрабатывается для удаления из нее механических примесей и сливается за борт. Шлам задерживается на борту для отдельной утилизации. Системы разомкнутого типа представляют собой наиболее экономичное решение с точки зрения капитальных и операционных затрат для соответствия нормам по выбросам.

Системы гибридного исполнения специально разработаны для удовлетворения особых требований в отношении отвода промывочной воды. Системы этого типа могут работать в режиме разомкнутого или замкнутого контура. В разомкнутом контуре удаление SO<sub>x</sub> регулируется только прокачкой морской воды, в то время как в замкнутом контуре удаление SO<sub>x</sub> управляется добавлением реагента (каустической соды или карбоната натрия) в промывную воду. Система может легко переключаться между работой в режиме разомкнутого и замкнутого контура.

Система очистки разомкнутого типа с системой управления была проверена в эксплуатации на контейнеровозе «RIO CENTAURUS». На это судно для прохождения преддипломной плавательной практики был направлен курсант электромеханической специальности, один из соавторов этой работы. Контейнеровоз был построен в 2010 году, ходит под флагом Marshall Is, его грузоподъемность составляет 3426 TEU (показатель одной TEU равен объему 20-футового контейнера), количество рефрижераторных розеток - 500, общая длина судна (LOA) - 228,62 метра, ширина - 32,22 метра.

К системе очистки выхлопных газов подключены следующие элементы энергетической установки судна:

Главный двигатель:

Тип, марка MAN B&W 8K80MC-C;

Количество и мощность, кВт 1x28880;

Частота вращения, об/мин 104;

Вспомогательные двигатели:

Тип, марка дизель/МАК 8M25 x 2, МАК 6M25;

Количество и мощность, кВт 2 x 2800, 1 x 3000;

Частота вращения, об/мин 720.

Основные технические характеристики системы очистки представлены в таблицах 1 и 2.



### Характеристики расхода выхлопных газов судна Rio Centaurus

Параметр установки для сжигания топлива	Главный двигатель MAN B&W 8K80MC-C	Вспомогательный двигатель МАК 6M25	Вспомогательный двигатель МАК 8M25
Массовый расход выхлопных газов при расчетной нагрузке, кг/ч	184 070	18 063	14 138
Массовый расход выхлопных газов при полной нагрузке, кг/ч	252 148	30 108	23 563

Таблица 2

### Параметры системы очистки выхлопных газов

Производитель	Langh Tech, Финляндия
Модель, тип	Разомкнутого типа
Набивочные слои	2 шт.
Размеры, мм, включая изоляцию D x h	4 900 x 15 030
Сухой вес, кг	26 000
Материал	245 SMO (нерж. сталь)

Система очистки рассчитана на 73% от максимальной мощности по главному двигателю и на 60% от максимальной мощности по вспомогательным двигателям.

Аварийный дизель-генератор, инсинератор и паровой котел не подключены к системе очистки выхлопных газов. Для них используются низкосернистые виды топлива.

Система управления выполнена на программируемых логических контроллерах (ПЛК) с распределенными устройствами ввода/вывода и всеми компонентами, подключенными к промышленной сети Ethernet с использованием MODBUS TCP в качестве протокола связи. В систему также входят операторские посты, регистратор данных и подсистема контроля параметров.

На рис.1 представлена структурная схема системы управления. На схеме обозначены:

- V108, V106, V104, V102 - клапаны на линии прямого отвода выхлопных газов (без очистки);
- V107, V105, V103, V101 - клапаны на линии отвода выхлопных газов на очистку в скруббер;
- 100P1A, 100P1B – основной и резервный вентиляторы с частотно управляемым электроприводом для подачи воздуха к клапанам V108 ... V101;
- 200P1, 200P2 – насосы с постоянной производительностью для подачи воды к форсункам скруббера;
- 300P1 – насос с частотно управляемым электроприводом для подачи воды к форсункам верхней и нижней частей скруббера;
- PT130 – датчик давления воздуха, подаваемого к клапанам V108 ... V101;
- PT140, PT141, PT142, PT143 – датчики давления выхлопных газов;
- TT101, PT101 – датчики температуры и давления выхлопных газов на входе в скруббер;
- TT102, PT102 – датчики температуры и давления очищенных выхлопных газов на выходе из скруббера;
- CEMS SO<sub>2</sub>, CEMS CO<sub>2</sub>, CEMS RATIO – датчики контроля содержания SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> и их соотношения к воздуху в очищенных выхлопных газах на выходе из скруббера;
- TT201, PT207, TOTAL FLOW, SAMPLE FLOW, TURBIDITY - датчики температуры и давления, расхода, расхода отбираемой пробы, мутности (прозрачности) воды, поступающей в скруббер;
- FT301, FT302, PT310 - датчики расхода и температуры воды, подающейся в форсунки средней и верхней частей скруббера;
- TT201, PT207, TOTAL FLOW, SAMPLE FLOW, TURBIDITY - датчики температуры, давления, общего расхода, расхода отбираемой пробы, мутности (прозрачности) воды, поступающей в скруббер;
- TT211, SAMPLE FLOW, pH, TURBIDITY, TURBIDITY DIFF, TEMPERATURE - датчики температуры, расхода отбираемой пробы, общей и дифференциальной мутности (прозрачности), температуры воды, выходящей из скруббера;
- V218, V1219 – сливные клапаны скруббера.

На схеме также обозначены кнопки управления подачей выхлопных газов в скруббер MODE SELECT, индикаторы включения клапанов подачи RUNNING SCRUBBER и индикаторы выключения подачи STOPPED BYPASS от главного двигателя ME LOAD и вспомогательных дизель-генераторов GE1 LOAD, GE2 LOAD и GE3 LOAD.

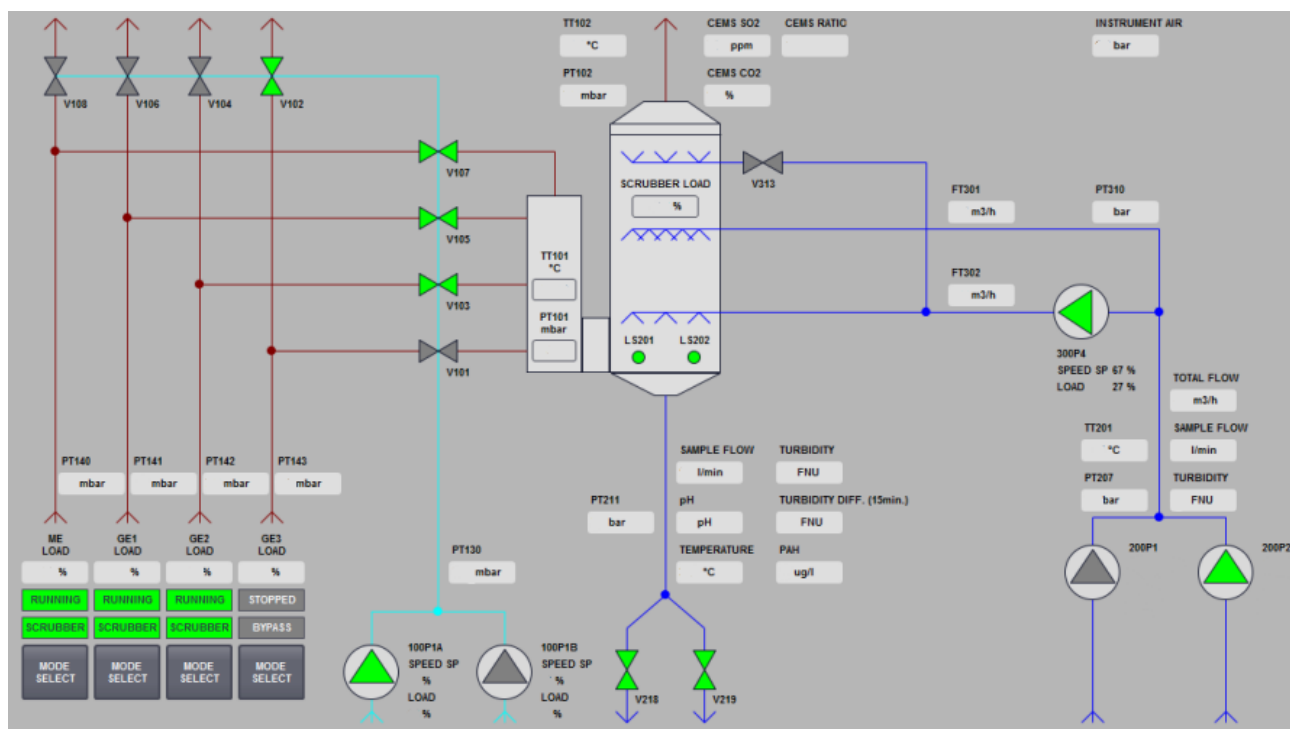


Рис. 1. Структурная схема системы управления скруббером

В технологическом процессе очистки выхлопных газов предусмотрено две линии выпуска отработавших газов: одна - без отчистки и вторая - с очисткой, непосредственно через скруббер. Для корректной работы этих двух линий нужно обеспечить перепуск газов и полную герметизацию при запираии клапанов. Для этого использованы воздушно-управляемые клапаны с двумя заслонками, между которыми подается воздух для удержания клапана в закрытом положении.

Для подачи воздуха установлены два идентичных вентилятора (100P1A, 100P1B), производительностью 1450 м<sup>3</sup>/ч, подающих воздух в линию запираии клапанов перепуска выхлопных газов. Питаются приводы непосредственно от главного распределительного щита. Для регулирования давления в воздушной системе посредством изменения количества оборотов, установлен частотный преобразователь VACON. В автоматизированном режиме управление осуществляется оператором при помощи ПЛК. Уставка задается на панели управления. В автоматическом режиме специальное программное обеспечение производителя оборудования определяет режим работы по таблицам, согласно нагрузке на скруббер.

Клапаны закрываются не одной, а двумя заслонками, установленными параллельно на одном валу и движущимися синхронно. При этом, между двух заслонок, создается полость, в которую подается воздух от вентиляторов. Для контроля давления запирающего воздуха, в полости установлен датчик давления. Для полной герметизации линии, в закрытом положении заслонки должны быть строго перпендикулярно линии трубопровода. В противном случае будет утечка запирающего воздуха.

Клапаны снабжены устройствами для удерживания клапана в крайних положениях «ОТКРЫТО» и «ЗАКРЫТО». На стационарной части клапана присутствует упорная пластина для ограничения движения клапана. На подвижной части клапана, неподвижно закреплено упорное коромысло, которым клапан упирается в упорные пластины в крайних положениях. Настройка производится закручиванием или выкручиванием соответствующего упорного болта и контргайкой. На корпусе клапана есть дополнительное устройство подвода с заслонкой для подачи запирающего воздуха. Оно механически связано с силовым приводом клапана посредством телескопической штанги и открывается (закрывается) синхронно с запирающим клапаном.

Силовой привод клапана является пневматическим и имеет собственную линию подвода воздуха от главных пусковых ресиверов через воздушный редуктор. Поворот привода осуществляется за счет перепускания воздуха высокого давления в соответствующую камеру на открытие (закрытие). Воздух толкает поршень, на котором находится гребенка, а гребенка, в свою очередь, поворачивает зубчатое колесо с валом, на котором находятся заслонки клапана.

Индикация открытия и закрытия клапана осуществляется посредством концевых выключателей. Поршень внутри силового привода в крайних положениях нажимает на концевой выключатель, соответствующий открытию (закрытию) клапана, за счет чего срабатывает сигнализация на панели управления скруббера.

Управление контрольным воздухом осуществляется электромагнитными клапанами из ЦПУ с панели управления скруббером.

В процессе технической эксплуатации системы очистки выхлопных газов и ее системы управления производства фирмы «Langh Tech» во время прохождения практики на контейнеровозе «Rio Centaurus» были обнаружены следующие недостатки в работе системы.

Недостаточная надежность запорных клапанов. Поток выхлопных газов от дизельных агрегатов неравномерный, выхлопные газы выходят в выхлопной тракт с сильной пульсацией. Эти пульсации воздействуют на заслонки запорных клапанов в ударном режиме, а так как клапаны, в силу своих конструктивных особенностей, не имели четкого позиционирования в закрытом положении, настройки клапана уходили. Примерно раз в неделю требовалась дополнительная настройка заслонок по причине падения давления запирающего воздуха в них. Из-за падения давления запирающего воздуха возникала сильная вибрация незакрытых заслонок, так как усилия привода не хватало для удержания их в закрытом положении. Вибрация приводила к преждевременному износу элементов клапана.

В силу конструктивных особенностей используемых в системе клапанов, они не имели фиксации в закрытом положении. Из-за этого настройка сильно усложнялась, так как отклонение заслонки могло произойти в любую сторону от закрытого положения. Затруднялся процесс настройки также тем, что работать приходилось рядом с горячими выхлопными трубами.

Клапаны, открывающие подачу запирающего воздуха, так же имели заводской дефект. За 6 месяцев были заменены два таких клапана по причине прогорания дросселя клапана. Согласно документации дроссель этого клапана выполнен из нержавеющей стали, однако, проблема систематически проявлялась.

Было выявлено отсутствие взаимной блокировки перепуска между линией прямотока и линией отчистки выхлопных газов. То есть, управляя системой, в случае закрытия прямотока, также можно закрыть и линию очистки через скруббер. Таким образом, возможно полное перекрытие выхлопного тракта, которое может повлечь остановку дизельного агрегата (потерю хода или обесточивание), а также разгерметизацию системы отвода выхлопных газов из-за увеличения давления.

На основе анализа имеющихся материалов, по результатам технической эксплуатации были разработаны предложения по модернизации системы управления системой очистки выхлопных газов. Они состоят в следующем. Во-первых, предлагается замена используемого воздушно-запираемого клапана на клапан Air sealing damper Type D/D производства фирмы Swedamper (Швеция). Он имеет более надежную конструкцию, которая позволяет исключить большую часть проблем, выявленных в ходе эксплуатации скруббера от компании Langh Tech.

Согласно спецификации производителя, заслонки с воздушным уплотнением на 100% герметичны с полостью для воздушного уплотнения. Серия 150/200-D состоит из двух отдельных заслонок, собранных вместе в одном корпусе и обеспечивает надежное запираение. Серия 150/200-DT представляет собой конструкцию типа «сэндвич», то есть две заслонки клапана с одним валом, обеспечивающие максимальную прочность при малом весе и короткой монтажной длине.

Дроссель клапана подачи запирающего воздуха выполнен не из нержавеющей стали, а из титанового сплава. Этим решается проблема прогорания дросселя в запорном клапане.

Так же, данный клапан имеет четкую фиксацию в закрытом положении посредством кольцевых упоров для заслонок. Кольцевые упоры выполнены в виде выдающихся из основного диаметра выступов, в которые упираются заслонки. Тем самым решается проблема с частой разгерметизацией системы запорного воздуха. При такой конструкции регулировка значительно упрощается, так как клапан имеет четкое конечное положение и может выйти за пределы уставки только в одну сторону, а именно немного приоткрыться.

Благодаря используемым материалам при производстве этого клапана он выдерживает температуры выхлопных газов до 1100 °С и давление до 1.5 Бар.

Клапан имеет аналогичную, используемую в настоящее время клапану, систему управления подачей воздуха высокого давления для поворота заслонок и другую систему индикации в открытом (закрытом) положении. Система индикации основана на использовании слаботочных сигналов и малогабаритных концевых выключателей внутри индикатора положения клапана.

Индикаторы положения поворотных клапанов серии VPI являются компактными и прочными для размещения в пограничных и сложных условиях. Эти универсальные устройства имеют визуальную индикацию положения, а также два внутренних концевых выключателя. Шпоночные кулачки с пружинной нагрузкой не требуют сложного инструмента для быстрой и точной настройки. Доступна серия VPI с механическими или бесконтактными выключателями. Механические модели имеют два концевых выключателя SPDT (однополюсный на два направления). Бесконтактные модели имеют два полупроводниковых индуктивных концевых выключателя исключающих необходимость в контакте кулачка с выключателем. Уровень защиты IP67 гарантирует влагозащиту.

Данный индикатор устанавливается непосредственно на вал силового привода. Механически соединяется с его валом посредством пазового соединения. На валу индикатора установлены два эксцентрика нажимающих на концевые выключатели согласно положениям самого клапана.

Так же, на основе этого индикатора возможна реализация на ПЛК схемы взаимной блокировки перепуска газов. То есть при закрытии клапана прямотока, блокируется закрытие клапана подачи выхлопных газов в скруббер. Это повысит надежность и безопасность эксплуатации системы перепуска. При ее использовании исключается возможность закрытия обоих клапанов на одной линии.

Схема взаимной блокировки на основе реле представлена на рис.2. Эта схема не допускает одновременного включения двух реле, что достигается введением в цепь обмотки каждого из них размыкающих контактов другого. Например, если время срабатывания реле P1 меньше, чем время срабатывания реле P2, то при одновременном нажатии двух кнопок K11 и K21 срабатывает только реле P1 и своими контактами размыкает цепь обмотки реле P2.

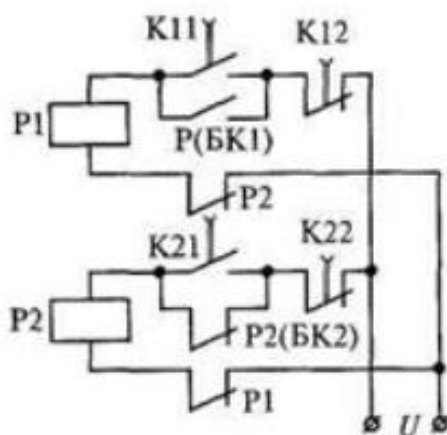


Рис.2. Схема взаимной блокировки на основе реле

На рис.3 представлена схема взаимной блокировки работы запорных клапанов, выполненная с использованием программного обеспечения Zelio Soft 2 [3]. Это бесплатное программное обеспечение для интеллектуальных реле Zelio Logic, предназначенное для управления простыми системами автоматизации. Программа позволяет задавать программу буквенным кодом или в схематическом виде с использованием логических элементов. Для наглядности выбран вариант схемы с логическими элементами.

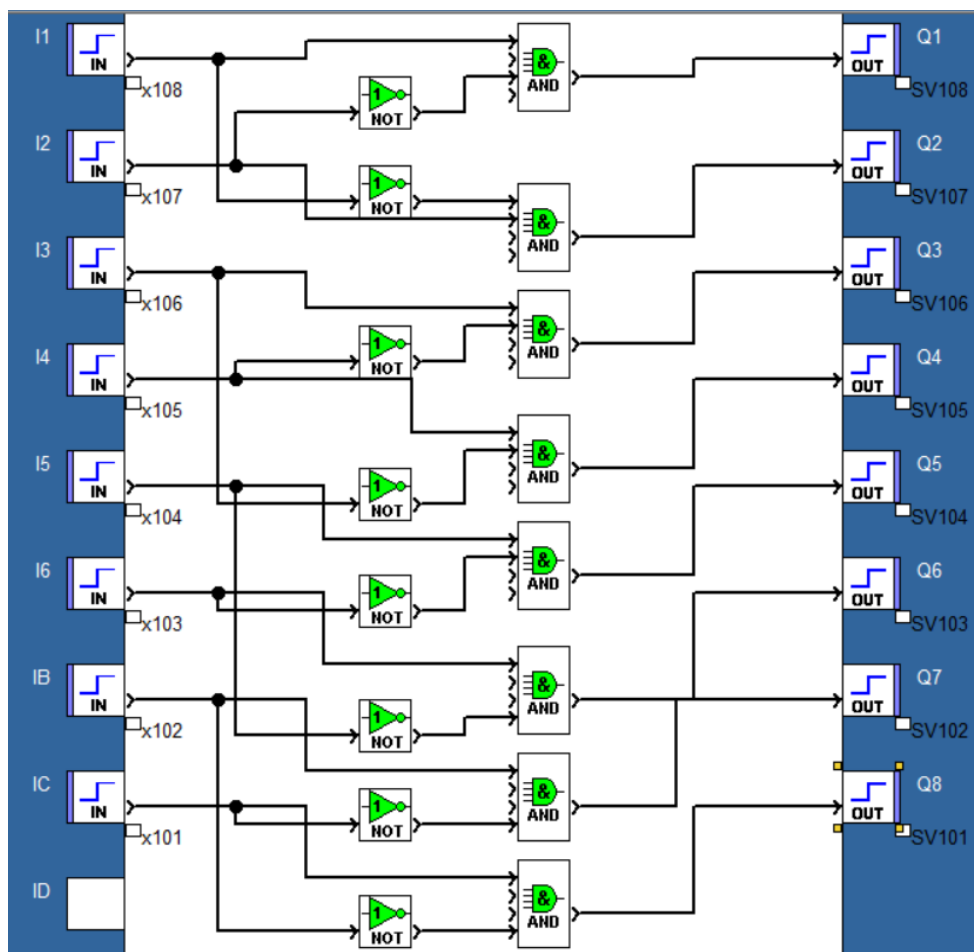


Рис3. Схема взаимной блокировки клапанов для реализации на ПЛК

Таким образом, по результатам эксплуатации и анализа работы системы управления клапанами системы очистки отработавших газов судовых дизелей разработаны следующие предложения, обеспечивающие повышение надежности и безопасности ее работы:

- обоснован выбор более надёжного клапана системы перепуска отработавших газов, что повысит надёжность системы в целом и уменьшит трудозатраты по настройке и эксплуатации системы управления клапанами;

- с использованием программного обеспечения Zelio Logic Soft 2 разработана схема взаимной блокировки запорных клапанов, исключающая возможность одновременной подачи управляющих воздействий на закрытие клапанов подачи отработавших газов в скруббер и клапанов, обеспечивающих подачу отработавших газов в обход его.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Международная Конвенция по предотвращению загрязнения с судов 1973 года, измененная протоколом 1978 года к ней (МАРПОЛ73/78) [Текст] = International Convention for Prevention of Pollution from Ships, 1973, as Modified by the Protocol of 1978 relating thereto (MARPOL 73/78): нормативный документ в 3-х книгах / Центральный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт морского флота; отв. исполн.: Г.Н. Семанов, В.А. Михайлов. Кн. III. - Введ. с поправками на 01.01.2017 года. – СПб.: АО ЦНИИМФ, 2017. – 412 с.

2. Sargun Sethi. A Guide To Scrubber System On Ship / Sargun Sethi [Электронный ресурс] March 22, 2021, December 30, 2021 // Marine Technology – Режим доступа: <https://www.marineinsight.com/marine-technology/a-guide-to-scrubber-system-on-ship/>

3. Zelio Logic. Руководство пользователя [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://www.se.com/ru/ru/download/document/SR2MAN01RU/>

# IMPROVING THE RELIABILITY AND SAFETY OF WORK VALVE CONTROL SYSTEMS EXHAUST GAS CLEANING SYSTEMS MARINE DIESEL ENGINES

<sup>1</sup>Rusakov Sergey Mikhailovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Electrical Equipment and Ship Automation

<sup>2</sup>Kondratenko Vladislav Sergeevich, cadet

<sup>1,2</sup>Baltic Fishing Fleet State Academy FSBEI HE "KSTU",  
Kaliningrad, Russia, e-mail: <sup>1</sup>rusakov.sm@bgarf.ru; <sup>2</sup>kondratenkov6@gmail.com

*The aim of the work is to develop proposals to improve the reliability and safety of the valve control system of the Exhaust Gas Cleaning Systems of marine diesel engines. The novelty is determined by the fact that for the first time, based on the experience of operating the system, the choice of more reliable shut-off valves is justified and a scheme of their mutual blocking is proposed, excluding the occurrence of an emergency situation. Main conclusions: the exhaust gas purification systems used for marine diesel engines need to be upgraded, in particular, to replace valves with more reliable and convenient in operation and maintenance, and to improve their control systems.*

УДК 621.12.061:628.169 (043)

## О ВЫБОРЕ ТИПА ОПРЕСНИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПАТЭС «АКАДЕМИК ЛОМОНОСОВ»

<sup>1</sup>Филонов Александр Георгиевич, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры энергетики

<sup>2</sup>Щербаков Илья Игоревич, аспирант кафедры энергетики

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,  
Калининград, Россия, e-mail: <sup>1</sup>sudfac@yandex.ru; <sup>2</sup>konnor19992013@gmail.com

*Рассмотрена предлагаемая схема гибридной опреснительной установки плавучего атомного энергоопреснительного комплекса ПАТЭС «Академик Ломоносов». Приводятся результаты оптимизационного расчета схемы мембранного модуля обратноосмотической опреснительной установки для производства технологической и питьевой воды, а также многоступенчатой дистилляционной опреснительной установки для подпитки реактора и парогенератора энергоблока ПАТЭС.*

Согласно данным ЮНЕСКО, к 2050 году около 7 миллиардов человек в шестидесяти странах столкнутся с нехваткой чистой пресной воды, которая стремительно превращается в дефицитный природный ресурс. К 2025 году дефицит воды увеличится до 1,3 - 2 трлн. м<sup>3</sup>/год. Основные потребители опресненной воды сконцентрированы на Ближнем Востоке (70% от общего объема), в Европе – 9,9%, США – 7,4%, в Африке – 6,3 %. Дефицит воды в России сегодня также испытывают некоторые регионы: полуостров Крым, Новороссийск, Калмыкия, Азов, Владивосток [1].

Одним из путей решения данной проблемы в ряде стран является использование плавучих опреснительных установок производительностью 40000-150000 м<sup>3</sup>/сут [1, 2]. В зависимости от способа получения пресной воды источником энергии на этих судах является электрическая, или тепловая энергия, которую отпускают дизельные или паротурбинные энергетические установки. В 2020 г. в России была сдана в эксплуатацию ПАТЭС «Академик Ломоносов» на базе двух реакторов КЛТ-40С и двух паротурбинных установок ТК-35/38-3,4 электрической мощностью 2×38,5 МВт.

Турбины предусматривают отпуск пара из регулируемого теплофикационного отбора в количестве 97,1 т/ч, давлением 0,36 МПа (см. рис. 1).



*Рис. 1. Плавучий атомный энергоопреснительный комплекс ПАТЭС «Академик Ломоносов» с реакторными установками КЛТ-40С*

Заказчик судна - Госкорпорация «Росатом», считает, что ПАТЭС может также использоваться для снабжения паром и электроэнергией плавучей опреснительной установки, вырабатывающей питьевую и технологическую воду стоимостью около 1 доллара за кубометр, производительностью 40000-10000 м<sup>3</sup>/сут.

Однако к настоящему времени не разработана схема опреснения морской воды для этого комплекса, и в этой связи данная задача является актуальной. Сравнение различных способов опреснения на береговых АЭС (для применения в Персидском заливе) по себестоимости опресненной воды показало, что наиболее эффективной технологией является обратный осмос. Однако следует отметить, что при солёности морской воды более 35 г/л данная технология способна получать пермеат солёностью не ниже 199 мг/л, что не соответствует требованиям предъявляемым к качеству добавочной воды для питания контуров реакторов и парогенераторов АЭС. В этой связи наиболее оптимальными с точки зрения минимального вклада различных затрат в технологический процесс опреснения являются гибридные схемы, сочетающие использование обратноосмотических опреснительных установок и многоступенчатых дистилляционных опреснительных установок адиабатного типа (ДОУ), работающих на низкопотенциальном паре из отбора паровой турбины АЭС[1].

Предлагаемая нами принципиальная схема гибридной опреснительной установки для ПАТЭС «Академик Ломоносов» показана на рис.2.







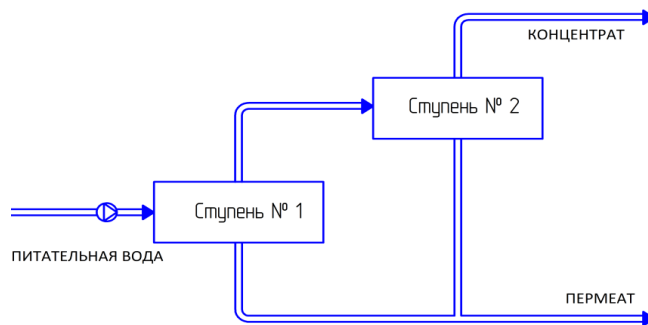


Рис.3. Принципиальная проточная схема модуля ООУ

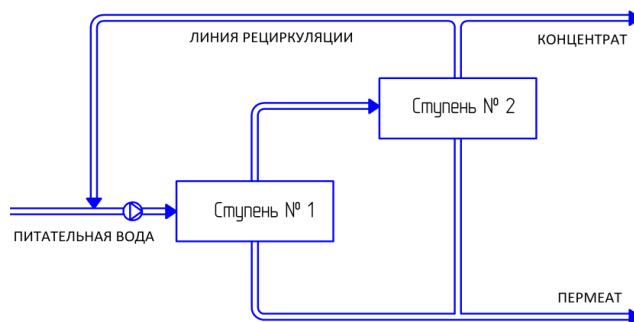


Рис. 4. Принципиальная схема модуля ООУ с рециркуляцией

Для оптимизации состава оборудования схем и проведения их сравнительного анализа была использована программа ROSA концерна DOW CHEMICAL [5]. Программа позволяет выполнить предварительные расчеты показателей работы элементов FILMTEC и всего модуля в целом в конкретных условиях. Процесс расчёта осуществляется на основании известных математических моделей ООУ [3, 4].

Для обессоливания воды предлагается использовать новые фильтрующие элементы FILMTEC типа SW30 ULE -440i [5]. Окно расчетного интерфейса программы ROSA 9.1 представлено на рис. 5.

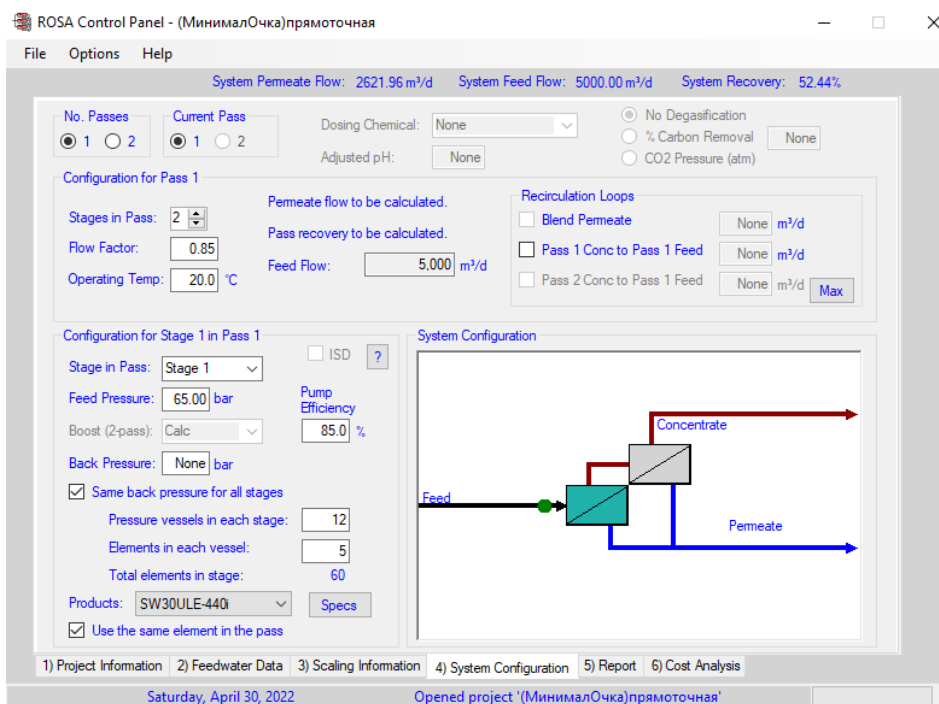


Рис. 5. Расчетный интерфейс программы ROSA 9.1

## Результаты расчета мембранного модуля ООУ проточной двухступенчатой схемы

Ступень	Фильтрующий элемент	Кол-во корпусов	Кол-во мембран	Входной поток, м <sup>3</sup> /сут	Входное давление, бар
1	SW30 ULE-440i	12	5	5000	64,7
2		12	5	3062	61,6
Ступень	Выход концентрата, м <sup>3</sup> /сут	Солесодержание пермеата, мг/л	Выход пермеата, м <sup>3</sup> /сут	Солесодержание пермеата, мг/л	
1	3062	58058	1938	120,2	
2	2378	74633	684	445,4	
Итого	2378	74633	2622	205,1	

Сопоставление результатов расчёта двух схем (проточной и с рециркуляцией), осуществлялось по: минимальным удельным энергозатратам на производство одного кубометра пермеата; степени выхода пермеата; солесодержанию пермеата; предотвращению образования отложений на мембранах. Результаты расчетов (см. табл. 1) показали, что в проточной схеме мембранного модуля удельные энергозатраты на выработку пермеата и соленость пермеата оказываются ниже, чем в схеме с рециркуляцией (соответственно 4,05 кВт·час/м<sup>3</sup>, 205,1 мг/л и 4,5 кВт·час/м<sup>3</sup>, 210,6 мг/л).

В связи с этим окончательно была принята проточная двухступенчатая схема обратноосмотической установки, которая приведена на рис. 6. В каждой ступени – по двенадцать фильтрующих корпусов, в которых устанавливаются пять фильтрующих элементов типа SW30 ULE-440i. Общее количество мембран - сто двадцать. Давление исходной воды перед первой ступенью при наилучшем качестве – около 65 бар.

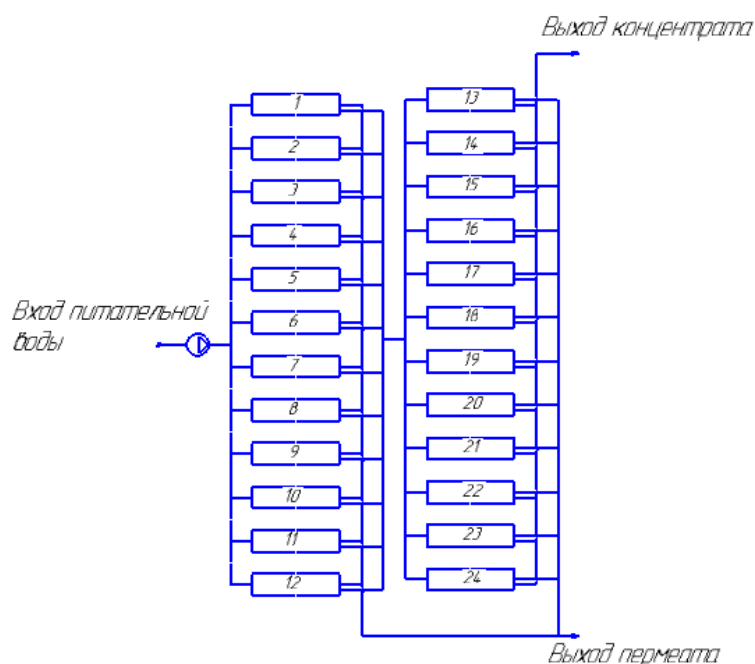


Рис. 6. Предлагаемая схема соединения мембран проектируемого модуля ООУ с двухступенчатой проточной схемой

С целью снижения потребления воды обратноосмотической установкой ТЭС, был выполнен анализ влияния расхода питательной воды на удельные энергозатраты, соленость концентрата, солесодержание и степень выхода пермеата, которое представлено на рис. 7-9.

Для предотвращения отложения солей кальция и магния на мембранах, а также биологического обрастания мембран предусмотрена схема дозирования антискаланта в питательную воду и её бактерицидная обработка.

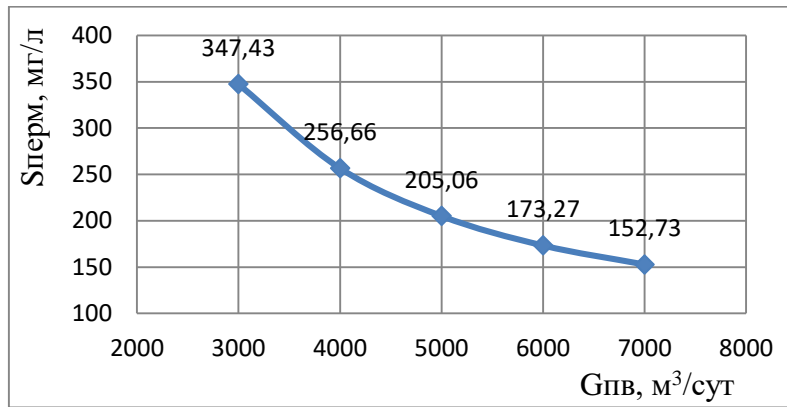


Рис.7 Влияние расхода питательной воды на солесодержание пермеата

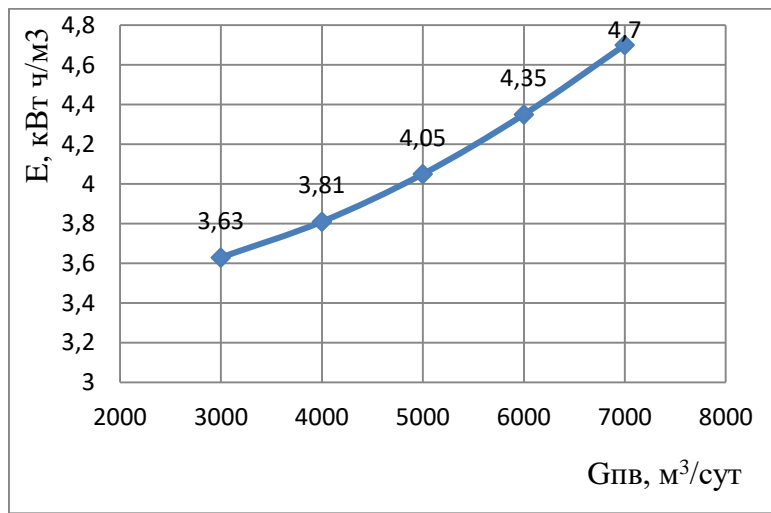


Рис.8 Влияние расхода питательной воды на удельные энергозатраты мембранного модуля

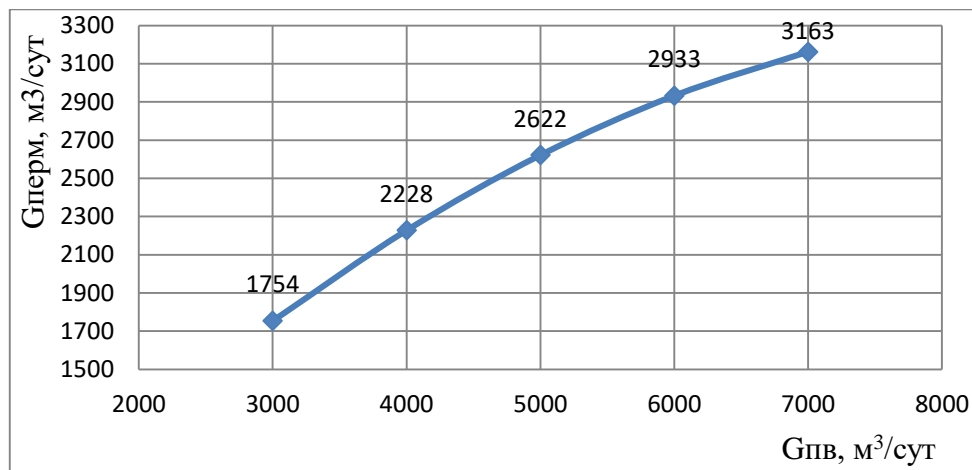


Рис.9. Влияние расхода питательной воды на производительность мембранного модуля

Для подпитки двух реакторов КЛТ-40С и двух парогенераторов ПАТЭС высококачественным дистиллятом был произведён оптимизационный тепловой и конструктивный расчет многоступенчатой дистилляционной опреснительной установки (ДОУ) адиабатного типа производительностью 329 м³/сут, работающей на паре из отбора паровой турбины ПАТЭС.

При предварительном выборе количества ступеней и поверхности теплообмена конденсаторов ступеней ДОУ использовалась математическая модель [7]

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta = \Delta T \frac{q - r_{cp}^*}{q + r_{cp}^*} \\ \theta = \Delta T \frac{r_{cp}^*}{q + r_{cp}^*} \\ \bar{W} = \frac{q + r_{cp}^*}{C \Delta T} \\ \bar{F} = -10^3 \frac{Z}{\Delta T K} (q + r_{cp}^*) \ln \left( 1 - \frac{r_{cp}^*}{zq} \right) \end{array} \right. , \quad (1)$$

где:  $\theta$  и  $\delta$  - нагрев и недогрев воды до температуры насыщения в конденсаторе ступени, °С;  $K$  - коэффициент теплопередачи, Вт/м<sup>2</sup>К;  $\bar{F}$  - относительная поверхность теплообмена конденсатора, м<sup>2</sup>;  $W$  и  $C$  - расход и теплоёмкость опресняемой воды;  $r_{cp}$  - средняя теплота конденсации, кДж/кг,  $Z$  - количество ступеней ДОУ;  $\Delta T$  - общий нагрев морской воды в конденсаторах ступеней и подогревателе, °С;  $q$  - удельный расход тепла на опреснение, кДж/кг. Полученная оптимизационными расчетами, принципиальная схема ДОУ показана на рис. 10. Оригинальная конструкция ДОУ была разработана ФГБОУ ВО «КГТУ».

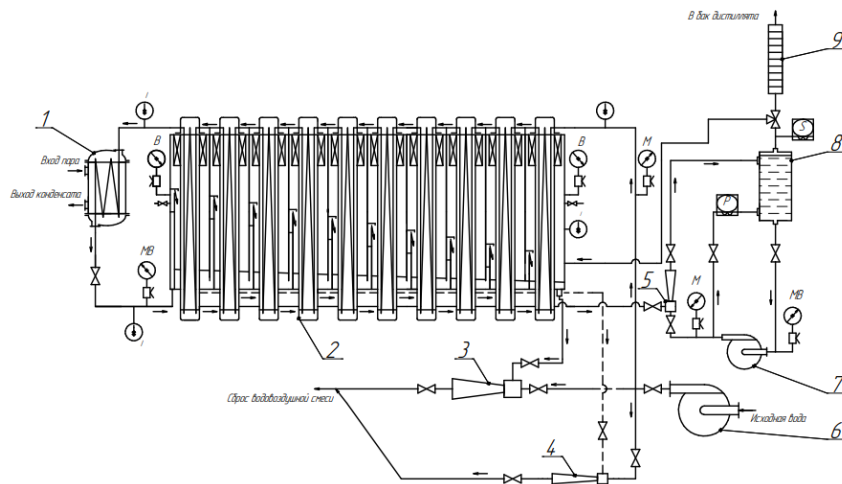


Рис. 10. Принципиальная схема многоступенчатой ДОУ адиабатного типа  
 1 - головной подогреватель морской воды; 2 - многоступенчатый аппарат мгновенного вскипания;  
 3, 4, 5 - рассольный, воздушный и дистиллятный эжекторы; 6 - циркуляционный насос;  
 7 - дистиллятный насос; 8 - дистиллятный бачок; 9 - расходомерное устройство

На рис. 12 показано изменение температуры охлаждающей морской воды в конденсаторах ступеней и температуры вторичного пара в камерах испарения ДОУ.

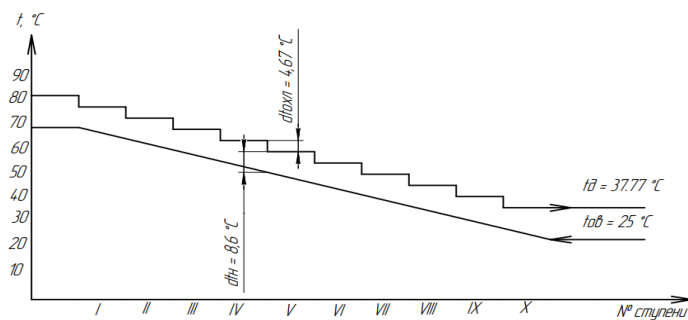


Рис.11. Изменение температуры охлаждающей морской воды и температуры вторичного пара в камерах испарения ДОУ

Объемы камер испарения ДОУ разные: первые семь ступеней имеют одинаковый объем, а следующие три, в свою очередь, увеличиваются, что обусловлено уменьшением давления пара от одной камеры к другой (см. таблицу 2). Подогреватель ДОУ имеет три хода и располагается во внутреннем цилиндрическом корпусе установки, что также позволяет обеспечить компактность испарителя. В каждой камере испарения располагается двухходовой конденсатор, на входе в который установлено паросепарационное устройство, позволяющее значительно уменьшить влажность пара. Под камерами испарения располагаются эжектора (водовоздушный, рассольный и дистиллятный) и дистиллятный насос.

Таблица 2

Основные результаты теплового и конструктивного расчета ДОУ

Наименование параметра	Значение	Наименование параметра	Значение
Производительность опреснителя, м3/ч	13,7	Количество ступеней	10
Расход исходной воды, м3/ч	225,2	Площадь поверхности нагрева конденсатора	39
Удельный расход тепла на выработку дистиллята, кДж/кг	732	Площадь поверхности нагрева подогревателя, м <sup>2</sup>	36,2
Температура воды на выходе из подогревателя	85	Солесодержание дистиллята, мкг/л	171
Температура пара в 1 ступени, °С	79,83	Жёсткость дистиллята, мкг-экв/л	0,63
Температура пара в 10 ступени, °С	37,8	Высота испарителя, м	4,53
Температура греющего пара, °С	111,4	Диаметр испарителя, м	4,05
Давление греющего пара, МПа	0,357	Расход пара на подогреватель, кг/ч	6014

Из таблицы 2 видно, что жесткость и общее солесодержание вырабатываемого ДОУ дистиллята соответствует нормативным показателям качества, предъявляемым к добавочной воде для подпитки реакторов КЛТ-40С и парогенераторов ПАТЭС [4]. С целью дальнейшего снижения удельных энергозатрат на выработку пермеата мембранными модулями ООУ был произведен подбор давлениеобменного аппарата использующего энергию сбрасываемого концентрата для сжатия питательной воды перед первой ступенью (см. рис. 12).

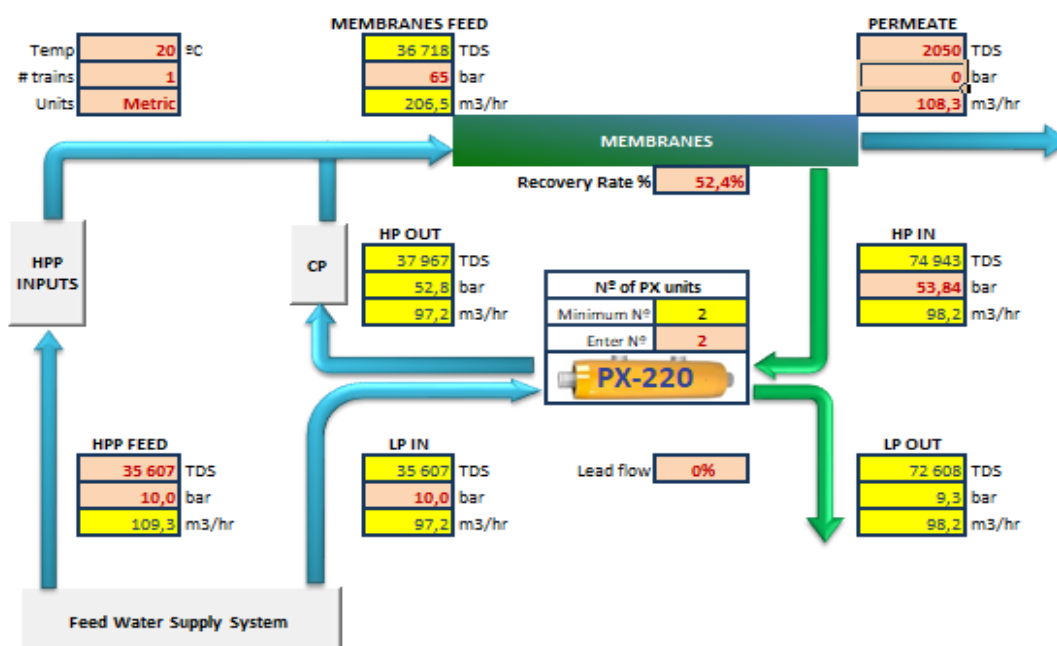


Рис. 12. Расчетный интерфейс программного пакета компании EnergyRecovery

Наилучшими технико-экономическими показателями в настоящее время обладает агрегат типа PX-220 компании Energy Recovery [6]. Выбор давлениеобменного аппарата для мембранного модуля осуществлялся с использованием программного пакета компании Energy Recovery. Расчеты показали, что при установке двух агрегатов на мембранный модуль удельные энергозатраты на выработку пермеата могут быть снижены до 2,3 кВт·час/м<sup>3</sup>.

На рисунке 13 представлена предварительная компоновка оборудования на плавучем опреснительном блоке ПАТЭС «Академик Ломоносов».

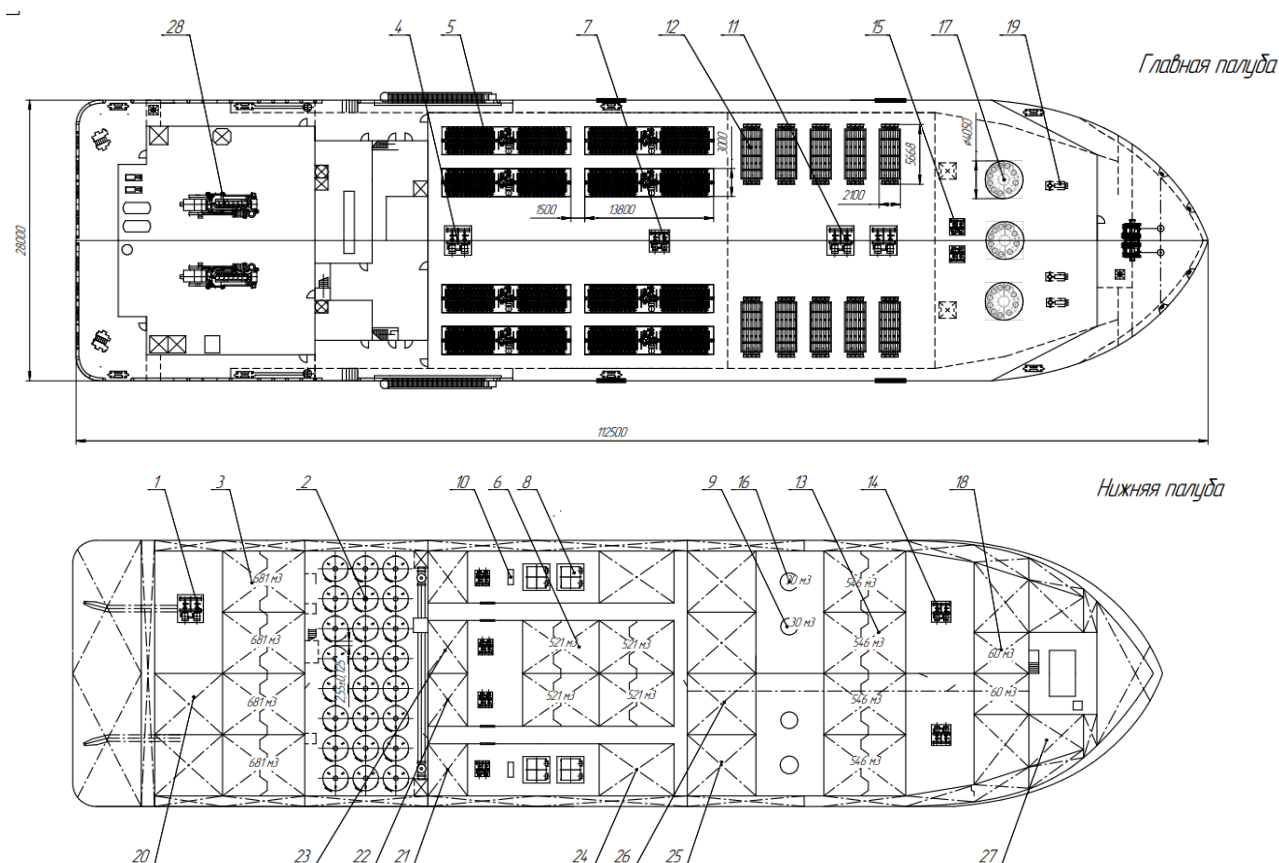


Рис.13. Компоновка оборудования на плавучем опреснительном блоке

- 1 – насос морской воды, 2 – механические фильтры, 3 – бак осветлённой воды, 4 – насос осветлённой воды, 5 – установки ультрафильтрации, 6 – танк обеззараженной воды, 7 – насос обеззараженной воды, 8 – теплообменный аппарат, 9 – танк антискаланта, 10 – фильтр тонкой очистки, 11 – насос высокого давления, 12 – модули ООУ, 13 – танк пермеата, 14 – насос пермеата, 15 – насос осветлённой воды, 16 – танк с реагентами, 17 – дистилляционный опреснитель, 18 – танк дистиллята, 19 – насос дистиллята, 20 – топливный танк, 21 – танк водных растворов химических реагентов, 22 – танк нейтрализации, 23 – танк сточных вод, 24 – танк пресной воды, 25 – танк общесудовых нужд, 26 – танк взрыхляющей воды, 27 – запасной танк, 28 – судовой ВДГ ССFJ150J-WV

Расчет потребления тепловой и электрической энергии на выработку пермеата и дистиллята показывает, что при работе гибридной опреснительной установки на номинальной нагрузке электрическая мощность ПАТЭС «Академик Ломоносов», отпускаемая в сеть, составит 57,8 МВт.

### Заключение

Разработана схема гибридной опреснительной установки плавучего атомного опреснительного комплекса для ПАТЭС «Академик Ломоносов», состоящего из обратноосмотической установки производительностью 52440 м<sup>3</sup>/сут. пермеата для приготовления технологической и питьевой воды и дистилляционной многоступенчатой опреснительной установки производительностью 658 м<sup>3</sup>/сут. дистиллята для подпитки реактора КЛТ-40С и парогенератора энергоблока ПАТЭС.

2. Произведён оптимизационный расчёт проточной двухступенчатой схемы модуля обратно-осмотической установки производительностью 2622 м<sup>3</sup>/сут для выработки технологической и питьевой воды.

3. Выполнен тепловой и конструктивный расчёт тепловой схемы дистилляционной многоступенчатой опреснительной установки мгновенного вскипания общей производительностью 658 м<sup>3</sup>/сут для подпитки реакторов КЛТ-40С и парогенераторов энергоблока ПАТЭС «Академик Ломоносов».

4. Определена электрическая мощность, отпускаемая в сеть при общей производительности опреснительного комплекса 52440 м<sup>3</sup>/сут.

5. Выполнены предварительный выбор вспомогательного оборудования и компоновка опреснительной установки на судне.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чеснокова И.Г. Анализ возможности работы плавучей атомной электростанции совместно с опреснительной установкой // Труды Крыловского государственного научного центра, т. 2, № 396. - Санкт-Петербург, 2021. - С. 149-158.

2. Сайт компании FOD <https://fodesalination.com/>

3. Слесаренко В.В. Совершенствование систем водоподготовки для теплоэнергетических установок с применением мембранных технологий (на примере Дальневосточного региона). Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Владивосток, 2006. - 43 с.

4. Копылов А.С. Водоподготовка в энергетике. – М.: МЭИ, 2003. - 309 с.

5. Сайт концерна DOW CHEMICAL <http://www.dow.com>

6. Сайт компании Energy Recovery <http://www.energyrecovery.com/water/px-pressure-ex-changer/>

7. Филонов А.Г. Упрощённая методика расчета судового адиабатного многоступенчатого опреснителя, работающего на номинальном режиме / Инновации в науке, образовании и бизнесе - 2014: сборник научных трудов XII международной научной конференции / ФГОУ ВПО «КГТУ». - Калининград, 2014. –С. 303-307.

## ABOUT TYPE OF DESTINATION PLANT SELECTION FOR FNTPP "AKADEMIK LOMONOSOV"

<sup>1</sup>Filonov Alexandr Georgievich, PhD, associate professor of Energy Department

<sup>2</sup>Shcherbakov Ilya Igorevich, post-graduate student of Energy Department

<sup>1,2</sup>Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,  
e-mail: <sup>1</sup>sudfac@yandex.ru; <sup>2</sup>konnor19992013@gmail.com

*The hybrid desalination plant scheme of floating nuclear energy desalination complex of FNTPP Akademik Lomonosov is considered. The results of optimization calculation of membrane module scheme of a reverse osmosis desalination plant for process and drinking water production, as well as a multi-stage distillation desalination plant for feeding reactor and steam generator of FNTPP power unit are presented.*

## ЗАВИСИМОСТЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КРИТИЧЕСКОГО ДИАМЕТРА ТЕПЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ ОТ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООТДАЧИ

Шевченко Сергей Николаевич, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры СЭУ

БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ», Калининград, Россия, e-mail: sergey.shevchenko.56@mail.ru

*Проведен анализ зависимости, определяющей критический диаметр цилиндрической стенки при условии изменяющегося значения внешнего диаметра. Показано, что при условии свободной конвекции средний коэффициент теплоотдачи является функцией внешнего диаметра трубопровода. Получена формула для определения критического диаметра при переменной величине среднего коэффициента теплоотдачи. Исследована зависимость критического диаметра от разности температур и числа Прандтля. Показано, что при расчете локальных значений коэффициента теплоотдачи возникает необходимость учета локального критического диаметра цилиндрической поверхности.*

Значение критического диаметра тепловой изоляции на трубопроводных системах имеет большое значение. Как правило, при изучении характеристик критического диаметра цилиндрической стенки в учебной литературе для анализа используется математическое выражение для термического сопротивления цилиндрической стенки [1, с. 61].

$$R = \frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}, \quad (1)$$

где  $\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи от движущегося теплоносителя внутри трубы,  $\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи снаружи трубы,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$ ,  $d_1$  и  $d_2$  – соответственно внутренний и наружный диаметр трубы,

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала стенки,  $\frac{\text{Вт}}{\text{мК}}$ . Предполагается, что  $\alpha_1$ ,  $d_1$ ,  $\alpha_2$ , и  $\lambda$  величины постоянные. В этом случае термическое сопротивление цилиндрической стенки зависит только от внешнего диаметра. При этом термическое сопротивление теплоотдачи  $R_1 = \frac{1}{\alpha_1 d_1} = \text{const}$ .

Сопротивление теплопроводности  $R_2 = \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}$  при увеличении  $d_2$  будет также увеличиваться, т.к. параметр  $d_2$  находится в числителе логарифма, а второе термическое сопротивление теплоотдачи уменьшается, вследствие того, что  $d_2$  находится в знаменателе  $R_3 = \frac{1}{\alpha_2 d_2}$ .

Для выяснения поведения  $R$  следует исследовать функцию  $R = f(d_2)$ . Для этого берем производную от  $R$  по  $d_2$  и приравняем ее к нулю.

$$\frac{d(R)}{d(d_2)} = \frac{d}{d(d_2)} \left( \frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2} \right) = \frac{1}{2\lambda d_2} - \frac{1}{\alpha_2 d_2^2} \quad (2)$$

или  $\frac{\alpha_2 d_2 - 2\lambda}{2\lambda d_2^2 \alpha_2} = 0$ , соответственно



$$\alpha_2 d_2 - 2\lambda = 0 \text{ и } d_2 = \frac{2\lambda}{\alpha_2} \quad (3)$$

Берем вторую производную

$$\frac{d}{d(d_2)} \left( \frac{\alpha_2 d_2 - 2\lambda}{2\lambda d_2^2 \alpha_2} \right) = \frac{2\lambda d_2^2 \alpha_2 \alpha_2 - (\alpha_2 d_2 - 2\lambda) 4\lambda d_2 \alpha_2}{2\lambda d_2^2 \alpha_2} = \frac{\alpha_2 - (\alpha_2 d_2 - 2\lambda) 2}{d_2} \quad (4)$$

Подставляем в (4) значение (3)  $d_2 = \frac{2\lambda}{\alpha_2}$ , получаем

$$\frac{\alpha_2 - \left( \alpha_2 \frac{2\lambda}{\alpha_2} - 2\lambda \right) 2}{\frac{2\lambda}{\alpha_2}} = \frac{\alpha_2 - (4\lambda - 4\lambda)}{\frac{2\lambda}{\alpha_2}} = \frac{\alpha_2^2}{2\lambda} > 0 \quad (5)$$

Таким образом, функция  $f(R)$  в этой точке имеет минимум. Следовательно, при значении  $d_2 = \frac{2\lambda}{\alpha_2}$  термическое сопротивление будет минимальным. Это значение называется критическим

диаметром  $d_{кр}$ . При  $d_2$  меньше  $d_{кр}$  термическое сопротивление снижается при увеличении  $d_2$ , так как увеличение наружной поверхности за счет увеличения  $d_2$  оказывает большее влияние, чем термическое сопротивление теплопроводности. В случае если  $d_2 > d_{кр}$  с возрастанием наружного диаметра  $R$  возрастает, из-за того, что термическое сопротивление теплопроводности оказывает большее влияние, чем термическое сопротивление теплоотдачи. По данным из [1, с. 61], при свободной конвекции в воздухе  $\alpha_2$  находится в диапазоне  $5 \div 25 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}}$ , а для вынужденной конвекции для воды

$\alpha_1 = 50 \div 10000 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}}$ . Приняв  $\lambda$  для углеродистой стали 30 при  $T = 573\text{К}$

$\lambda = 41,9 \frac{\text{Вт}}{\text{МК}}$  можно произвести расчет  $R = f(d_2)$  при средних значениях  $\alpha_2$  и  $\alpha_1$ .

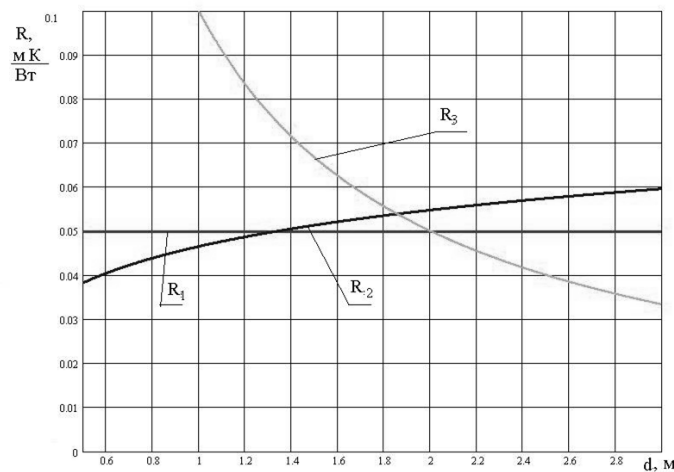


Рис 1. Зависимость  $R = f(d_2)$  при средних значениях  $\alpha_2$  и  $\alpha_1$ .

Если рассматривать критический диаметр изоляции наложенной на трубопровод, то термическое сопротивление теплопередачи запишется в виде

$$R = \frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_{из}} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\alpha_2 d_3} \quad (6)$$

Очевидно, выводы, полученные выше, распространяются и на этот случай. При этом  $d_{кр} = \frac{2\lambda_{из}}{\alpha_2}$ . Однако, при изменении внешнего диаметра трубопровода изменяется и коэффициент

теплоотдачи  $\alpha_2$ . Следовательно, условие, что  $\alpha_2 = \text{const}$  не точно. Рассмотрим вариант, когда  $\alpha_2 = \text{var}$ .

Теплоотдача для горизонтальной трубы с наружным диаметром  $d_n$  при  $(Gr \cdot Pr)_{п.с.} = 10^3 \div 10^8$  определяется по уравнению [2, с.117]

$$Nu_{п.с.} = 0,5(Gr \cdot Pr)_{п.с.}^{0,25},$$

где  $Gr = \frac{gd_2^3}{\nu^3} \beta(t_c - t_{ж})$ ,  $Pr = \frac{\nu}{a}$ . Таким образом,

$$\frac{\alpha_2 d_2}{\lambda} = 0,5 \left[ \frac{gd_2^3}{\nu^3} \beta(t_c - t_{ж}) \cdot Pr \right]^{0,25} \quad (8)$$

Представим коэффициент теплоотдачи  $\alpha_2$  как функцию  $d_2$

$$\alpha_2 = 0,5 \frac{\lambda}{d_2} d_2^{0,75} \left[ \frac{g}{\nu^3} \beta(t_c - t_{ж}) \cdot Pr \right]^{0,25} = 0,5\lambda \left[ \frac{g}{\nu^3} \beta(t_c - t_{ж}) \cdot Pr \right]^{0,25} \cdot d_2^{-0,25} \quad (9)$$

Если обозначить,  $A_1 = 0,5\lambda \left[ \frac{g}{\nu^3} \beta(t_c - t_{ж}) \cdot Pr \right]^{0,25}$ , тогда  $\alpha_2 = A_1 \cdot d_2^{-0,25}$

Дифференцируя (1), с учетом (9), получаем

$$\frac{d(R)}{d(d_2)} = \frac{1}{2\lambda d_2} + \frac{d}{d(d_2)} \left( \frac{1}{A_1 d_2^{0,25} d_2} \right) = -0,75 d_2^{-1,75}$$

Тогда, приравнивая к нулю производную, имеем

$$d_{кр2}^{0,25} = \frac{1,5\lambda}{A_1} \quad \text{или} \quad d_{кр2} = \left( \frac{1,5\lambda}{A_1} \right)^4 \quad (10)$$

Таким образом, если сравнить полученный результат с (3) видно, формула (10) имеет существенное отличие. Необходимо отметить, что при свободной конвекции коэффициент теплоотдачи  $\alpha_2$  зависит от числа Релея  $Ra = Gr \cdot Pr$ , где  $Gr$  число Грасгофа, которое в свою очередь зависит от разности температур  $t_c - t_{ж}$ .

На рис. 2 показана зависимость  $d_{кр2}$  от температурного напора и числа  $Pr$ . Предполагается, что в числе  $Gr$  и  $Pr$  коэффициент кинематической вязкости берется средний в расчетном диапазоне температур.

Из рисунка видно, что с уменьшением температурного напора между  $t_{ст}$  и  $t_{ж}$  величина критического диаметра нелинейно увеличивается. Причем наибольшее увеличение происходит малых температурных напорах. В тоже время имеется достаточно слабая зависимость  $d_{кр}$  от числа  $Pr$ . Таким образом, можно сделать вывод о том, что при малых температурных перепадах критический диаметр цилиндрической изоляции имеет достаточно большое значение и его расчет и оценка остро необходима, т.к. в этом случае имеется вероятность наложения изоляции с диаметром меньше кри-

тического, что приведет к увеличению теплопотерь. При больших температурных перепадах значение  $d_{кр}$  минимально и увеличение тепловой изоляции будет уменьшать теплопотери через стенку трубопровода.

В целом эффект критического диаметра определяется у любой поверхности имеющей, кривизну. Как правило, критический диаметр вычисляется с целью уменьшения теплопотерь от труб, имеющих тепловую изоляцию. Но в некоторых случаях эта величина определяет эффективную толщину стенки трубы с минимальным термическим сопротивлением. Это касается трубчатых теплообменников или теплообменников типа «труба в трубе». Здесь наиболее эффективная теплоотдача будет происходить именно при диаметре труб  $d = d_{кр}$ . Кроме того, при детальном рассмотрении процессов теплоотдачи свободной конвекцией можно показать, что для горизонтально расположенного цилиндра существует локальное значение коэффициента теплоотдачи при ламинарном пограничном слое на поверхности [3, с. 138-140].

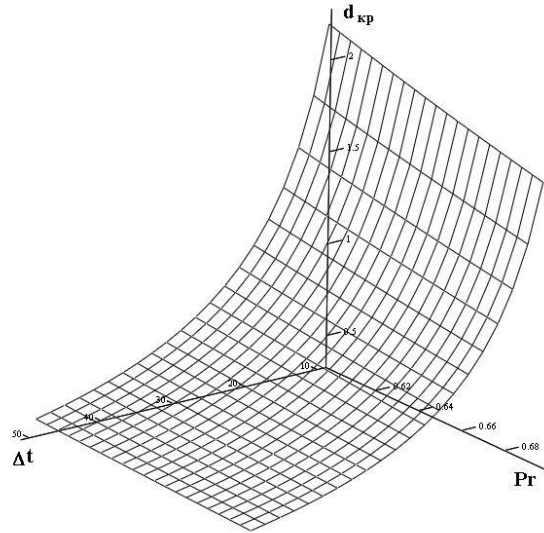


Рис.2. Зависимость  $d_{кр}$  от перепада температур и числа  $Pr$ .

В диапазоне  $\varphi = 0 \div \pi$ ,  $Gr_d = 10^5 \div 10^7$

$$Nu_{\varphi} = \left[ C_0 + C_1 \left( \varphi + \frac{\pi}{2} \right)^2 + C_2 \left( \varphi + \frac{\pi}{2} \right)^4 \right] \cdot Ra_d$$

при  $Pr = 0,1 \div 1$ , где  $Ra = Gr \cdot Pr$ ,

$$\begin{aligned} C_0 &= (-0,0234 \lg Ra_d + 0,573) \left[ 0,114(1 + \lg Pr)^2 + 0,118(1 + \lg Pr) + 0,831 \right], \\ C_1 &= (0,00447 \lg^2 Ra_d - 0,05605 \lg Ra_d + 0,173) \left[ 6,382(1 + \lg Pr)^2 - 3,39(1 + \lg Pr) - 0,754 \right], \\ C_2 &= (0,00048 \lg Ra_d - 0,0067) \left[ -0,302(1 + \lg Pr)^2 + 0,433(1 + \lg Pr) + 0,8 \right] \end{aligned}$$

при  $Pr = 1 \div 100$

$$\begin{aligned} C_0 &= (-0,0234 \lg Ra_d + 0,573) \left[ -0,374(1 + \lg Pr)^2 + 1,94(1 + \lg Pr) + 0,855 \right], \\ C_1 &= (0,00447 \lg^2 Ra_d - 0,05605 \lg Ra_d + 0,173) \left[ -286,7(1 + \lg Pr)^2 - 1335,5(1 + \lg Pr) - 1429,5 \right], \\ C_2 &= (0,00048 \lg Ra_d - 0,0067) \left[ 0,05265(1 + \lg Pr)^2 + 0,5(1 + \lg Pr) + 1,363 \right] \end{aligned}$$

Очевидно, что в этом случае, можно говорить о локальном критическом диаметре цилиндрической стенки, т.к. при различных азимутальных углах  $\varphi$  значение локального коэффициента теплоотдачи будет различным. Следовательно,  $d_{кр}$  в различных точках горизонтального цилиндра будет тоже различен.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брюханов О.Н., Шевченко С.Н. Тепломассообмен: Учебник. – М.: ИНФРА-М, 2012. – 464 с.
2. Мартыненко О.Г., Соковишин Ю.А. Свободно-конвективный теплообмен. Справочник. – Мн.: Наука и техника, 1982. – 400 с.
3. Малинин В.Т. О влиянии числа Прандтля на развитие течения и теплообмена при свободной конвекции около горизонтального цилиндра. – Научные труды Московского лесотехнического ин-та, 1977, № 93.

## DEPENDENCE OF THE GEOMETRIC CHARACTERISTICS OF THE CRITICAL DIAMETER OF THE THERMAL. INSULATION FROM HEAT TRANSFER PROCESSES

Shevchenko Sergey Nikolaevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Marine Power Plants

Federal state budgetary educational institution of higher education  
"Kaliningrad State Technical University" Baltic State Academy of Fishing Fleet Marine Institute,  
Kaliningrad, Russia, e-mail: sergey.shevchenko.56@mail.ru

*The analysis of the dependence determining the critical diameter of the cylindrical wall under the condition of a changing value of the outer diameter is carried out. It is shown that under the condition of free convection, the average heat transfer coefficient is a function of the outer diameter of the pipeline. A formula is obtained for determining the critical diameter at a variable value of the average heat-return coefficient. The dependence of the critical diameter on the temperature difference and the Prandtl number is investigated. It is shown that when calculating the local values of the heat transfer coefficient, it becomes necessary to take into account the local critical diameter of the cylindrical surface.*

УДК 639.2

**К ВОПРОСУ СОЗДАНИЯ ОСНОВ РАЗРАБОТКИ МЕТОДОЛОГИИ  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОМЫСЛОВЫХ КОМПЛЕКСОВ  
РЫБОЛОВНЫХ СУДОВ**

<sup>1</sup>Бабинцев Артем Юрьевич, аспирант

<sup>2</sup>Суконнов Анатолий Владимирович, канд. тех. наук, доцент

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,  
Калининград, Россия, e-mail: <sup>1</sup>artem.babintsev.1996@mail.ru; <sup>2</sup>anatoly.sukonnov@klgtu.ru

*Рассматривается вопрос создания базы для разработки методов проектирования промысловых комплексов рыболовных судов. На основе метода морфологических карт оценивается эффективность работы этих комплексов, также проводится оценка взаимосвязей технических параметров системы судно–промысловый комплекс–трал от степени механизации промысловых операций. По результатам исследования получены графические и аналитические зависимости коэффициента механизации от мощности силовой установки судна и мощности рыбопромыслового оборудования установленного на нем.*

Рыболовные суда имеют большое разнообразие промысловых схем и комплексов. Проектирование существующих схем проводится по прототипам, что служит причиной низкого уровня механизации рыбопромысловых операций. В свою очередь, значительная доля ручного труда составляет 70%. К таким операциям относится присоединение грузов углубителей и переходного конца к звену цепи траловой доски трехзвенки, отсоединение переходного конца от вытяжного и переходного конца от звена цепи траловой доски трехзвенки, подключение стопорной цепи, подключение и отсоединение траловых досок и т.д. Высокая доля ручного труда приводит к увеличению непроизводительных затрат времени и как следствие неэффективности использования судов в промышленном рыболовстве. В то же время снижается эффективность применения этих судов в промысловом варианте. Имеются различные технические решения, которые принимаются стихийным образом. Так, например, в некоторых схемах используют кабельно-сетные барабаны для выборки, выметки вытяжного конца, переходного конца, кабелей и голых концов трала. Однако, такие решения выполняются не обоснованно и в основном соотносятся с техникой ведения промысла.

Одним из способов разработки промысловых схем может служить метод морфологических карт. Он представляет собой последовательность выполнения рыбопромысловых операций в соответствии с техникой и тактикой лова, с указанием рода осуществляемых работ и промысловых механизмов. Данная карта позволяет провести оценку эффективности работы промысловых комплексов, а также предложить техническое решение по совершенствованию эксплуатируемых промысловых схем.

Одним из показателей такой оценки служит коэффициент механизации, который представляет собой соотношения рыбопромысловых операций, выполняемых механизированным путем к общему числу этих операций.

Для создания предпосылок разработки методологии, необходимо установить взаимосвязи технических параметров системы судно-промысловый комплекс-трал, от степени механизации промысловых операций.

Для этого необходимо описать работу промысловых схем, составить морфологические карты, оценить уровень механизации промысловых операций для конкретного рыболовного судна.

На основании вышеизложенного, целью данных исследований, является установление взаимосвязи технических характеристик оборудования рыбопромысловых комплексов судов тралового лова, оценить приоритет влияния факторов на коэффициент механизации.

Для достижения поставленной цели, были проанализированы промысловые схемы и комплексы различных траулеров, в частности были взяты суда в размере 22 единиц: промыслово-производственный рефрижератор (ППР), морозильный рыболовный траулер (РТМ), средний рыболовный траулер морозильный (СРТМ), большой морозильный рыболовный траулер (БМРТ), большой автономный траулер (БАТ), морозильный траулер-сейнер (ТСМ) [1,2].

На первом этапе исследований были установлены графические и аналитические взаимосвязи энергонасыщенности промысловых комплексов рыболовных судов от энергоемкости силовых установок. Рассматривались промысловые схемы рыболовных судов с траловыми и ваерными лебедками.

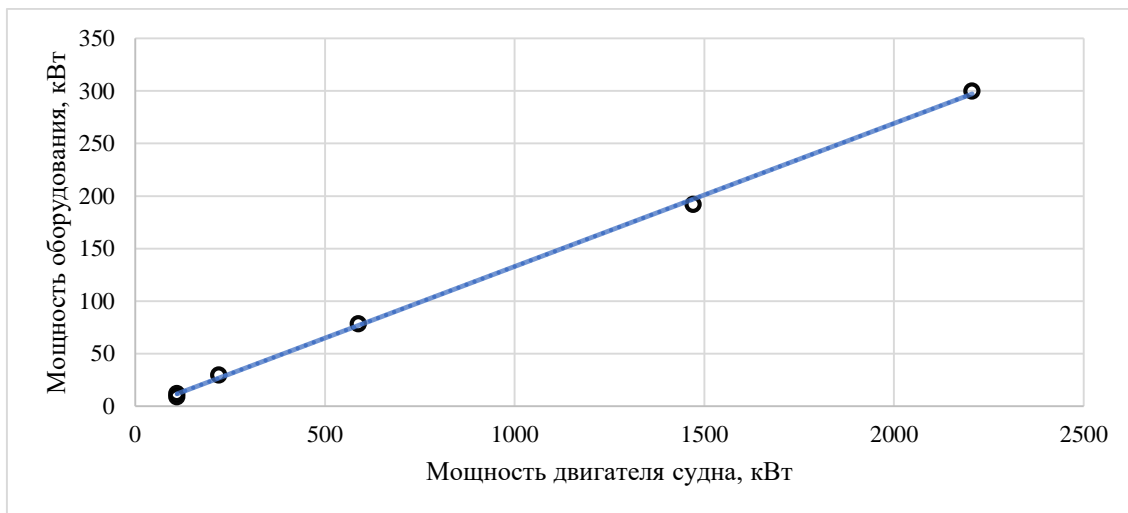


Рис. 1. График аппроксимирующей функции для промысловых схем с траловыми лебедками

Зависимость мощности установочного оборудования судна имеет линейный характер и определяется следующей формулой:

$$\sum N_j = 0,14 \cdot N_i - 3,29; \tag{1}$$

где  $\sum N_j$  – суммарная мощность оборудования на палубе судна;

$N_i$  – мощность двигателя судна.

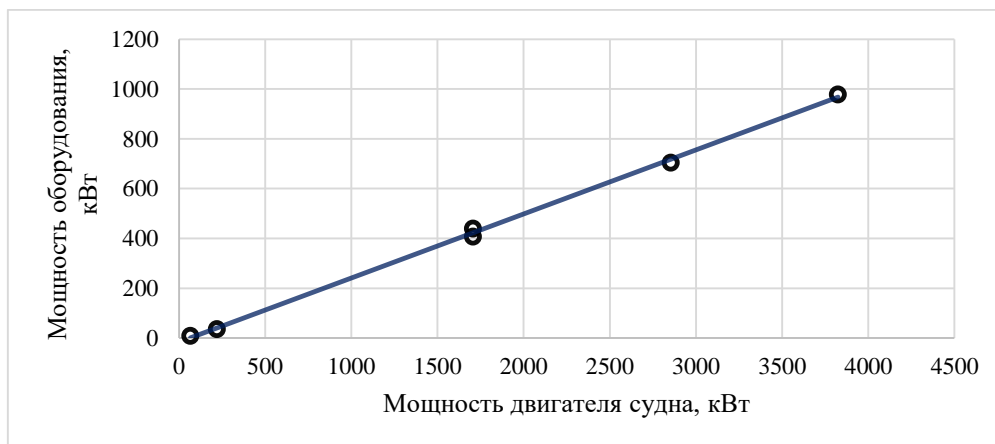


Рис. 2. График аппроксимирующей функции для промысловых схем с ваерными лебедками

Зависимость мощности установочного оборудования судна имеет линейный характер и определяется следующей формулой:

$$\sum N_j = 0,26 \cdot N_i - 16,77. \quad (2)$$

На втором этапе исследования были получены графические и аналитические зависимости влияния мощностных характеристик траулера на коэффициент механизации промысловых операций тралового лова (Рис. 3,4).

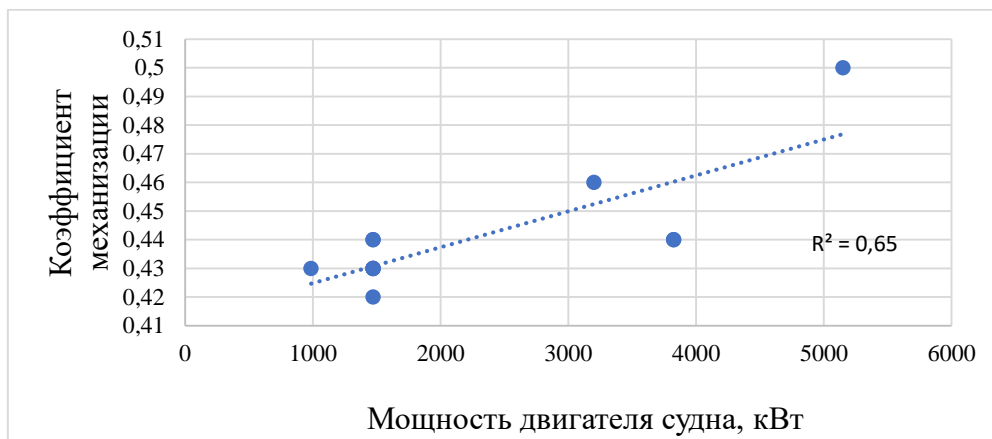


Рис. 3. Влияние мощностных характеристик траулеров на коэффициент механизации

Аналитическая зависимость коэффициента механизации от мощности силовой установки судна определяется следующей формулой:

$$K_1 = 10^{-5} \cdot N_{дв.} + 0,41; \quad (3)$$

где  $K_1$  – коэффициент механизации от мощности силовой установки траулера;

$N_{дв.}$  – мощность силовой установки траулера.

Анализ зависимости показал, что мощность силовой установки линейно зависит от коэффициента механизации. С увеличением мощности двигателя судна на каждую 1000кВт коэффициент механизации возрастает на 1%.

Также получена графическая и аналитическая зависимость влияния мощности промыслового оборудования траулеров на коэффициент механизации.

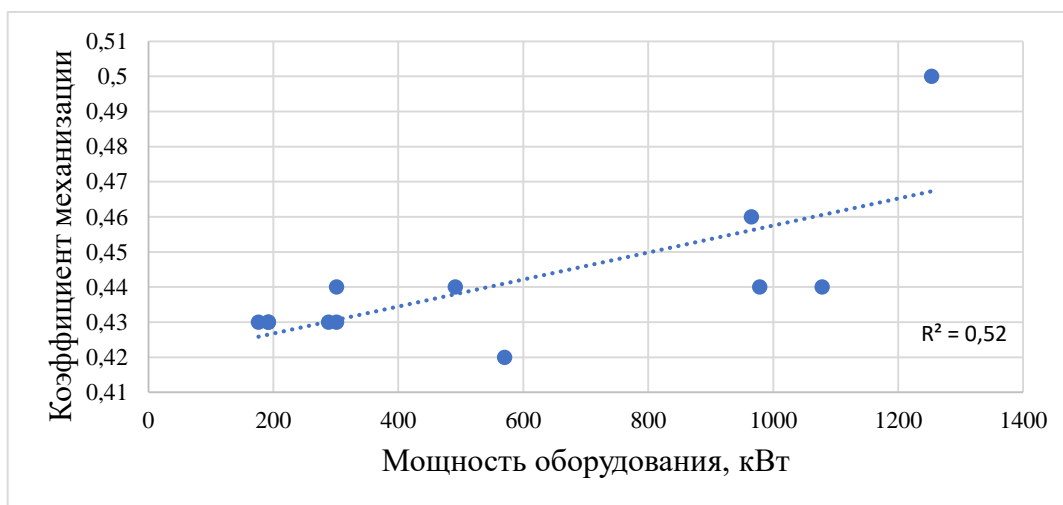


Рис. 4. Влияние мощностных характеристик оборудования траулеров на коэффициент механизации

Аналитическая зависимость коэффициента механизации от мощности оборудования судна определяется следующей формулой:

$$K_2 = 4 \cdot 10^{-5} \cdot N_{об.} + 0,41. \quad (4)$$

где  $K_2$  – коэффициент механизации от мощности оборудования траулера;

$N_{об.}$  – мощность оборудования траулера.

Анализ зависимости показал, что мощность промыслового оборудования линейно зависит от коэффициента механизации. С увеличением мощности оборудования на каждые 200кВт коэффициент механизации возрастает на 0,8%.

Полученные результаты, являются базовыми при разработке методов проектирования промысловых схем и комплексов.

В дальнейшем для создания методологии проектирования и разработки промысловых схем, планируется установление зависимости коэффициента безопасности выполнения рыбопромысловых операций от мощностных способностей промыслового оборудования, входящего в состав промысловых схем рыболовных траулеров

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Флот рыбной промышленности: справочник типовых судов / под ред. А. Б. Антипова. 3-е изд., доп. М.: Транспорт, 1990. С. 62–131.
2. Флот рыбной промышленности [Электронный ресурс]. URL: [http://soviet-trawler.narod.ru/main\\_r/list\\_of\\_projects\\_ru.html](http://soviet-trawler.narod.ru/main_r/list_of_projects_ru.html) (дата обращения: 20.12.2021 г.)

### ON THE QUESTION OF CREATING THE FOUNDATIONS FOR DEVELOPING A METHODOLOGY FOR DESIGNING FISHING VESSEL COMMERCIAL COMPLEXES

<sup>1</sup>Babintsev Artem Yurievich, postgraduate student

<sup>2</sup>Sukonnov Anatoly Vladimirovich, candidate of technical sciences, Associate Professor

<sup>1,2</sup>Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
"Kaliningrad State Technical University", Kaliningrad, Russia,  
e-mail: <sup>1</sup>artem.babintsev.1996@mail.ru; <sup>2</sup>anatoly.sukonnov@klgtu.ru

*The report discusses the issue of creating a base for the development of methods for designing fishing vessels fishing complexes. Based on the method of morphological maps, the efficiency of these complexes is evaluated. As well as an assessment of the relationship of the technical parameters of the ship-trawl system, from the level of mechanization of fishing operations. Based on the results of the analysis, graphical and analytical dependencies were obtained.*



## ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ПОТЕРИ ПРОЧНОСТИ РЫБОЛОВНЫХ НИТЕВИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ФАКТОРОВ ВОДНОЙ СРЕДЫ

<sup>1</sup>Гавриш Юлия Владимировна, магистрант кафедры промышленного рыболовства

<sup>2</sup>Суконнов Анатолий Владимирович, канд. техн. наук, доцент

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет», Калининград, Россия, e-mail: <sup>1</sup>julikalisa@gmail.com; <sup>2</sup>anatoly.sukonnov@klgtu.ru

*Исследованием степени износа рыболовных материалов, из которых изготавливаются орудия лова, от факторов водной среды еще никто не занимался. Поэтому была поставлена задача провести такие исследования. Была разработана и изготовлена экспериментальная установка для проведения первичных исследований. Получена оценка потери прочности нитевидного рыболовного материала в процентном соотношении. Применено оборудование: разрывная машина, микроскоп.*

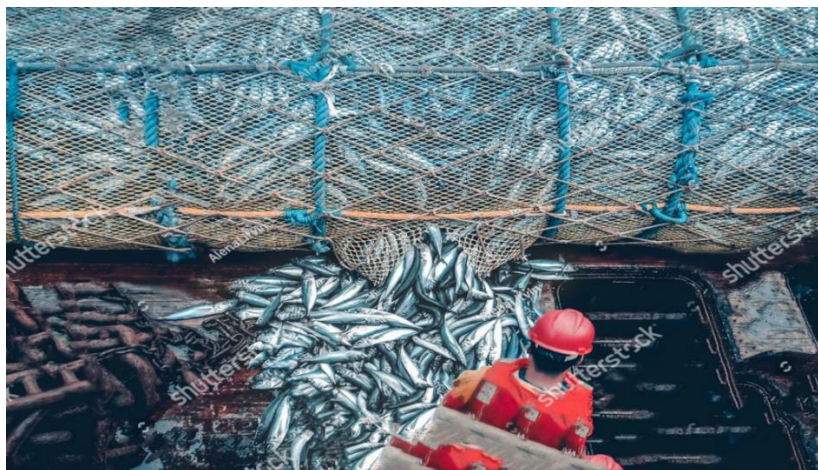
При эксплуатации орудий рыболовства происходит их износ (рис. 1), который приводит к изменению их геометрических параметров. Основные виды износа орудий рыболовства - это физико-химический, биологический и механический износы. К физико-химическому износу можно отнести такие явления как действие света, атмосферы, температуры, влаги и др.

При биологическом износе происходит разрушение орудий лова микроорганизмами.

Механический износ происходит от трения и многократных деформаций растяжения и изгиба, сжатия и др.

Как показала практика физико-химический и биологические износ можно предотвратить или уменьшить путём различных мероприятий, которые позволяют снизить или исключить эти виды износа.

Механический износ более прогрессивный. Его природа связана и с трением, и с гидродинамикой. Изучив этот вид износа, можно также предпринять какие-то меры по его снижению или даже искоренению. [1]



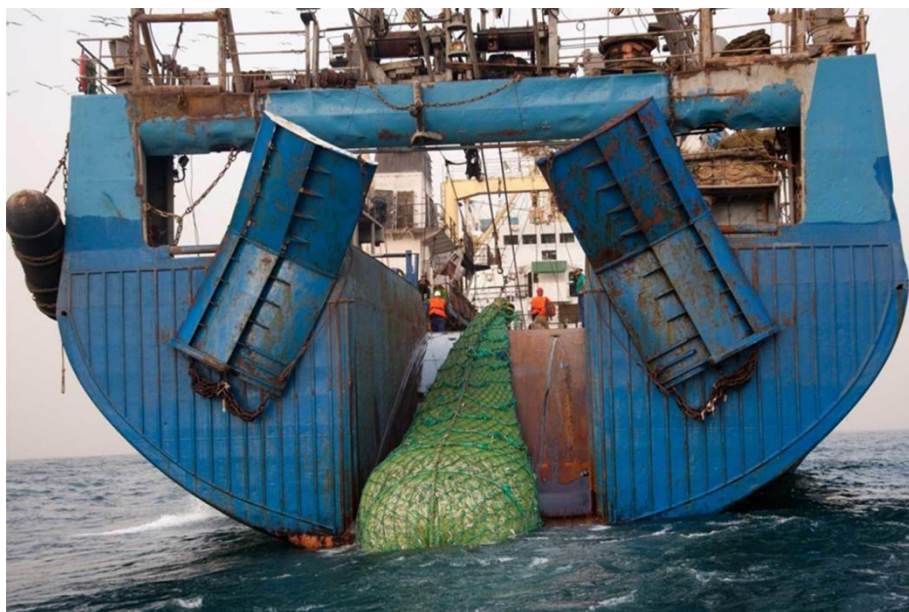
*Рисунок 1. Изношенный трал не выдержал давление улова*

Уже были приняты различными рыбодобывающими компаниями мероприятия для устранения износа, такие как покрытие слипов различными смолами, которые имеют низкий коэффициент трения, установление рол-гангов, по которым трал скатывался и поднимался. Это снижало нагрузки трения.

Однако при решении этих вопросов зачастую было двойное решение, в одном случае мы снижали трение, а в другом случае возникали трудности. Например, смола за счёт того, что суда переходили из тёплых вод в холодные, образовывались сколы и получались трещины, из-за которых сетное полотно ещё больше изнашивалось и решить вопрос было довольно сложно, т.е. приходилось убирать это покрытие. В некоторых случаях приходилось даже возвращаться в порт, останавливая рыбодобывающую работу.

Рол-ганги снижали усилие подъема траловых мешков, но при спуске канатной части трала закручивались на рол-ганги (иногда и рвались), соответственно, процесс останавливался.

К сожалению суда отечественного флота, в большинстве своем работает по типу подъема трала и траловых мешков с уловом по слипам судов на палубу судна (рис.2). В это время происходит максимальный износ как орудия лова, так и потери качества содержимого улова до 30%. А это значительно влияет на срок службы трала. Имеется решение, когда не поднимают по слипам мешки, а откачивают улов с помощью рыбонасосов. Однако канатная часть все равно поднимается по слипу, поэтому износ неминуем.



*Рисунок 2. Подъем тралового мешка по слипу судна*

Наши рыболовные материалы отбираются по разрывной прочности. Однако, как показывает практика при эксплуатации орудий рыболовства на них оказывают влияние и циклические нагрузки, т.е. периодическое растяжение элементов орудий рыболовства, и абразивное трение, и сама водная среда. Если по первым двум проводились исследования, то по последнему не проводились. В литературе известно, что любое тело, движущееся в воде подвержено трению. Работы В.Н. Анучина это подтверждают. В своих работах он установил, что между слоями воды существует сила трения, которая оказывает влияние на износ объектов, находящихся в этих слоях. [2]

Учитывая, что данный вопрос не рассматривался применительно к орудиям рыболовства, была поставлена задача провести такие исследования, с целью получения зависимости степени потери прочности рыболовных нитевидных материалов от воздействия факторов водной среды.

Для проведения исследований была разработана методика, которая включает в себя:

1. Разработку и изготовление экспериментальной установки;
2. Отбор исследуемых образцов;
3. Отбор влияющих факторов;
4. Освоение контрольно-измерительной аппаратуры;
5. Проведение опытов.

Для проведения экспериментального исследования была предложена установка (рис.3), которая представляет из себя следующее: цилиндр, установленный на платформе, через который прокачивается вода. Вдоль цилиндра с двух сторон подсоединяется полипропиленовая труба, через ко-

торую насосная установка подает поток воды. Насос имеет специальное устройство для подачи объема жидкости и скорости потока. Внутри трубопровода помещается опытный образец, который будет находиться в потоке воды определенный промежуток времени. К опытному образцу через уплотнительную резинку подвешивается груз.

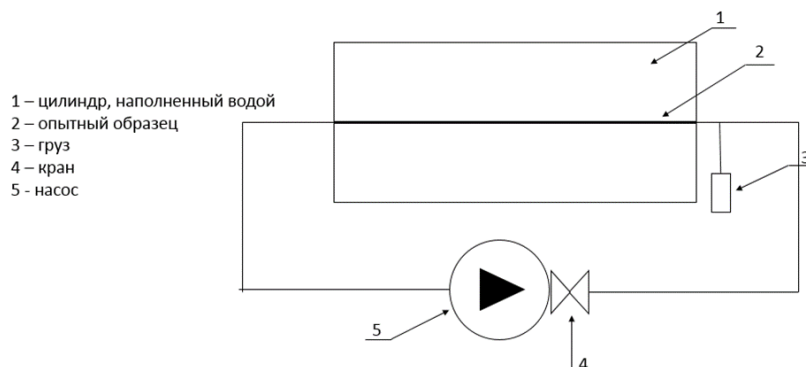


Рисунок 3. Экспериментальная установка

Для установочных экспериментальных исследований была отобрана полиамидная нить ПА-187текс\*2, диаметром 1 мм. Полиамидные нити характеризуются высокой прочностью, растяжимостью, устойчивостью к истиранию. Из-за высокой гигроскопичности полиамида, нитки подвержены усадке до 15% при взаимодействии с водой. Это свойство материала создает преимущества при производстве и ремонте сетевого полотна, так как обеспечивает надежную фиксацию узлов.

Для установления зависимости степени износа от водной среды были отобраны исследуемые факторы, характеризующие объект исследования (диаметр нити) и параметры водной среды (скорость потока, плотность воды).

В ходе проведения экспертизы нити и эксперимента использовалось следующее оборудование: разрывная машина, микроскоп. На разрывной машине (рис.4) определяли первоначальную разрывную прочность  $P_0$  и остаточную разрывную прочность  $P_{ост}$  после проведения испытаний. Диаметр нити определяли с помощью микроскопа.



Рисунок 4. Разрывная машина

Для проведения опытов экспериментальная установка работала так: в цилиндр насос подает воду со скоростью 3 м/с., внутри которого находится образец нити, вытянутый вдоль цилиндра. Через 5 часов при воздействии этой водной среды образец вынимается и проверяется прочность на разрыв. Перед этим образцы проверяются на первоначальную прочность без влияния водной среды.

### Испытания образцов нитей на разрыв

Образец	$P_0$ , Н	$P_{ост}$ , Н	Погрешность измерения, %
1	212,8	187,2	3,2
2	218,6	187,9	3,2
3	214,1	181,9	3,2

Предварительные испытания показали, что потеря прочности составляет примерно 12-15%. Помимо этого, происходит выпрямление скрученных волокон., т.е. волокна вытягиваются и раскручиваются. В дальнейшем предполагается получить зависимость скорости потока и плотности воды.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методика экспериментальной оценки износостойкости сетеснастных рыболовных материалов от факторов механического износа: Журнал «Известия КГТУ» / Львова Е.Е., Суконнов А.В., Розенштейн М.М., Суконнова Т.Е. – Калининград: КГТУ, 2020. – 48-60 с.

2. С Исследование придонных плотностных потоков: Авторефераты диссертаций/ Анучин В.Н. – Москва: Изд-во. Моск. ун-та, 1974. – 11 с.

### ASSESSMENT OF THE DEGREE OF LOSS OF STRENGTH OF FISHING FILAMENTOUS MATERIALS FROM THE EFFECTS OF FACTORS OF THE AQUATIC ENVIRONMENT

<sup>1</sup>Gavrish Yulia Vladimirovna, master student of the Department of Commercial Fishing

<sup>2</sup>Sukonnov Anatoly Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

<sup>1,2</sup>Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,

e-mail: <sup>1</sup>julikalisa@gmail.com; <sup>2</sup>anatoly.sukonnov@klgtu.ru

*No one has yet studied the degree of wear of fishing materials from which fishing gear is made from factors of the aquatic environment. Therefore, the task was set to conduct such studies. An experimental setup for conducting primary research was developed and manufactured. An estimate of the strength loss of thread-like fishing material in percentage ratio was obtained. Equipment used: a bursting machine, a microscope.*

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФОРМОИЗМЕНЯЕМОСТИ ЭЛЕМЕНТАРНОЙ ЯЧЕИ

<sup>1</sup>Коновалова Карина Витальевна, аспирант

<sup>2</sup>Недоступ Александр Алексеевич, канд. техн. наук, доцент

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,  
Калининград, Россия, e-mail: <sup>1</sup>karina.konovalova4382@mail.ru; <sup>2</sup>nedostup@klgtu.ru

*Представлено планирование эксперимента для исследования формоизменяемости элементарной ячеи. Эти исследования становятся актуальными с целью внедрения в сферу промышленного рыболовства нового подхода к расположению ячей в траловом мешке – Т90 (поворот стандартной ячеи на 90°).*

*Для исследования авторами статьи были взяты образцы ячей из трех синтетических материалов (полипропилен (ПП), полиамид (ПА), полиэфир(ПЭФ)) различного диаметра.*

В настоящее время орудия промышленного рыболовства представляют собой сложные инженерные конструкции, состоящие из нитевидных изделий: шнуры, нитки, веревки и канаты. Они представляют собой гибкие нити и определяют основные отличительные черты орудий промысла – гибкость сооружения и отсутствие постоянной формы [1,2].

Благодаря своей простоте конструкции траловый мешок с делью Т0 искажается из-за улова и давления воды, действующего на улов во время траления. Большая часть дели растягивается, и, следовательно, открытость ячеи уменьшается.

В начале 90-х годов в первые был предложен новый подход к расположению ячей в траловом мешке (Т90). Анализ исследований показал, что направление дели, развернутой на 90°(Т90), может значительно улучшить отбор определенного размера объекта и таким образом потенциально может обеспечить селективные свойства по размеру [3,4]. Улучшенные параметры приводят к тому, что ячеи в траловом мешке остаются широко открытыми на протяжении всего лова.

Поэтому внесение этого изменения в конструкцию тралового мешка скажется положительным образом на уловах.

Форма ячеи зависит от множества факторов: диаметра шнура; шаг ячеи; натяжение ветви; плотность материала; тип узла вязки; коэффициент крутки; направление крутки; поворот узла вязки и т. д.

Используя научный метод планирования экспериментов из всех факторов были выделены основные технические характеристики, оказывающие влияние на формоизменяемость ячеи и которые возможно контролировать и изменять во время испытаний.

1.  $d/a$  – отношение диаметра шнура к шагу ячеи. Это соотношение является основной характеристикой тралового мешка и влияет на селективность орудия лова.

После анализа использующихся на промысле траловых мешков авторами статьи, для экспериментального исследования были выбраны следующие показатели:  $d/a_1=0,002$ ;  $d/a_2=0,11$   $d/a_3=0,2$ .

2. Натяжение в шнурах. Стоит отметить, что процесс прохождения рыбы через ячею зависит от усилия, развиваемого рыбой при попытке освободиться и так же поворотам ячеи.

С целью создания матрицы планирования авторами статьи было проведено кодирование выбранных факторов (табл. 1.).

## Кодирование факторов

№ п/п	Наименование Фактора	Кодировка	Нижний уровень (-)	Средний уровень (0)	Верхний уровень (+)
1.	Отношение диаметра к шагу ячеи (d/a)	X <sub>1</sub>	0,002	0,11	0,2
2.	Натяжение (T <sub>y</sub> /T <sub>x</sub> )	X <sub>2</sub>	0,5	1	2
3.	Материал (плотность)	X <sub>3</sub>	ПА, ПЭФ, ПП	ПА, ПЭФ, ПП	ПА, ПЭФ, ПП

С учетом основных факторов на трех разных уровнях авторами была создана матрица планирования экспериментов (табл. 2).

Таблица 2

## Матрица планирования экспериментов по определению

№ п/п	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
1.	+	+	+
2.	+	+	-
3.	+	+	0
4.	+	-	+
5.	+	0	+
6.	-	+	+
7.	0	+	+
8.	-	-	-
9.	-	-	+
10.	-	-	0
11.	-	+	-
12.	-	0	-
13.	+	-	-
14.	0	-	-
15.	0	0	0
16.	0	0	-
17.	0	0	+
18.	0	-	0
19.	0	+	0
20.	-	0	0
21.	+	0	0
22.	+	-	0
23.	+	0	-
24.	0	-	+
25.	-	+	0
26.	0	+	-
27.	-	0	+

Исследование по изучению изменений формы элементарной ячеи будет осуществляться с элементами, изготовленными из шнуров различного материала и различного диаметра. [5,6] Параметры для образцов были подобраны в соответствии с делами, применяемыми в настоящее время в траловых мешках на промысле.

На рис. 1 представлены изображения ячей сделанных из полиамида диаметром 3мм в положение T0(стандартное расположение) и T90(поворот ячеи на 90°).



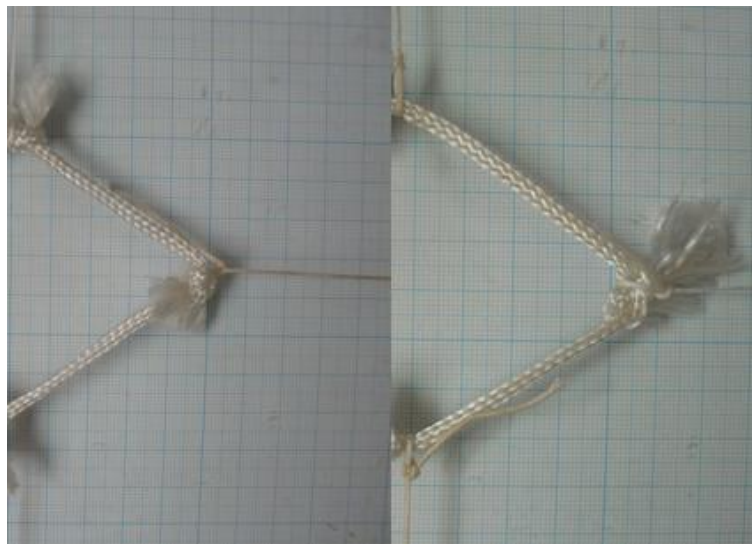


Рис. 1. Образец ячеи с шагом 45 мм; T0 и T90;  $T_y/T_x=0,5$

По результатам экспериментов для каждого образца была получена зависимости вида  $X = y(x)$ (рис.2,3):

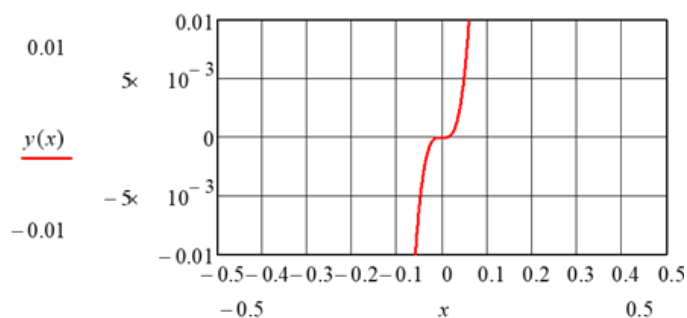


Рис. 2. Образец ячеи с шагом 45 мм; T90;  $T_y/T_x=0,5$

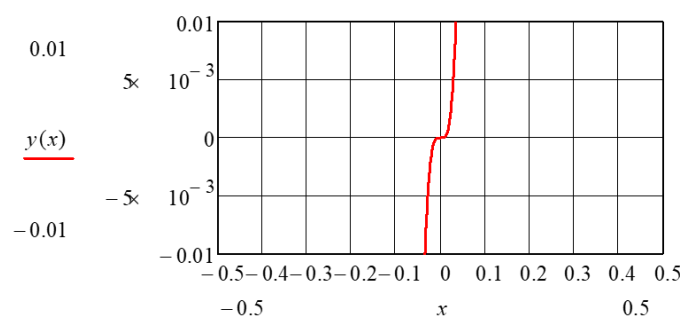


Рис. 3. Образец ячеи с шагом 45 мм; T0;  $T_y/T_x=0,5$

### Выводы

Из полученной входе экспериментальных исследований информации можно сделать вывод, что на данный момент недостаточно исследований по определению формы элементарной ячеи и, следовательно, становится необходимым дополнить расчет и использовать тензометрические датчики для более подробного изучения изменений и деформации формы ячеи при различном натяжение.

В данной статье авторами был описан план проведения масштабных опытов по определению формы ячеи из различных синтетических материалов и при различном шаге ячеи.

Основная значимость данного исследования заключается в возможности получения численной оценки формы ячеи, которая должна учитываться при выборе материалов на стадии проектирования орудий лова, с целью снижения промысловой смертности при коммерческом промысле, а также снижения гидродоупора орудий рыболовства.

Исследование выполнено в рамках государственного задания по теме: «Разработка физических, математических и предсказательных моделей процессов эксплуатации донного и разноглубинного траловых комплексов».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Digre H., Hansen U.J., Erikson U. 2010. 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*. *Fisheries Science*. 76, 549-559.

2. Аскадский, А.А. Деформация полимеров / А.А. Аскадский. М: Химия, 1973. - 448 с.

3. Herrmann B., Priour D., Krag L.A., 2007. Simulation-based study of the combined effect on cod-end size selection of turned meshes by 90° and reducing the number of meshes in the circumference for round fish. *Fisheries Research*, 84: 222-232.

4. Биргер, И.А. Сопротивление материалов: Учебное пособие. / И.А. Биргер, Р.Р. Мавлютов. - М.: Наука, 1986. - 560 с.

5. Недоступ А.А., Ражев А.О. Производительность сил траловой системы: Постановка задачи. Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. №2. - 2021. - С. 55-65.

6. Недоступ А.А., Ражев А.О., Насенков П.В., Коновалова К.В., Быков А.А., Пивоварова Ю.С. Производительность сил траловой системы - III: математическое моделирование (часть I). Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. №4. - 2021. - С. 63-72.

## EXPERIMENTAL STUDIES OF ELEMENTARY CELL SHAPE CHANGEABILITY

<sup>1</sup>Konvalova Karina Vitalievna, postgraduate student

<sup>2</sup>Nedostupov Alexander Alekseevich, associate professor, Ph.

<sup>1,2</sup>Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,  
e-mail: <sup>1</sup>karina.konvalova4382@mail.ru; <sup>2</sup>nedostup@klgtu.ru

*This article presents the planning of an experiment to study the formability of the elementary mesh. These studies become relevant for the purpose of introducing in the sphere of industrial fishing a new approach to cell arrangement in a trawl bag – T90.*

*For the study, the authors of the article prepared samples of cells from three different materials of different diameters.*



## ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ, ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И СИЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТАРНОЙ ЯЧЕИ

<sup>1</sup>Недоступ Александр Алексеевич, канд. техн. наук, доцент

<sup>2</sup>Коновалова Карина Витальевна, аспирант

<sup>3</sup>Наумов Владимир Аркадьевич, д-р техн. наук

<sup>1,2,3</sup>ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет», Калининград, Россия, e-mail: <sup>1</sup>nedostup@klgtu.ru; <sup>2</sup>karina.konovalova4382@mail.ru; <sup>3</sup>van-old@mail.ru

*Решение задачи селективности траловых мешков является приоритетной задачей. Селективность сопряжена с размерным составом облавливаемых видов, а также формой самой ячейки тралового мешка. В траловых мешках с ромбовидной ячейкой Т0 по мере накопления улова ячейки начинают затягиваться и закрываться. Квадратная ячейка Т45 и ячейка дели Т90 предназначена для уменьшения прилова молоди, так как под натяжением ячейки не закрываются. Авторами предложено численное решение задачи зависимости конструктивных, геометрических и силовых характеристик элементарной ячейки.*

Решение задачи селективности траловых мешков является приоритетной задачей рыбопромысловой единицы. Селективность сопряжена с размерным составом облавливаемых видов гидробионтов, а также формой и напряжениями самой ячейки тралового мешка (рубашки). В большей степени селективность элементарной ячейки зависит от самой формы ячейки, при этом существует связь и с формой (периметром) тела рыбы.

В траловых мешках с ромбовидной ячейкой Т0 располагаются параллельно длине талового мешка. По мере накопления улова в мешке ячейки начинают, затягиваться и закрываться. Это снижает способность непромысловым рыбам и прилову использовать отверстия дели для выхода. Квадратная ячейка дели Т45 и ячейка дели Т90 предназначена для уменьшения прилова молоди рыбы, так как, когда квадратная ячейка Т45 и дель с ориентацией Т90 находится под натяжением и ячейка не закрывается [1-2]. При этом вопрос держась силе узла остается открытым, так как его способность при соответствующей нагрузке могут ползти.

Дель с ромбовидной ячейкой Т0, повернутая на 45 град - это квадратная ячейка Т45, а повернутая на 90 рад - это дель с ячейкой Т90 (см. рис. 1 и 2). Дель с ячейкой Т90 имеет улучшенные селективные свойства по сравнению с делью Т0 [3-5]. Исследователи ячейки Т90 утверждают, что дели с такой ячейкой имеют улучшенные селективные свойства траловых мешков при облове путассу или других гидробионтов. Но необходимо отметить, что для Т90 влияние толщины шнура еще не исследовалось систематически. В зависимости от жесткости сетки Т90 может потерять некоторые из своих полезных свойств из-за релаксации материала при использовании в течение некоторого времени на промысле.

Большинство канатно-сетных орудий промышленного рыболовства изготовлены из синтетических материалов.

Дели для траловых мешков изготавливаются из различных синтетических материалов, таких как полиамид, полиэфир, полипропилен, полиэтилен и др. Выбор материала сопряжен с изгибной жесткостью ячейки, а также составляющей стоимости готового изделия.

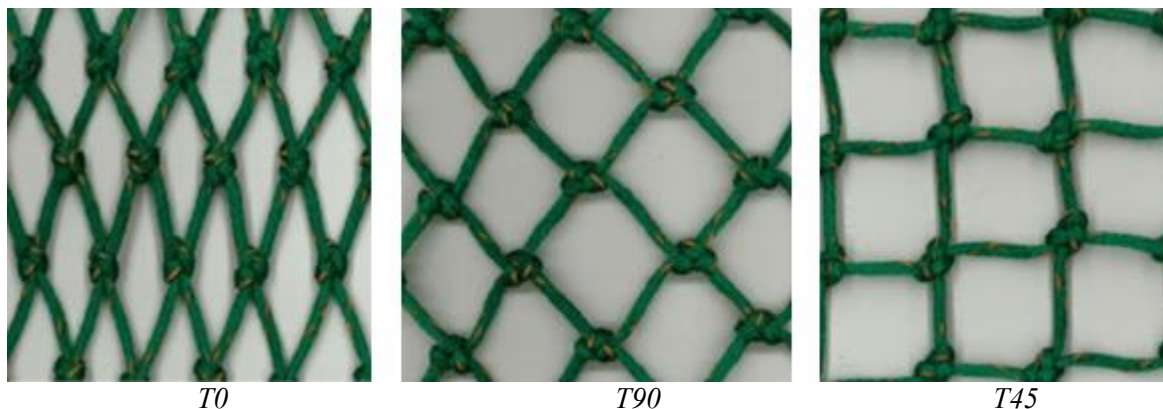


Рис. 1. Дели с различной ориентацией ячеи

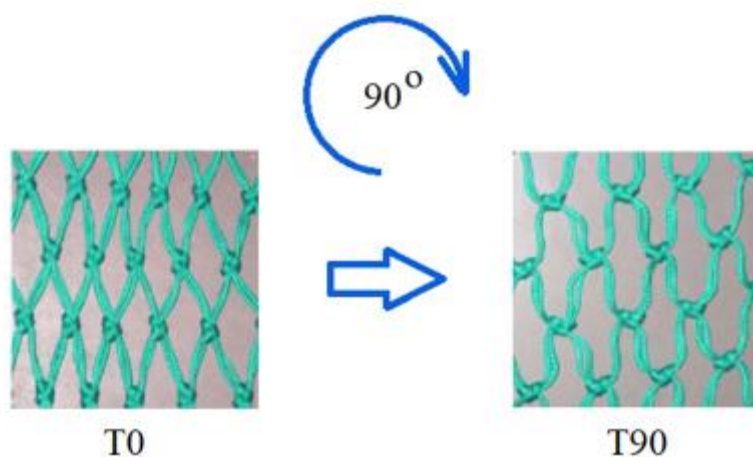


Рис. 2. Дели с ориентацией ячеи T0 и T90

Экспериментальные исследования с моделями траловых мешков показали, что раскрытие траловых мешков позволяют увеличить улов и снизить гидродинамический подпор (см. рис. 3). Это позволяет спроектировать необходимую форму траловых мешков при управления траловым комплексом при сложных комбинированных нагрузениях и больших формоизменениях траловых конструкций.

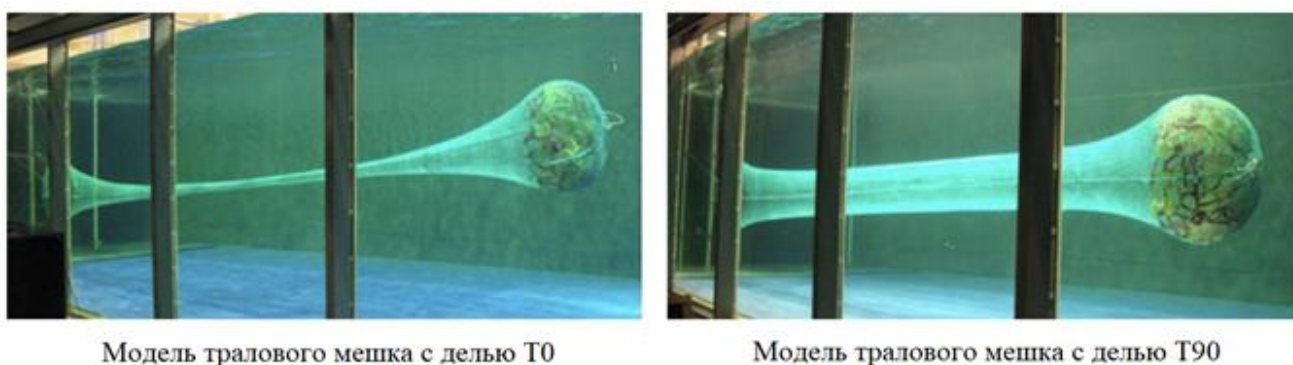


Рис. 3. Модели траловых мешков, изготовленные из дели T0 и T90

Теоретическое описание математической модели ячеи повернутой на  $90^\circ$  рассматривали ученые из множества стран: Англии [6], Польши [7-8] и др. Наиболее приемлемым в настоящее время являются расчеты с помощью МКЭ [9].

В большинстве работ, которые приведены выше рассматриваются простые схематизации элементарной ячеи, масштабируя в последствии данную схематизацию на всю конструкцию трало-

вого мешка, что в последствии ведет к неточностям в расчетах геометрических и силовых характеристик и неверному обоснованию раскрытия ячей и самого тралового мешка.

За основу расчета формы ячей автoрами статьи был взят метод определения функции прогибов.

Запишем дифференциальное уравнение:

$$EIy''(x) = M(x)EIy''(x) = M(x) \quad (1)$$

Найдем первый интеграл (уравнение углов поворота):

$$EIy'(x) = EI\varphi(x) = \int M(x)dx + C \quad (2)$$

Составим уравнение прогибов:

$$EIy(x) = \int EI\varphi(x)dx = \iint M(x)dx dx + Cx + D \quad (3)$$

Для получения уравнения прогибов необходимо найти постоянные интегрирования  $C$  и  $D$  (из условий закрепления балки).

Отметим, что физический смысл постоянных: при  $x$  равного нулю угол поворота  $EI\varphi(0)=C$ , а прогиб  $EIy(0)=D$ , отсюда следует, что константа  $D$  равна прогибу балки при  $x=0$ , а  $C$  равна углу поворота в начале координат.

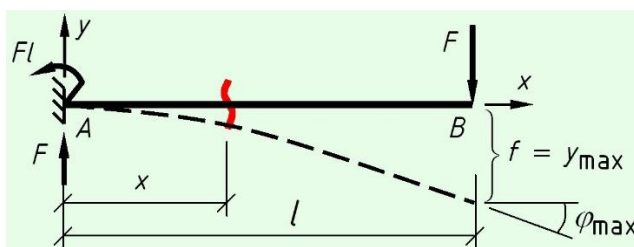


Рис. 4. Балка с силой на конце

На опоре возникают реакции (рис.4) – вертикальная сила  $F$  и момент  $M=F \cdot l$ .

Уравнения изгибающих моментов:

$$M(x) = -Fl + Fx = F(x - l) \quad (4)$$

Напишем уравнение углов поворота:

$$EIy'(x) = EI\varphi(x) = \int F(x - l)dx + C = F\left(\frac{x^2}{2} - lx\right) + C \quad (5)$$

Уравнение прогибов:

$$EIy(x) = \int EI\varphi(x)dx = \int F\left(\frac{x^2}{2} - lx\right)dx + Cx + D = F\left(\frac{x^3}{6} - l\frac{x^2}{2}\right) + Cx + D \quad (6)$$

Так как в сечении А отсутствует прогиб и угол поворота, запишем систему уравнений:

$$\begin{cases} EI\varphi(0) = F\left(\frac{0^2}{2} - l \cdot 0\right) + C = 0 \\ EIy(0) = F\left(\frac{0^3}{6} - l\frac{0^2}{2}\right) + C \cdot 0 + D = 0. \end{cases} \quad (7)$$

При решении системы уравнений (7) получим:  $C=0, D=0$ .

Отсюда функция прогибов имеет вид:

$$EIy(x) = F\left(\frac{x^3}{6} - l\frac{x^2}{2}\right) \quad (8)$$

Максимальный прогиб будет иметь место при  $x=l$ :

$$EIy(l) = F\left(l\frac{l^3}{6} - l\frac{l^2}{2}\right) = -F\frac{l^3}{3}, \quad (9)$$

где знак «-» определяет направление перемещений по оси  $y$ . Стрела прогиба  $f = \frac{Fl^3}{3EI}$ .

## Результаты

Рассмотрим численное решение задачи определения конструктивных, геометрических и силовых характеристик элементарной ячей.

Введем допущения:

- влиянием температуры пренебрегаем;
- материал ячеи рассматривается как идеально гибкие цилиндрические цилиндры;
- не учитываются внутренние силы трения между волокнами и прядями;
- скорость и ускорение продольного растяжения не учитывается;
- условный модуль в поперечном сечении  $E_x=E=const$ ;
- условный модуль упругости по поверхности  $E_y=const$ ;
- объем при нагрузке не изменяется  $V=const$ ;
- масса при нагрузке не изменяется  $m=const$ ;
- сплошность в процессе нагружения не изменяется и находится в диапазоне  $0 \leq F_o \leq 1$ , это справедливо при условии постоянства объема  $V=const$ ;
- разрыв волокон совместим во времени с процессом внутреннего трения, т.е. скольжения волокон друг о друга.

На основе метода непосредственного интегрирования уравнения изгибающих моментов авторами статьи был предложен расчет формы ячеи с помощью программы MathCAD. Вводим полученных данных при анализе физических свойств шнуров (диаметр(d) и длина(L) изделия, m; масса изделия(m), кг) в программу MathCAD, где с помощью формул выведенных д.т.н., профессором «КГТУ» Наумовым В.А., на основе методики определения прогиба балки получаем зависимость  $x=y(x)$  (рисунок 5. 6):

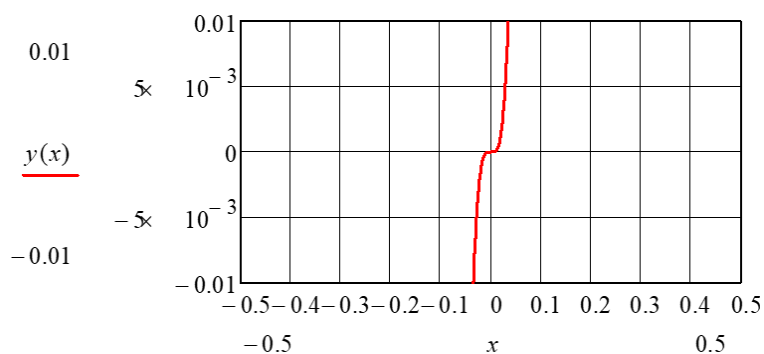


Рис. 5. Радиус кривизны образца из полиамида  $d=3\text{мм}$ ,  $a=45\text{мм}$

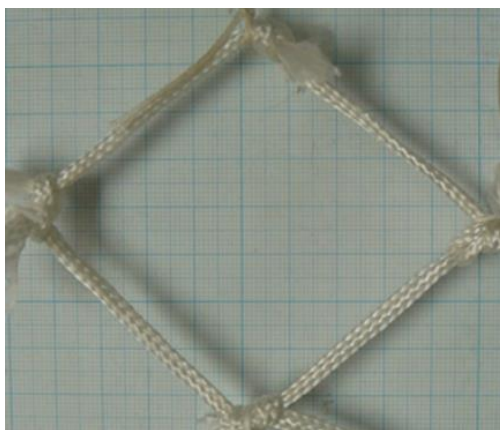


Рис. 6. Ячея из полиамида,  $d=3\text{мм}$ ,  $a=45\text{мм}$

Проведенный авторами статьи анализ результатов экспериментов на синтетических ячеях разного шага и диаметра показывает, что при увеличении скорости и глубины траления необходимо учитывать силы гидродинамического сопротивления, на основании того, что при этих параметрах достигают значительных величин. В процессе эксплуатации орудий лова гибкий шнуры меняют свою изначальную форму в отличие от твердых тел.

В данной статье был рассмотрен метод расчета напряжений и формы элементарной ячеи рыболовного тралового мешка, под действием внешних сил с учетом изгибной жесткости.

Данная работа была выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Калининградской области в рамках научного проекта № 19-48-390004.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Digre H., Hansen U.J., Erikson U. 2010. 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*. *Fisheries Science*, 76, 549-559.
2. Bayse S.M., Herrmann B., Lenoir H., Depestele J., Polet, H., Vanderperren E., Verschueren B. 2016. Could a T90 mesh codend improve selectivity in the Belgian beam trawl fishery? *Fisheries Research*, 174, 201-209.
3. Herrmann B., Priour D., Krag L.A., 2007. Simulation-based study of the combined effect on cod-end size selection of turned meshes by 90° and reducing the number of meshes in the circumference for round fish. *Fisheries Research*, 84: 222-232.
4. Madsen, N., Herrmann, B., Frandsen, R.P., Krag, L.A., 2012. Comparing selectivity of a standard and turned mesh T90 codend during towing and haul-back. *Aquatic Living Resources*, 25: 231-240.
5. Токаç А., Herrmann B., Aydin C., Kaykaç H., Ünlüler A., Gökçe G., 2014. Predictive models and comparison of the selectivity of standard (T0) and turned mesh (T90) codends for three species in the Eastern Mediterranean. *Fisheries Research*, 150: 76-88.
6. Мирошник Р.А. Расчет гибких стержней, обладающих изгибной жесткости. *Ученые записки ЦАГИ*. - 1990. - Том XXI. - № 5. - С. 1354-138.
7. Moderhak W., 2007. Influence of twine parameters on the shapes of meshes and T90 codends, in: *International Workshop Methods for the Development and Evaluation of Maritime Technologies (DEMaT'07)*, ROSTOCK, Germany.
8. Morvana B., Prioura D., Guedeb Z., Blesc G. 2016. Finite element model for the assessment of the mesh resistance to opening of fishing nets. *Ocean Engineering*, V. 123, 303-313.
9. Недоступ А.А., Ражев А.О., Наумов В.А., Дятченко С.В., Коновалова К.В., Соколова Е.В. Расчет прогиба композитного ваера численным методом точечных масс при компьютерном моделировании. *Морские интеллектуальные технологии*. №2. том 1. 2020. - С. 210-215.

## NUMERICAL SOLUTION OF THE PROBLEM OF DEFINITION OF STRUCTURAL, GEOMETRIC AND FORCE CHARACTERISTICS OF A MESH

<sup>1</sup>Nedostup Aleksandr Alekseevich, associate professor, PhD in Technical Sciences

<sup>2</sup>Konvalova Karina Vitalyevna, graduate student

<sup>3</sup>Naumov Vladimir Arkadievich, doctor of Technical Sciences

<sup>1,2,3</sup>Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia, e-mail: <sup>1</sup>nedostup@klgtu.ru;

<sup>2</sup>karina.konvalova4382@mail.ru; <sup>3</sup>van-old@mail.ru

*Solving the problem of trawl bag selectivity is a priority task. The selectivity depends on the size composition of the fished species as well as the shape of the trawl bag mesh itself. In trawl bags with a diamond-shaped T0 mesh, as the catch accumulates, the meshes begin to tighten and close. The square T45 and delta T90 meshes are designed to reduce bycatch of juvenile fish, since the meshes do not close under tension. The authors of the article proposed a numerical solution of the problem of dependence of structural, geometrical and force characteristics of the elementary mesh.*

## К ПРИМЕНЕНИЮ ТЕОРИИ НАГРУЖЕНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ СИНТЕТИЧЕСКИХ РЫБОЛОВНЫХ МАТЕРИАЛОВ

<sup>1</sup>Недоступ Александр Алексеевич, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой промышленного рыболовства

<sup>2</sup>Насенков Павел Владимирович, специалист по УМР в УИЛ САПР техники промышленного рыболовства

<sup>3</sup>Пивоварова Юлия Сергеевна, магистрант кафедры промышленного рыболовства

<sup>1,2,3</sup>ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет», Калининград, Россия, e-mail: <sup>1</sup>nedostup@klgtu.ru; <sup>3</sup>yuliya.pivovarova@klgtu.ru

*Рассматриваются подходы к применению теории нагружения и разрушения синтетических рыболовных материалов при одноосных растяжении и сжатии. Синтетические рыболовные материалы относятся к анизотропным полимерам. В промышленном рыболовстве применяют для изготовления канатно-веревочных и нитевидных, а также плетеных шнуров полимерные волокна из: полиамида, полиэфира, поливинилспирта, поливинилхлорида, поливинилденхлорида, полипропилена, полиэтилена, полиформальдегида. Высокомолекулярным полиэтиленом является материал – Дупеета. Разрушение – это процесс накопления повреждений, происходящий во времени и в пространстве. Заканчивается этот процесс потерей несущей способности из-за потери сплошности. Разрушения подразделяют на локализованные и объемные по характеру активизации процесса в пространстве. Локализованное разрушение представляет собой развитие и распространение одной или нескольких обрывах волокон синтетических рыболовных материалов. Важной задачей механики синтетических рыболовных материалов является создание фундаментальных основ для описания процессов их разрушения при деформировании в процессе эксплуатации, то есть разработка основ механики разрушения (построение моделей и алгоритмов расчёта конструкций и технологических процессов при больших пластических деформациях с учётом разрушения). В частности, теория позволяет решать нелинейные задачи, учитывающие изменения геометрии деформируемых синтетических рыболовных материалов; получать аналитические решения различных задач.*

Проблема достижения синтетических рыболовных материалов предельного состояния в настоящее время рассматривается, как правило, эмпирически [1]. Экспериментальные подходы определения предельных состояний связаны с исследованиями в рамках теории малоциклового усталости при разрушении материалов, зависящих от их пластических свойств и мало от упругих констант.

Синтетические рыболовные материалы являются твердыми телами (в механике) и относятся к анизотропным полимерам. Синтетические высокомолекулярные полимеры образуют новый класс материалов, включающий разнообразные изделия. В промышленном рыболовстве применяют для изготовления канатно-веревочных и нитевидных, а также плетеных шнуров полимерные волокна из: полиамида, полиэфира, поливинилспирта, поливинилхлорида, поливинилденхлорида, полипропилена, полиэтилена, полиформальдегида. Высокомолекулярным полиэтиленом является материал - Дупеета. Синтетические рыболовные материалы никогда не бывают идеально упругими; часть энергии, затрачиваемой на их деформирование, рассеивается на преодоление вязкого сопротивления движению молекулярных цепей и на разрушение структуры, которая включает дисперсные твердые частицы наполнителя или кристаллические области. Эти потери энергии, как недавно было показано, определяют сопротивление материалов различным типам разрушения: разрушению при разрыве, раздире, поверхностному растрескиванию, трещинообразованию и разрушению при вторичных деформациях (усталости) и абразивному износу. Полученные результаты исследований позволяют свести многочисленные различия в поведении синтетических рыболовных материалов разных типов в широкой области температур и скоростей разрушения к общей модели. Эти данные указывают также в каждом частном случае на большое значение механики разрушения. Как способ,

которым упругая энергия преобразуется в работу разрыва молекулярных связей, так и эффективность этого преобразования зависят от механических характеристик. Синтетические рыболовные материалы можно сравнить с полимерами [2-28] и их свойствами [29-31].

Физико-механические свойства изготовленных изделий, а также любого куска сетного полотна или дели определенной формы всегда представляют собой функции времени и температуры. Они не могут быть совершенными, так как практически невозможно, чтобы все части изделия имели одну и ту же историю, и свободную поверхностную энергию; следовательно, они содержат дефекты, трещины, дислокации, включения и т. д., которые порождают деформации и эквивалентны неравновесным локальным доменам. Итак, единицы массы, которые образуют домены, отклоняются от равновесия настолько, что их локальные флуктуации плотности и упорядоченные области превышают термодинамические флуктуации. Отсюда следует, что все «твердые тела», к которым причисляют все типы синтетических рыболовных материалов неоднородны по структуре, по свободным энергиям микросостояний и по их физико-механическим свойствам.

Свойства синтетических рыболовных материалов зависят от нескольких групп факторов: первая группа - это физико-механические характеристики и их свойства, из которых изготовлены материалы, а это канаты, веревки, нити и др. изделия; вторая группа факторов определяет особенности структуры изделия, которое состоит из свивки волокон, нитей или каболок. Качество синтетических рыболовных материалов и изделий зависит от прочности волокон и от структуры самого изделия. С учетом импортозамещения Российской Федерации потребуются наращивать выпуск высокомолекулярных полимеров, из которых изготавливают волокна. Современные орудия промышленного рыболовства испытывают большие динамические нагрузки, имеют формоизменяемые конструкции, не позволяющие обходиться для их расчета простыми моделями определения прочности изделия и всего орудий рыболовства. При этом при их проектировании задают коэффициент запаса прочности синтетических рыболовных материалов порядка  $n_p=20$ , что ведет к повышенной материалоемкости и большим экономическим затратам. Дальнейшие пути развития производства синтетических рыболовных материалов должно привести к решению проблемы повышения их прочности.

Для получения новых синтетических рыболовных материалов необходимо исследовать процесс их деформирования при растяжении, на основе методов механики и химии материалов. Определение закономерностей деформирования синтетических рыболовных материалов, покажет пути дальнейшего повышения прочности изделий в технологических процессах их изготовления и производства орудий рыболовства.

Взаимодействие молекул полимерных волокон подчиняется законам квантовой механики, статистической физики (из-за неравномерности изделий) и термодинамики. Взаимодействие волокон, нитей, каболок и прядей (далее элементарная единица изделия) подчиняется законам классической механики. Взаимодействие элементарных единиц изделия в нитках, веревках, канатах и др. изделиях происходит в результате их взаимодействия посредством процесса трения. Рассмотрим диссипативный процесс взаимодействия волокон, в результате которого происходит преобразование механической энергии в тепловую [32,33].

Приведем типы разрушения для одноосных растяжения и сжатия:

- хрупкое и вязкое поведение синтетических рыболовных материалов, а также хрупко-вязкий переход;

- разрушение, зависящее от времени;
- разрушение, зависящее от времени и температуры;
- разрушение, зависящее от влажности и температуры;
- разрушение при рывке.

Процесс разрушения синтетических рыболовных материалов можно описать (качественно) путем деления его на три стадии:

- 1) возбуждение молекулярных связей приложенным напряжением;
- 2) разрушение молекулярных связей путем температурных колебаний;
- 3) концентрация разрушенных связей, ведущая к нестабильности.

Исследователями проработан конечно-элементарный анализ и расчет прогиба композитного ваера численным методом точечных масс при компьютерном моделировании [34]. Анализ результатов численных и натурных экспериментов на синтетических нитках показал, что погрешность геометрических характеристик не превышает 5 %, что достаточно для большинства задач по расчету



механических свойств синтетических рыболовных материалов. Полученную математическую модель возможно оптимизировать методом распараллеливания вычислений для современных многоядерных и гетерогенных систем, к которым относится большинство современных персональных компьютеров. Недостатком модели [34] является увеличение погрешности результатов при больших, близких к разрывным, нагрузках синтетических рыболовных материалов, а также при больших его изгибах в следствии их нелинейной природы.

Приведем основные физико-механические и термодинамические характеристики синтетических рыболовных материалов [35,36]:

- конструктивные:  $T_n$  - линейная плотность;  $\rho$  - плотность;  $v$  - безразмерный объем;  $\theta$  - безразмерная плотность;  $\xi$  - композитность (неоднородность);  $\zeta$  - крутка (плетение);  $F_o$  - сплошность;

- геометрические:  $d$  - диаметр (первоначальный, условный);  $d_u$  - истинное значение диаметра (измененный в процессе растяжения);  $l_e$  - длина волокна;  $l$  - длина изделия;  $\lambda$  - удлинение изделия (первоначальное);  $l_f$  - характерный размер дефекта (трещины);

- силовые:  $\varepsilon$  - относительное удлинение ( $\varepsilon = \varepsilon_y + \varepsilon_{эл} + \varepsilon_{пл}$ , где  $\varepsilon_y$  - упругая (быстрообратимая) часть деформации;  $\varepsilon_{эл}$  - эластическая (медленнообратимая) часть деформации;  $\varepsilon_{пл}$  - пластическая (необратимая) часть деформации);  $\varepsilon_d$  - относительное сжатие (расширение);  $\mu$  - коэффициент Пуассона;  $A_x$  - работа силы растяжения в продольном направлении, оси ОХ;  $A_y$  - работа силы «сжатия» в поперечном направлении, оси ОУ;  $T_x$  - натяжение (сжатие) в продольном направлении, оси ОХ;  $T_y$  - натяжение (сдавливание) в поперечном направлении, оси ОУ (условные силы);  $v_x$  - скорость растяжения;  $v_y$  - скорость сдавливания;  $w_x$  - ускорение растяжения;  $w_x = d^2x/dt^2$ ;  $w_y$  - ускорение сдавливания,  $w_y = d^2y/dt^2$ ;  $N_x$  - производительность продольных сил;  $N_y$  - производительность условных поперечных сил;  $E_x$  - условный модуль упругости в поперечном сечении;  $E_y$  - условный модуль упругости в продольном сечении;  $T'_x$  - компенсационная сила в продольном направлении;  $T'_y$  - компенсационная сила в поперечном направлении;  $\sigma_x$  - прочность в поперечном сечении (напряжение);  $\sigma_y$  - прочность в продольном сечении (напряжение);  $\sigma_u$  - истинная прочность в поперечном сечении (напряжение);

- термодинамические:  $U$  - упругая энергия;  $U_0$  - энергия разрыва связи;  $T^o$  - температура;  $\Delta T^o$  - разница температур;  $M_r$  - молекулярный вес (относительная молекулярная масса); степень поперечных связей; молекулярная ориентация;  $\gamma$  - поверхностная энергия разрушения, структурный параметр.

Следует добавить к описанию процесса натяжения и разрушения синтетических рыболовных материалов время данного процесса  $t$ .

К основным факторам внешнего воздействия следует отнести температуру, время, давление, вид напряженного состояния, среду (контакт с химически активным веществом). На деформационные и прочностные свойства влияют также конструктивные и технологические факторы, такие как размеры синтетических рыболовных материалов, наполнение, латексирование, термообработка. Влияние конструктивных и технологических факторов связано со структурой синтетических рыболовных материалов, поэтому объяснение характера изменения механических свойств требует физического подхода к рассматриваемому вопросу. В инженерных расчетах, как правило, используют результаты феноменологических исследований влияния температуры, времени (скорости) и давления.

Изобразим на рис. 1 картину деформации большей части материалов схематически [30]. На рис. 1 изображено: I - упругость по закону Гука, а также линейная вязкоупругость; II - нелинейная вязкоупругость;  $S_B$  - хрупкая прочность; III - точка предела текучести; V - предел текучести; H - гистерезис кривой возврата; N - область шейки; IV - начало упрочнения; s - остаточная деформация, зарождение разрушения; R - вязкоупругое разрушение; T - вязкое разрушение; V - пластическое течение; ER - частичный упругий, упруговязкий или упругопластический возврат; VI - деформационное упрочнение; VII - волокнистый разрыв; DR - вязкий разрыв; VIII - вязкое разрушение.



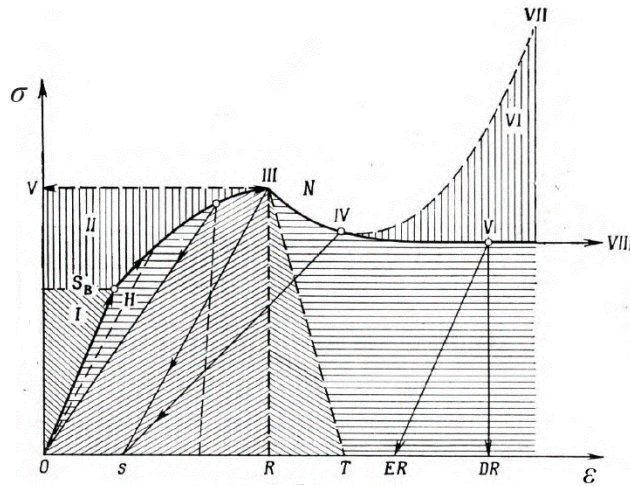


Рис. 1. Зависимость  $\sigma = f(\epsilon)$

В процессе эксплуатации все материалы отклоняются от закона Гука различными способами, к примеру, проявляя вязкоподобные и эластичные свойства. У вязкоупругих материалов соотношение между напряжением и нагрузкой зависит от времени и температуры.

Представим основные модели линейной вязкоупругости синтетических рыболовных материалов:

- модель Максвелла;
- модель Кельвина-Фойгта;
- стандартная линейная модель твердого тела.
- принцип Больцмана-Вольтерра;
- упруго-вязкопластический закон деформирования.

На основании вышеприведенных моделей возможно определить физико-механические свойства синтетических рыболовных материалов, при этом в большинстве моделей задаются аппроксимирующие зависимости продольного модуля упругости и др. параметров. Это затрудняет решение простых, но в тоже время важных задач по обоснованию коэффициента запаса прочности.

Любой рыболовный материал под нагрузкой разрушается либо хрупко (к примеру из Дупеета), либо вязко. На сегодняшний день нет такой теории, которая бы для любого вида напряженного состояния однозначно устанавливала и характер разрушения, и величину предельных напряжений. Критерии предельного состояния сопротивления материалов применимы для оценки несущей способности твердых тел как в однородных, так и в неоднородных полях напряжений. В последнем случае под потерей несущей способности понимают возникновение предельного состояния в локальной области в окрестности наиболее напряженной точки, которую называют опасной (к примеру, в канатных тралах - это огоны канатных связей). В настоящее время существует большое количество критериев прочности, из них наибольшее признание получили классические. Именно классические гипотезы прочности рекомендуются во всех современных учебниках по сопротивлению материалов в России [37,38].

Первый критерий (1-ая теория прочности (теория наибольших нормальных напряжений): причиной наступления предельного напряженного состояния являются наибольшие нормальные напряжения). Этот критерий хорошо соответствует опытным данным, полученным при испытаниях различных материалов в условиях одноосного растяжения. Можно считать, что в настоящее время этот критерий не вызывает сомнения. Максимальные напряжения в материалах или изделиях не должны превышать допусковых напряжений

$$\sigma_{\max} \leq [\sigma], \quad (1)$$

где  $\sigma_{\max}$  - максимальное растягивающее напряжение,  $\sigma > 1$ , Н/м<sup>2</sup>;  $[\sigma]$  - предельное (допустимое) напряжение, Н/м<sup>2</sup>.

Предельное (допустимое) напряжение  $[\sigma]$  определяется по формуле

$$[\sigma] = \frac{\sigma_V}{n_p}, \quad (2)$$

где  $\sigma_V$  - напряжение предела текучести материала или изделия.

Опыты показывают, что прочность синтетических рыболовных материалов сильно зависит от дефектов структуры, а величина предельного напряжения имеет явный статистический характер. Поэтому все предельные поверхности в осях главных напряжений представляют собой совокупность среднестатистических значений напряжений, при которых материал переходит в разрушенное состояние мгновенно, если рассматривается кратковременная прочность, или по истечении гарантированного периода времени, называемого долговечностью, если речь идет о длительной прочности материала. Как уже отмечалось выше, при проектировании орудий промышленного рыболовства задают коэффициент запаса прочности синтетических рыболовных материалов порядка  $n_p=20$ .

Второй критерий. В 1951 году В.Р. Регелем [39] был установлен универсальный характер временной зависимости прочности в виде

$$\sigma = \beta \lg(a/t), \quad (3)$$

$$t = ae^{-\beta\sigma}, \quad (4)$$

где  $a$  и  $\beta$  - константы материала (определяются экспериментально);  $t$  - долговечность, или время, в течение которого в нагруженном материале происходят процессы, приводящие к разделению его на части (к хрупкому разрушению).

Сложности использования формул (3) и (4) заключается в поиске констант материала  $a$  и  $\beta$ , причем они зависят также и от температуры, скорости разрыва и от др. параметров.

Большое число экспериментальных данных, полученных на разнообразных материалах, может быть описано формулой

$$t = t_0 e^{\left[ \frac{U_0 - \gamma\sigma}{\kappa T^0} \right]}, \quad (5)$$

где  $t$  - время разрушения материала или изделия при напряжении  $\sigma$  и температуре  $T^0$ ;  $t_0$  - период атомных колебаний;  $U_0$  - энергия активации процесса термического разложения материала (энергия разрыва связи);  $\gamma$  - поверхностная энергия разрушения (свободный параметр связан со структурой материала, в частности со степенью ориентации структуры);  $\kappa$  - константа Больцмана.

Единственный путь проверки и подтверждения зависимости (5) состоит в сравнении экспериментально найденных величин, входящих в них параметров с их значениями, определенными из независимых соображений, что представляет собой большие сложности.

Третий критерий. Теория Гриффетса [29]. Гриффетсом было предположено, что изделие или материал становится неустойчивым и трещина в нем начинает расти, если общая энергия уменьшается с ростом трещины. Этот критерий непосредственно ведет к выражению для критического напряжения  $\sigma_V$

$$\sigma_V = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi c_t}}, \quad (6)$$

где  $E$  - модуль Юнга;  $c_t$  - половина длины трещины;  $\gamma$  - поверхностная энергия разрушения, структурный параметр феноменологической теории Журкова [31].

Полученная формула (6) дает соотношение между прочностью при растяжении материала и размером дефекта, который по предположению в нем содержится. Отметим, что параметр  $\gamma$  является вводимым, определение которого требует проведение экспериментальных исследований.

Четвертый критерий. В основе критерия лежит принцип Больцмана-Вольтерра, согласно которому деформация  $\varepsilon$  и механическое напряжение  $\sigma$  однозначно определяются системой

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon(t) &= D_0\sigma + (D_\infty - D_0) \int_0^t \psi'_a \sigma(\theta) d\theta \\ \sigma(t) &= E_0\varepsilon + (E_\infty - E_0) \int_0^t \psi'_a \varepsilon(\theta) d\theta \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

где  $D_0 = 1/E_0$  - упругая податливость;  $D_\infty$  - податливость в условии равновесия;  $E_0$  - модуль упругости;  $E_\infty$  - модуль вязкой упругости;  $\psi_{et}$  - функция времени  $t$  релаксации, зависящее от деформации  $\varepsilon$ ;  $\psi_{\sigma t}$  функция времени  $t$  релаксации и  $\psi_{\sigma t}$  - функции времени  $t$  запаздывания, зависящее от нагрузки  $\sigma$ , а также от константы материала [5].

Пятый критерий. Закон Гука. Стандартная линейная модель твердого тела (характеризует упругую деформацию)

$$\sigma = \varepsilon E. \quad (8)$$

Шестой критерий. Исследователями предложен физически нелинейный упруго-вязкопластический закон деформирования полимера [40].

$$\frac{d\sigma}{E_D(\varepsilon)dt} + \mu(\varepsilon) \frac{\sigma}{E_S(\varepsilon)} = \frac{d\varepsilon}{dt} + \mu(\varepsilon)\varepsilon \quad \text{при} \quad \frac{d\varepsilon}{dt} > 0 \quad \varepsilon < \varepsilon_k, \quad (9)$$

$$\sigma = 0 \quad \text{при} \quad \varepsilon < \varepsilon_k,$$

где  $E_D(\varepsilon)$  - динамический модуль растяжения, зависящий от  $\varepsilon$ ;  $E_S(\varepsilon)$  - статический модуль растяжения, зависящий от  $\varepsilon$ ;  $\mu(\varepsilon)$  - функция параметра вязкости, который связан коэффициентом вязкости (внутреннее трение) [40].

Седьмой критерий. Соловьевым А.Н. [41] предложена формула для определения натяжения пряжи

$$T_p = T_v n_p + T_c n_c, \quad (10)$$

где  $T_v$  - натяжение при обрыве;  $n_p$  - число разорвавшихся волокон хлопка в пряже при растяжении;  $T_c$  - средняя сила тангенсального сопротивления скользящих волокон в пряже при ее растяжении;  $n_c$  - число скользящих волокон в сечении пряжи.

Восьмой критерий. Кузнецовым А.А. [42] предложена математическая модель

$$\sigma = \frac{\varepsilon}{b_0 + b_1 \varepsilon} + b_2 \varepsilon^2, \quad (11)$$

где  $b_0$ ,  $b_1$  и  $b_2$  - параметры модели.

Девятый критерий. Для учета особенностей поведения полимеров в широком диапазоне изменения условий нагружения целесообразно привлечь максвелловский подход к описанию необратимых процессов в сплошных средах. Этот подход позволяет сочетать преимущества макроскопического описания с позиций механики сплошных сред с учетом микроструктурных механизмов необратимого деформирования. Система основных уравнений модели имеет вид [43]

$$\left. \begin{aligned} \frac{du_i}{dt} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial r_j} &= 0, & \frac{de}{dt} - \frac{\sigma_{ij}}{\rho} \frac{\partial u_i}{\partial r_j} &= 0, \\ \frac{dG}{dt} - GW + W_0 G + \frac{1}{\tau} \left( G + \frac{3\rho}{2R} I \right) &= 0, \\ G = \|g_{ij}\|, & W = \left\| \frac{\partial u_i}{\partial r_j} \right\|, & W_0 = \left\| \frac{\partial u_i}{\partial r_j} \right\|, \\ R = \frac{\partial \rho}{\partial g_{kk}}, & \frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u_k \frac{\partial}{\partial r_k}, \\ \rho = \rho_0 \sqrt{\det G}, & \sigma_{ij} = -2\rho g_{ik} \frac{\partial e}{\partial g_{ki}} \\ e = e(g_{ij}, S_s), & \tau = \tau(g_{ij}, S_s) \end{aligned} \right\}, \quad (12)$$

где  $G$  - метрический тензор;  $g_{ij}$  - нешаровый тензор деформации;  $W$ ,  $W_0$ ,  $R$  и  $\sigma_{ij}$  - компоненты тензора напряжений;  $u_i$  - компоненты вектора скорости;  $\rho_0$ ,  $\rho$  - начальная и текущая плотности;  $e$  - удельная упругая (внутренняя) энергия;  $S_s$  - энтропия;  $\tau$  - время релаксации касательных напряжений;  $t$  и  $r_j$  - время и пространственные координаты;  $i, j=1, 2, 3$ ;  $I$  - единичный тензор.

Десятый критерий. Запишем напряжение и продольный модуль упругости в виде

$$\sigma_x = \frac{u}{a_u \varepsilon}, \quad (13)$$

$$E_x = \frac{u}{a_u \varepsilon^2}, \quad (14)$$

где  $u$  - упругая энергия на единицу объёма (удельная потенциальная энергия);  $a_u$  - коэффициент

$$0 \leq a_u \leq 1,$$

для линейно упругого тела  $a_u=0,5$  при выполнении закона Гука и  $E_x \neq f(\varepsilon)$ .

Отметим

$$u = c' \Delta T^0, \quad (15)$$

где  $c'$  - объемная теплоемкость (теплоемкость единицы объема тела),

$$c' = \frac{C}{V}. \quad (16)$$

Теплоемкость синтетических рыболовных материалов  $C$

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T^0}, \quad (17)$$

где  $\Delta Q$  - количества теплоты;  $\Delta T^0$  - изменение температуры.

Важным условием гипотезы плоских сечений для общего случая нагружения является выражение [44]

$$\varepsilon = \frac{\sigma_x}{E_x} + \alpha_x \Delta T^0 + \varepsilon^0, \quad (18)$$

где  $\alpha_x$  - коэффициент линейного расширения вдоль оси растяжения (относительное изменение линейных размеров тела, происходящее в результате изменения его температуры на 1 К при постоянном растяжении или сжатии) [K<sup>-1</sup>], характеризует пластическую деформацию;  $\varepsilon^0$  - дополнительная (неупругая) деформация.

На основании теории мультифизического подобия приведем графики зависимостей масштабов подобия  $C_E=f(C_v)$  - зависимость масштаба продольного модуля упругости от масштаба скорости (см. рис. 2);  $C_E=f(C_c)$  - зависимость масштаба продольного модуля упругости от масштаба теплоемкости (см. рис. 3);  $C_E=f(C_c')$  - зависимость масштаба продольного модуля упругости от масштаба объемной теплоемкости (см. рис. 4).

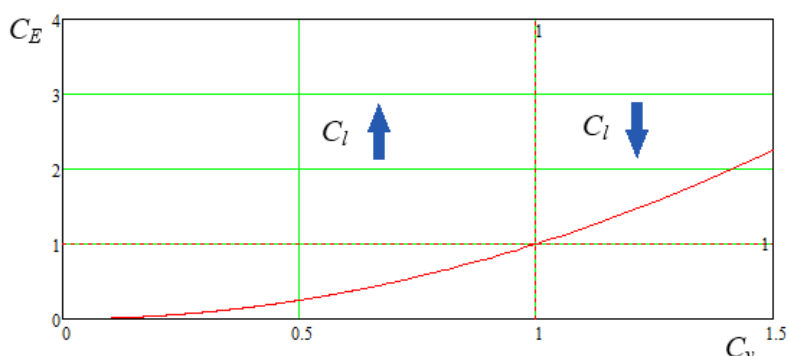


Рис. 3. Зависимость  $C_E=f(C_v)$

На графиках 2-4 отображен масштаб геометрических размеров  $C_l$  и его влияние на масштаб  $C_E$ . Связь механических и термодинамических характеристик (см. рис. 3 и 4) подтверждает, что продольный модуль упругости  $E$  зависит от скорости  $v$  и теплоемкости  $C$ .

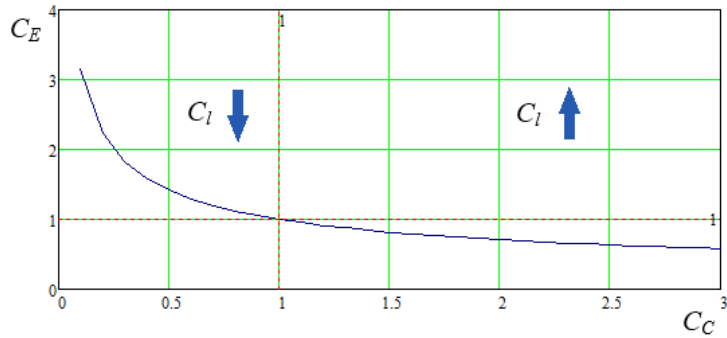


Рис. 4. Зависимость  $C_E=f(C_C)$

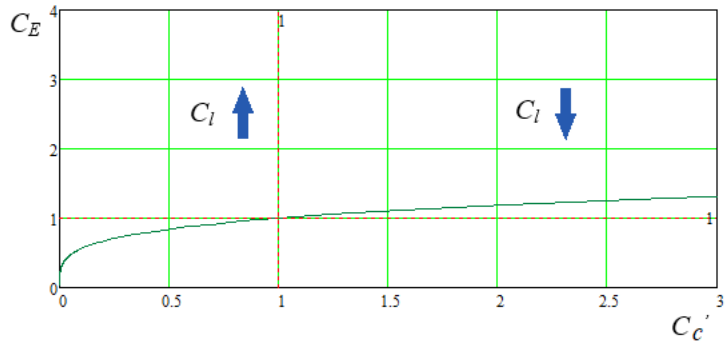


Рис. 5. Зависимость  $C_E=f(C_{c'})$

На основании данных [45-46] приведем упрощение, используемое в текстильной промышленности, - это замена реальной формы поперечного сечения нити кругом, равновеликим реальному сечению нити. Радиус круга равен

$$d = 2 \sqrt{\frac{T_{\text{текс}}}{\pi \rho}}, \quad (19)$$

где  $T_{\text{текс}}$  - линейная плотность нити, текс;  $\rho$  - объемная плотность материала нити.

Причем линейная плотность нити в СИ

$$T_{\text{текс}} = 10^{-6} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]. \quad (20)$$

Основополагающей теорией разрушения материалов является теория Гриффитса, основанная на подходах механики сплошной среды и одинаково применима к любому материалу, лишь бы его свойства не противоречили основополагающим предположениям модели. Поскольку теория Гриффитса основана на классической упругой модели, она не может в своей первоначальной форме объяснить наблюдаемую зависимость времени до разрушения от приложенной нагрузки. В самом деле, из гриффитсовской теории следует, что материал может бесконечно долго выдерживать напряжение, сколь угодно близкое к критической величине, но не превышающее эту величину. Теории приводят к уравнениям, связывающим время до разрушения с приложенным напряжением и температурой; полученные уравнения согласуются с экспериментальными данными в некотором диапазоне изменения существенных переменных для данного материала. Форма уравнений может быть различной в зависимости от принятых допущений, соответственно с этим разные теории по-разному трактуют входящие в уравнения константы материала.

Важным обстоятельством выбора критерия, по которому определяется прочность  $\sigma$  элементов орудий промышленного рыболовства является простота и надежность критерия. В этой связи пятый критерий - Закон Гука наиболее полно удовлетворяет предъявляемым требованиям, при этом область в которой Закон Гука (7) выполняется относительно небольшая (см. рис. 1, область I). На основании вышеприведенных исследований, а также [47-49] запишем Закон Гука в виде

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \varepsilon E \\ E &= f(\rho, E_m, \varepsilon, v, F_o, T^o, C, W_e, \rho_e) \end{aligned} \right\}, \quad (21)$$

где  $\rho$  - плотность материала;  $E_m$  - относительная деформация материала;  $v$  - скорость деформации;

$T^o$  - температура;  $W_6$  - влажность;  $\rho_6$  - плотность среды (к примеру, воды с определённой солёностью);  $F_o$  - сплошность, соотношение площади сечений несплошностей (волокон) и площади изделия, обозначаемое

$$F_o = \frac{n \sum S_v}{S_k}, \quad (22)$$

где  $n$  - количество волокон или нитей в сечении;  $S_v$  - площадь сечения волокна или нити,  $S$  - условная площадь сечения изделия,

$$S_v = \frac{\pi d_v^2}{4}, \quad (23)$$

где  $d_v$  - диаметр волокна или нити,

$$S = \frac{\pi d^2}{4}, \quad (24)$$

где  $d$  - диаметр изделия.

Или (19) в виде с учетом (20) и (21)

$$F_o = \frac{n \sum d_v^2}{d^2}. \quad (25)$$

Сплошность КВИ и ПШ находится в диапазоне  $0 \leq F_o \leq 1$ . Сплошность определяется теоретически по номеру волокна или нити, нитки, веревки, каната или шнура, по линейной плотности, а также с помощью спектрометра экспериментально.

Введем допущения: волокна, нити, каболки, пряди, стренги и сами изделия в сечении имеют форму окружности. Площадь сечения  $S$  величина переменная и зависит от нагрузки  $T$ , температуры и коэффициента Пуассона  $\mu$ . Продольный модуль деформации  $E$  величина переменная и зависит от нагрузки, температуры и коэффициента Пуассона  $\mu$ . Влияние температуры на процесс разрушения КВИ и ПШ в данной статье не рассматривается. Рассматриваем одноосное нормальное напряжение. Обычная ситуация с простой структурой напряжений наблюдается в прямом КВИ и ПШ, которые подвергаются растяжению под действием противоположно направленных сил вдоль своей оси (растяжение).

#### Сделаем выводы:

1. Теория разрушения синтетических рыболовных материалов является наиболее важным в применении для обоснования и расчета проектных характеристик орудий промышленного рыболовства и прогнозирования физико-механических свойств синтетических рыболовных материалов.

2. В цикле деформации синтетических рыболовных материалов цепные молекулы вначале вытягиваются путем сегментального движения, а затем удерживаются от расплывания вследствие макроскопической природы сетки. Сопротивление деформации в этой области изменяется почти линейно (8).

3. Все рассмотренные процессы деформации геометрически, но не энергетически обратимы.

4. Все модели процесса разрушения (1) - (12) возможно применять для расчета физико-механических свойств синтетических рыболовных материалов при условии определенности в аппроксимирующих зависимостях продольного модуля упругости и др. параметров.

5. Важной задачей механики синтетических рыболовных материалов является применение формула (8) для описания процессов их разрушения при деформировании в процессе их эксплуатации, а также в процессе жизненного цикла изделия. При этом параметры  $E$  и  $\epsilon$  зависят от множества характеристик, приведенных в статье.

6. В случае с полимерами все совершенно иначе. Отдельные молекулы, из которых состоят полимерные материалы, очень большие и имеют форму протяженной цепочки, в результате чего их структура весьма запутана. В каких-то моментах это свойство даже полезно, ведь способность полимеров к растяжению без разрушения в значительной степени обусловлена именно переплетением цепей. Однако с другой стороны такая структура ограничивает свободу, необходимую на молекулярном уровне для организации кристаллов. Следовательно, ни один полимер при нормальных условиях обработки не может быть полностью кристаллическим, а некоторые полимеры вообще не способны кристаллизоваться в какой-либо значительной степени.

7. Для синтетических рыболовных материалов (полимеров) любые изменения температуры  $T^{\circ}$  влияют на механические свойства этих материалов.

Дальнейшие исследования физико-механических свойств синтетических рыболовных материалов направлены на получение явных зависимостей (21), а также в получении явных значений коэффициента  $c$  для различных синтетических рыболовных изделий при соответствующей скорости растяжения, температуре и теплоемкости  $C$ .

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. Баранов Ф.И. Избранные труды/ Ф.И. Баранов// Техника промышленного рыболовства. - М.: Пищевая пром-сть. - 1969. - Т 1. - 719 с.
2. Щербаков В.П. Прикладная и структурная механика волокнистых материалов. - М.: Тисо-принт, 2013. 304 с.
3. Степашкина А.С., Шахова Е.А., Москалюк О.А., Чупринова О.В., Цобкалло Е.С. Прогнозирование механических свойств одномерных полимерных структур // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 6. С. 883-887.
4. Головина В.В., Шахова Е.А., Рымкевич П.П. Уравнение состояния полимерных нитей// Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 6. С. 877-882. doi:
5. Макаров А.Г. Методы математического моделирования механических свойств полимеров / А.В. Демидов. СПб.: Изд-во СПб гос. ун-та технологии и дизайна, 2009. - 392 с.
6. Ферри Дж. Вязкоупругие свойства полимеров / М.: Наука, 1970. - 535 с.
7. Сталевиц А.М. Деформирование ориентированных полимеров / СПб.: Изд-во СПГУТД, 2002. - 250 с.
8. Rymkevich P.P. The energy barriers model for physical description of viscoelasticity of synthetic polymers: application to the uniaxial orientational drawing of polyamide films / P.P. Rymkevich, A.A. Romanova, V.V. Golovina, and A.G. Makarov // J. of Macromolecular Science, Part B: Physics, 2013, 52, - С. 1-19.
9. Ломов. С. В. Прогнозирование строения и механических свойств тканей технического назначения методами математического моделирования: дис. ... доктора техн. наук / С. В. Ломов. - Санкт-Петербург, 1995. - 486 с.
10. Примаченко Б. М. Разработка методов прогнозирования структуры и эксплуатационных свойств тканей бытового и технического назначения на основе технологических параметров их производства: дис. ... доктора техн. наук / Б. М. Примаченко. - Санкт-Петербург, 2009. - 406 с.
11. Аскадский А.А. Деформация полимеров / А.А. Аскадский. М: Химия, 1973. - 448 с.
12. Morton W.E., Hearle J.W.S. Physical properties of textile fibers. Fourth edition. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2008. P.765.
13. Ван Кревелен Д.В. Свойства и химическое строение полимеров / Д.В. Ван Кревелен. - М.: Химия, 1976. - 414 с.
14. Перепечко И.И. Введение в физику полимеров / И.И. Перепечков М.: Химия, 1978. -312 с.
15. Бартенев Г.М. Курс физики полимеров / Г.М. Бартенев, Ю.В. Зеленев. - М.: Высшая Школа, 1983. - 391 с.
16. Кулезнев В.Н. Химия и физика полимеров / В.Н. Кулезнев, В.А. Шершнев. - М.: Высшая школа, 1988. - 312 с.
17. Тугов И.И. Химия и физика полимеров / И.И. Тугов, Г.И. Кострыкина // Учебное пособие для вузов. - М.: Химия, 1989. - 432 с.
18. Бартенев Г.М. Физика полимеров / Г.М. Бартенев, С.Я. Френкель; под ред. А.М. Ельяшевича. - Л.: Химия, 1990. - 432 с.
19. Osswald T.A. International Plastic Hand-book / Т. А. Osswald, E. Baur, S. Brinkmann, K. Oberbach, E. Schmachtenberg. - Munich: Hanser Publishers, 2006. - 920 p.

20. Гуль В.Е. Структура и механические свойства полимеров / В.Е. Гуль, В.Н. Кулезнев. - М.: Издательство «Лабиринт», 1994. - 367 с.
21. Сутягин В.М. Физико-химические методы исследования полимеров / В.М. Сутягин, А.А. Ляпков. - Томск: Изд-во ТПУ, 2008. - 130 с.
22. Биргер И.А. Сопротивление материалов: Учебное пособие. / И.А. Биргер, Р.Р. Мавлютов. - М.: Наука, 1986. - 560 с.
23. Казаков Д. А. Моделирование процессов деформирования и разрушения материалов и конструкций / Д. А. Казаков, С. А. Капустин, Ю. Г. Коротких. - Н. Новгород: Изд-во Нижегородского Университета, 1999. - 226 с.
24. Коллинз Д.Ж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ предсказание предотвращение. Пер. с англ. - М.: Мир, 1984. - 624с.
25. Тагер, А.А. Физика-химия полимеров / А.А. Тагер; под ред. А.А. Аскадского. - М.: Научный мир, 2007. - 573 с.
26. Мержиевский Л.А. Моделирование деформирования и разрушения полимеров на основе максвелловского подхода/ Л.А. Мержиевский, М.С. Воронин // Известия Алтайского государственного университета. - 2012. - № 1(1). - С. 95–98.
27. Сутягин В.М. Основные свойства полимеров: Учеб. пособие / В.М. Сутягин, О.С. Кукурина, В.Г. Бондалетов. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. - 96 с.
28. Caretta S., Tovo R., Taylor D., Livieri P. Numerical evaluation of fatigue strength on mechanical notched components under multiaxial loadings // International Journal of Fatigue, 2011. - V. 33. - P. 661-671.
29. Griffith A.A. Phil. Trans. Roy. Soc. (London), Ser. A, 221, 163 (1921).
30. Разрушение. Под редакцией Либовица Г. Издательство Мир. - М.: - 1976. - с. 474.
31. Журков С. Н. Intern. J. Fracture Mech., 1, 311. 1965.
32. Севостьянов П.А., Тихомирова М.Л. Трение между нитями в тканых полотнах при их удлинении// Технологии и качество. 2019 - 3 (45). - 22-26 с.
33. Севостьянов, П. А. Алгоритм моделирования поперечного сечения одномерного волокнистого продукта / П. А. Севостьянов, Т. А. Самойлова// Материалы и технологии. - 2019. - № 2 (4). - С. 56-60.
34. Недоступ А.А., Ражев А.О., Наумов В.А., Дятченко С.В., Коновалова К.В., Соколова Е.В. Расчет прогиба композитного ваера численным методом точечных масс при компьютерном моделировании. Морские интеллектуальные технологии. №2. том 1. 2020. - С. 210-215.
35. Недоступ А.А., Ражев А.О. Производительность сил траловой системы: Постановка задачи. Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. №2. - 2021. - С. 55-65.
36. Недоступ А.А., Ражев А.О., Насенков П.В., Коновалова К.В., Быков А.А., Пивоварова Ю.С. Производительность сил траловой системы - III: математическое моделирование (часть I). Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. №4. - 2021. - С. 63-72.
37. Бриджмен П. Исследование больших пластических деформаций и разрыва. - М.: Изд-во ин. лит., 1955. - 444 с.
38. Костенко Н.А. Сопротивление материалов. Учеб. пособие / Костенко Н.А. и др.; под ред. Н.А. Костенко. - М.: Высш. шк., 2000. - 430 с.
39. Регель В.Р. О механизме хрупкого разрушения пластмасс // ЖТФ. - 1951. - Т. 21. - Вып. 3. - С. 287-303.
40. Султанов К.С., Исмаилова С.И., Туланов Ш.Э. Нелинейная упруговязкопластическая модель деформирования хлопковой пряжи при растяжении // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2016, №5 (365). С.109-115.
41. Кукин Г. Н., Соловьев А. Н. Текстильное материаловедение. - М. : Легкая индустрия, 1964. - Ч. 2. - 380 с.
42. Кузнецов А.А. Ольшанский В.И. Оценка и прогнозирование механических свойств текстильных нитей. Витебск. ВГТУ. 225 с.
43. Годунов С. К. Элементы механики сплошной среды. М.: Наука, 1978. 304 с.
44. Радченко В.П. Математическая модель неупругого деформирования и разрушения металлов при ползучести энергетического типа, Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки, 1996, выпуск 4, 43-63



45. Севостьянов П. А. Статистическая имитация растяжения и разрыва пряжи / П. А. Севостьянов // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 1981. - № 3. - С. 9-13.
46. Севостьянов П. А. Компьютерное моделирование статистической динамики удлинения и разрыва тканого полотна / П. А. Севостьянов, Т. А. Самойлов // Современные инженерные проблемы ключевых отраслей промышленности: сборник научных трудов Международного научно-технического симпозиума «Современные инженерные проблемы ключевых отраслей промышленности» Международного Косыгинского Форума «Современные задачи инженерных наук», 16 октября 2019 г. - Москва: ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2019. - 225 с. - С. 58-62.
47. Ultra-high modulus polymers/ Ed. By Ciferri A., Ward I.M. London; ASP, 1977.
48. Notholt M.G.// Polymer. 1980. V. 21. N 10. P. 1199.
49. Allen S.R., Roche E.J.// Polymer. 1989. V. 30. N 6. P. 996.

## **TO THE APPLICATION OF THE THEORY OF LOADING AND DESTRUCTION OF SYNTHETIC FISHING MATERIALS**

<sup>1</sup>Nedostup Alexander Alekseevich, Associate Professor, Ph.D., Head of the Department of Commercial Fishing

<sup>2</sup>Nasenzov Pavel Vladimirovich, specialist in EMW at the ERL CAD of commercial fishing equipment

<sup>3</sup>Pivovarova Yuliya Sergeevna, master student of the Department of Commercial Fishing

<sup>1,2,3</sup>Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia, e-mail: <sup>1</sup>nedostup@klgtu.ru;

<sup>2</sup>yuliya.pivovarova@klgtu.ru

*This article discusses approaches to the application of the theory of loading and destruction of synthetic fishing materials in uniaxial tension and compression. Synthetic fishing materials are anisotropic polymers. In industrial fishing, for the manufacture of rope-rope and thread-like, as well as braided cords, polymer fibers are used from: polyamide, polyester, polyvinyl alcohol, polyvinyl chloride, polyvinylidene chloride, polypropylene, polyethylene, polyformaldehyde. High molecular weight polyethylene is a material – Dyneema. Destruction is a process of damage accumulation that occurs in time and space. This process ends with the loss of bearing capacity due to the loss of continuity. Destruction is divided into localized and volumetric according to the nature of the activation of the process in space. Localized destruction is the development and propagation of one or more fiber breaks in synthetic fishing materials. An important task of the mechanics of synthetic fishing materials is the creation of fundamental foundations for describing the processes of their destruction during deformation during operation, that is, the development of the foundations of fracture mechanics (building models and algorithms for calculating structures and technological processes at large plastic deformations, taking into account destruction). In particular, the theory allows solving nonlinear problems that take into account changes in the geometry of deformable synthetic fishing materials; obtain analytical solutions to various problems.*

## АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ОСНАСТКИ ДОННОГО ТРАЛА С УЧЕТОМ КОМПЛЕКСНОГО ВЛИЯНИЯ АБИОТИЧЕСКИХ, БИОТИЧЕСКИХ И АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ

<sup>1</sup>Недоступ Александр Алексеевич, канд. техн. наук, доцент

<sup>2</sup>Ражев Алексей Олегович, канд. техн. наук

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет», Калининград, Россия, e-mail: <sup>1</sup>nedostup@klgtu.ru; <sup>2</sup>progacpp@live.ru

*В процессе эксплуатации донных тралов возникает серьезное воздействие на бентос, который обитает в районе промысла. В результате этого воздействия бентос во взвешенном состоянии образует обширные шлейфы из отложений и растворенных питательных веществ. Следовательно, могут быть последствия для окружающей среды, а также воздействие на эффективность и безаварийность донной траловой системы и промысловых операций с ней, что влияет на выбросы оксидов азота, оксидов серы и парниковых газов. При проектировании донных тралов первостепенная задача – составление списка эксплуатационных требований, которому донный трал должен будет удовлетворять. В общем случае список данных требований включает функциональные требования, т. е. перечень количественных показателей объекта лова, на который направлено действие донного трала, показателей особых условий промысла и ограничений, при которых выполняется лов, экологичности лова, затрат энергии, затрат на информацию, значение сил и т. п. Разработан алгоритм расчета характеристик оснастки донного трала с учетом комплексного влияния абиотических, биотических и антропогенных факторов.*

Для рационального и эффективного управления донным траловым промыслом необходимо иметь возможность количественно измерять влияние донных тралов на бентос водоема [1-18]. На сегодняшний день большинство исследований и методологий оценки воздействия донных тралов на бентос различаются по типу и оснастке тралов. Чтобы правильно проектировать и эксплуатировать донные траловые системы с уменьшенным воздействием на бентос, необходимо учитывать их влияние на уровне отдельных элементов траловой системы (траловых досок, грунтропа и кабелей) и на уровне отдельных компонентов и типов отложений на дне водоема (глубине хода траловых досок, грунтропа и кабелей). Донная траловая система включает в себя донный трал, траловые доски, грунтроп, оснастку, кабельную линию, ваера и датчики контроля.

Рассмотрим абиотические, биотические и антропогенные факторы воздействия на системы управления тралового комплекса. К абиотическим факторам относятся все влияющие на донную траловую систему параметры окружающей водно-воздушной среды и дна водоема: глубина места лова и связанное с ней давление воды; течение водных масс; сила ветра; волнение; температура воздуха и воды; наличие льда; соленость; прозрачность; характер и рельефа грунта. Авторами статьи разработано программное обеспечение, учитывающие вышеперечисленные характеристики окружающей среды (см. рис. 1). Абиотические факторы являются входными параметрами. Входные воздействия зависят от множества факторов окружающей водно-воздушной среды и дна водоема. Основы биомеханики гидробионтов - системный анализ и системный синтез движений на основе количественных и поведенческих характеристик гидробионтов. Рассматривается экспериментальная биомеханика гидробионтов. Суть системного анализа биомеханики гидробионтов состоит в исследовании траекторий перемещения, скорости, ускорения и др., а также реакции на раздражители. Движение и поведенческие характеристики гидробионтов объединены взаимосвязями. При этом необходимо учитывать, что поведение отдельных особей рыб отличается от поведения их в стае. Внутри стаи отдельные особи движутся согласованно. Исследования зарубежных и российских ученых [8-10] позволяют четко сформулировать математические зависимости биомеханики и поведенческих характеристик гидробионтов при облове их разноглубинными тралами [11].

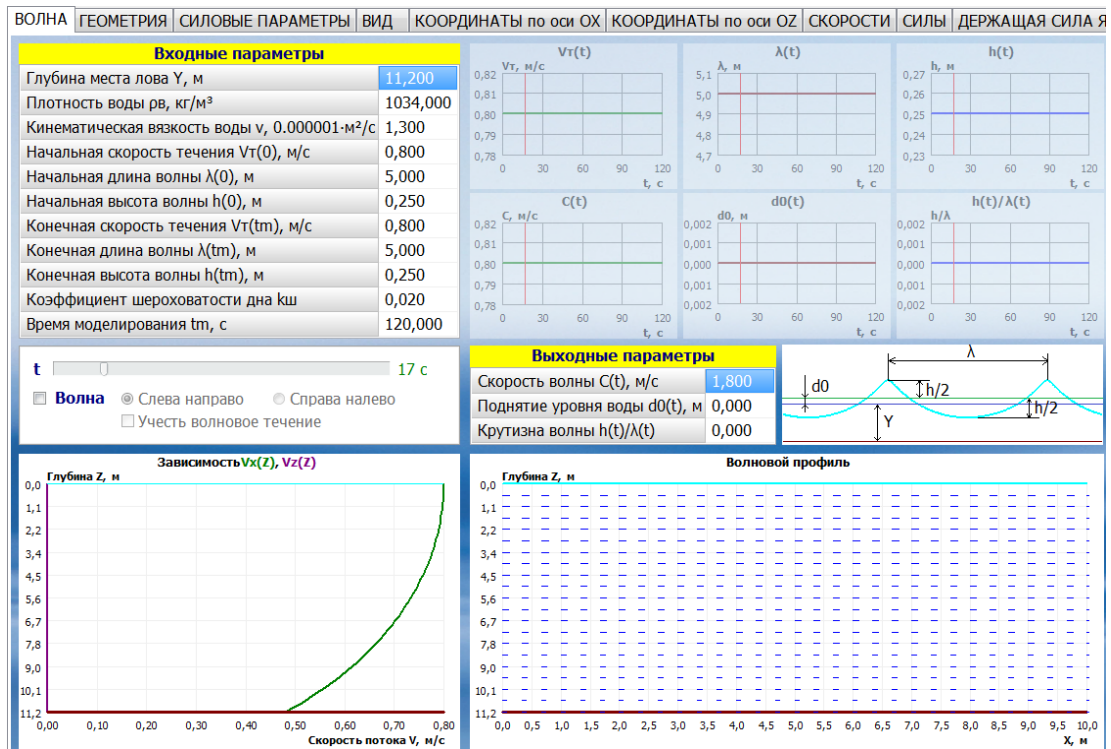


Рис. 1. Программное обеспечение для определения характеристик окружающей среды

На основании математических зависимостей авторами статьи разработаны имитационные модели биомеханики и поведенческих характеристик гидробионтов, а также программное обеспечение (см. рис. 2) [19-21]. Численный эксперимент биомеханики гидробионтов и их поведенческих характеристик с помощью программного обеспечения дает возможность оценить влияния биотических и антропогенных факторов на эффективность разноглубинного тралового промысла с учетом входных параметров гидробионтов и косяков (см. рис. 3).

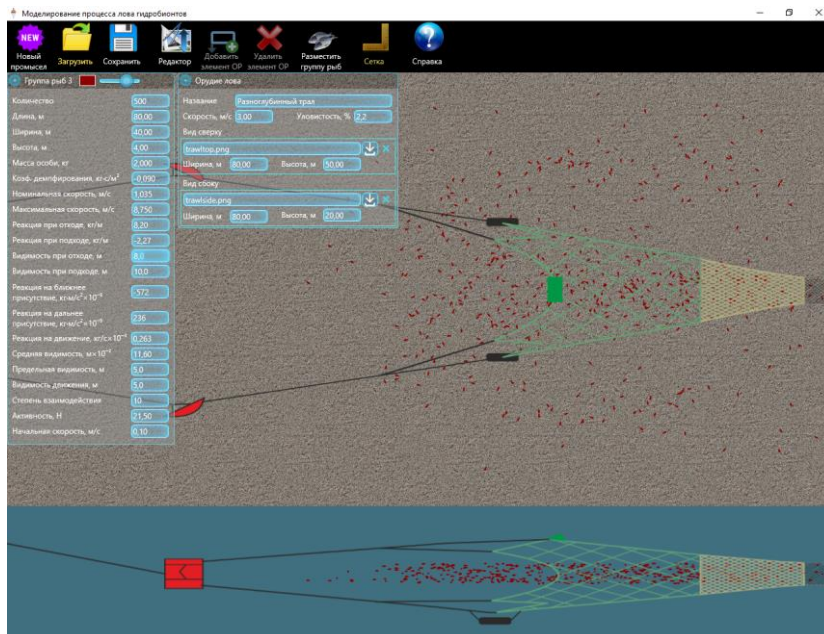


Рис. 2. Программное обеспечение по биомеханике гидробионтов и их поведенческих характеристик

На основании моделирования биомеханики гидробионтов и их поведенческих характеристик определены возможные конструктивные характеристики сетной части донных тралов, способствующих эффективному облову скоплений гидробионтов в виде косяков.

Группа рыб 1	
Количество	200
Длина, м	30,00
Ширина, м	10,00
Высота, м	5,00
Масса особи, кг	1,000
Козф. демпфирования, кг·с/м <sup>2</sup>	-0,090
Номинальная скорость, м/с	0,205
Максимальная скорость, м/с	8,750
Реакция при отходе, кг/м	4,20
Реакция при подходе, кг/м	-2,27
Видимость при отходе, м	1,0
Видимость при подходе, м	5,0
Реакция на ближнее присутствие, кг·м/с <sup>2</sup> × 10 <sup>-5</sup>	-572
Реакция на дальнее присутствие, кг·м/с <sup>2</sup> × 10 <sup>-5</sup>	156
Реакция на движение, кг/с × 10 <sup>-3</sup>	0,263
Средняя видимость, м × 10 <sup>-2</sup>	11,60
Предельная видимость, м	5,0
Видимость движения, м	5,0
Степень взаимодействия	5
Активность, Н	0,50
Начальная скорость, м/с	0,10

Рис. 3. Входные параметры гидробионтов и косяков

К биотическим факторам относятся все возможные влияния, которые испытывают гидробионты со стороны окружающих гидробионтов. Другими словами, влияние популяций рыб или других организмов на промысловый запас. Ограничения могут быть наложена на донный разовый промысел присутствием в районе морского зверя и птиц, присутствие в больших количествах молоди ценных пород рыб в распределенных стаях на дне водоема, а также наличие и распределение кормовых объектов. К данным факторам отнесем поведение рыб - комплекс условий, требующих от нее определенного действия, чтобы выжить и сохранить потомство: скорость движения (бросковая, плавание); плотность скопления; распределение; реакция на раздражители; дальность видимости; миграции.

В рамках исследования разработан алгоритм расчета характеристик оснастки донного трала с учетом комплексного влияния абиотических, биотических и антропогенных факторов, на основании которого возможно определять [22,23]:

- влияние характеристик окружающей обстановки (ХОО) на эксплуатационные качества промысловой единицы (используется модуль программного обеспечения);
- влияние поведенческих характеристик гидробионтов (ПХГ) на эксплуатационные качества промысловой единицы (используется программное обеспечение по биомеханике гидробионтов и их поведенческих характеристик);
- глубину, на которую элементы траловой системы (траловые доски, грунтотроп и кабели) проникают в морское дно.

Рассмотрим задачу расчета грунтодинамических характеристик деталей оснастки донного трала на основании заданных параметров при возможной статической и динамической нагрузке с учетом движения их по грунту водоема. Запишем уравнения, характеризующие физико-механические свойства грунта, связывающие его физико-механические характеристики при условии несжимаемости грунта  $V=const$ .

$$\left. \begin{aligned} ke &= \alpha \\ e &= \alpha^2 \\ \chi &= \mu\alpha \\ ek^2 &= 1 \\ \alpha k &= 1 \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где  $k$  - коэффициент пропорциональности,  $k=f(\varepsilon,\lambda)$ ,  $\varepsilon$  - относительная продольная деформация,  $\lambda$  - конструктивное удлинение (конструктивный параметр);  $e$  - отношение модулей упругости;  $\alpha$  - безразмерное сужение,  $\alpha=f(\varepsilon,\lambda)$ ;  $\chi$  - безразмерная компенсационная сила;  $\mu$  - коэффициент Пуассона.

Запишем основные выражения, входящие в (1)

$$e = \frac{H_y}{H_x} = \frac{E_y}{E_x}, \quad (2)$$

где  $H_x$  - производительность продольных сил;  $H_y$  - производительность условных поперечных сил;  $E_x$  - продольный модуль упругости;  $E_y$  - поперечный модуль упругости,

$$\lambda = \frac{L}{d}, \quad (3)$$

где  $d$  - диаметр;  $L$  - длина,

$$\chi = \frac{T_y^d}{T_x^l}, \quad (4)$$

где  $T_x^l$  - компенсационная сила (противодействия  $T_x$ ) в продольном направлении (вдоль оси OX);  $T_y^d$  - компенсационная сила (противодействия  $T_y$ ) в поперечном направлении (вдоль оси OY),

$$T_x^l = \varepsilon T_x, \quad (5)$$

$$T_y^d = \varepsilon_d T_y, \quad (6)$$

где  $T_x$  - приложенная сила растяжения (вдоль оси OX);  $T_y$  - сила сжатия (вдоль оси OY);  $\varepsilon_d$  - относительная поперечная деформация,

$$\alpha = \frac{T_y}{T_x}. \quad (7)$$

В систему (1) добавим выражение, связывающее конструктивное удлинение, коэффициент Пуассона и  $\alpha$ , и преобразуем (1) к виду

$$\left. \begin{aligned} ke &= \alpha \\ e &= \alpha^2 \\ \mu &= \alpha\lambda \\ \chi &= \mu\alpha \\ ek^2 &= 1 \\ \alpha k &= 1 \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

при условии, что коэффициент Пуассона  $\mu$  для грунта водоема по осям Oy и Ox равен

$$\left. \begin{aligned} \mu_y &= \left( 1 - \sqrt{\frac{1}{1 + \varepsilon_y}} \right) \frac{1}{\varepsilon_y} \\ \mu_x &= \left( 1 - \sqrt{\frac{1}{1 + \varepsilon_x}} \right) \frac{1}{\varepsilon_x} \end{aligned} \right\}. \quad (9)$$

где  $\mu_y$  - коэффициент Пуассона по оси Oy;  $\mu_x$  - коэффициент Пуассона по оси Ox.

На рис. 4 представлена схематизация движения донной траловой доски по грунту.

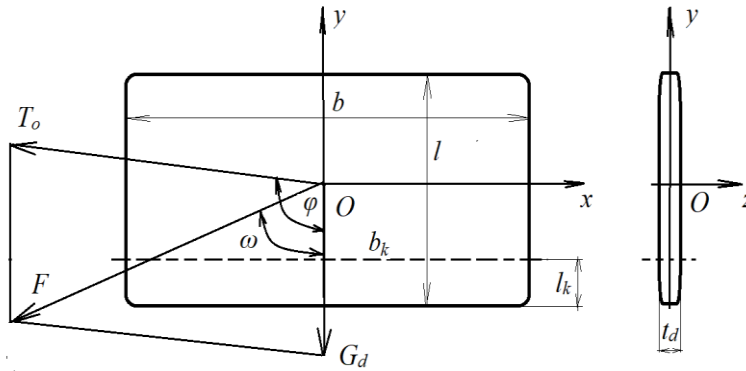


Рис. 4. Схематизация движения донной траловой доски по грунту

На рис. 4 введено следующие обозначения для траловой доски:  $b$  - хорда траловой доски;  $l$  - размах траловой доски;  $t_d$  - толщина щита траловой доски;  $l_k$  - осадка грунта (зарезание траловой доски в грунт);  $b_k$  - хорда осадки грунта (зарезание траловой доски в грунт);  $T_o$  - натяжение в нижней точке ваера;  $G_d$  - вес в воде траловой доски;  $F$  - результирующая сил;  $\varphi$  - угол между векторами сил  $T_o$  и  $G_d$  в плоскости  $yOx$ ;  $\omega$  - угол между векторами сил  $F$  и  $G_d$  в плоскости  $yOx$ .

Движение по грунту кабеля, троса, бобинца, катушки, траловой доски или другого элемента траловой системы сопряжено с влиянием характеристик грунта водоема (связность грунта, плотность грунта и др.). Здесь немаловажной величиной, которая влияет на процесс траления, является скорость буксировки донной траловой системы  $v$ .

Рассмотрим процесс движения и врезания в бентос кабеля и участка мягкого грунтотропа в виде кабеля. Процесс можно рассмотреть при условии угла атаки кабеля  $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ , значения отношения  $25,0 \leq q_k/d_k \leq 300,0 \text{ Н/м}^2$ , где  $d_k$  - диаметр кабеля. Значение грунтодинамического коэффициента трения кабеля  $f_k$  при  $q_k/d_k = 300 \text{ Н/м}^2$  и  $\alpha = 90^\circ$  достигает значения  $f_k = 6 - 8$ , это свидетельствует, что при большом давлении на грунт и значении угла атаки кабеля (участка кабеля)  $\alpha = 90^\circ$ , кабель погружается в грунт и буксируется в грунте, а не на его поверхности. Значение грунтодинамического коэффициента трения кабеля при  $f_k \leq 1$  свидетельствует о не врезании его в бентос, происходит только скольжение по грунту.

Отношение  $q_k/d_k$  можно представить в виде

$$\frac{q_k}{d_k} = \sigma_y. \quad (10)$$

В соответствии с результатами математического моделирования процесса движения и врезания кабеля в бентос предложено использовать кабель разного отношения по длине  $q_k/d_k$  с учетом угла его атаки  $\alpha$  в процессе донного траления. Важно отметить, что при расчете целесообразно представлять кабель как цепную линию, форма которой определяется аналогично нижней подборе донного трала [20]. Скорость траления донного трала  $v$  влияет на грунтодинамическое сопротивление кабеля. Значение грунтодинамического коэффициента уменьшается с увеличением скорости траления  $v$ , тем самым уменьшая явление врезания кабеля в грунт. Однако, нужно учитывать параметры кабеля  $q_k/d_k$  и  $\alpha$  в комплексе. Для уменьшения врезания урезов донного невода целесообразно уменьшать длину провисающей части, тем самым сокращая теряемую для облова площадь морского дна. Длина провисающей части тем меньше, чем тяжелее урез. Но тяжёлые канаты сильнее зарезаются в грунт, увеличивая натяжение урезом при выборке. Чтобы избежать этого, урезы на практике комплектуют из нескольких отрезков канатов разного веса, причём канаты у сетного мешка должны иметь наименьший вес, а по мере приближения к судну вес канатов увеличивают. В этом случае провисающая часть уреза донного невода может состоять из канатов, имеющих разный вес в воде. Аналогично комплектуем центральную часть нижней подборки, выполняя условия давления кабеля на грунт  $q_k/d_k \rightarrow \min$ , средней часть половины грунтотропа  $q_k/d_k \rightarrow \text{medium}$ , в местах соединения голых концов (по мере приближения к концам нижней подборки)  $q_k/d_k \rightarrow \max$  с учетом величины  $q_k/d_k$  голых концов. Таким образом, минимальное воздействие кабелей на бентос будет при условии минимального давления на грунт. При этом заглубляющее влияние кабелей остается.

На рис. 5 приводится схема составного грунтотропа в виде кабеля (стальной трос, трос «Геркулес» и др.).



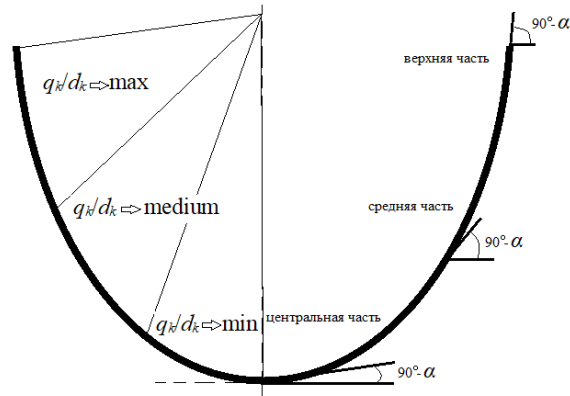


Рис. 5. Схема составного грунтропа в виде кабеля

Движение по грунту траловых бобинцев исследовано Г.Е. Биденко [1]. Из полученных им результатов следует, что практически все бобинцы грунтропа донного трала не перекатываются по грунту, а скользят по его поверхности. Такой характер движения объясняется тем, что при отклонении оси бобинца от нормали к направлению движения всего лишь на  $2^\circ \div 3^\circ$ , его вращение прекращается. Кроме того, в процессе движения возникают значительные силы трения во втулках бобинцев и между бобинцами, которые также препятствуют их вращению. По аналогии с движением кабеля представим движение бобинцев при условии  $25,0 \leq G_z/D_z \leq 300,0 \text{ Н/м}^2$ , где  $G_z$  - вес в воде бобинца;  $D_z$  - диаметр бобинца. Сдавливание грунта бобинцем происходит при значительных значениях давления  $G_z/D_z \leq 300,0 \text{ Н/м}^2$ .

Отношение  $G_z/D_z$  можно представить в виде

$$\frac{G_z}{D_z} = \sigma_y. \quad (11)$$

Тогда, воспользовавшись законом Гука,

$$\sigma = \varepsilon E, \quad (12)$$

с учетом выражений (1) - (12) составим алгоритм расчета выходных характеристик ХОО, ПХГ и ХГ оснастки донного трала на основании их входных характеристик с учетом комплексного влияния абиотических, биотических и антропогенных факторов (см. рис. 6).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования проанализированы теоретические и опытные данные российских и зарубежных ученых по влиянию зарезания в грунт траловых досок и грунтропа донных тралов. Получены:

- модели процессов эксплуатации донного тралового комплекса с учетом комплексного влияния абиотических, биотических и антропогенных факторов, и воздействия человеческого фактора на системы управления тралового комплекса;
- теоретические выкладки, связывающие физико-механические свойства грунта с характеристиками элементов траловой системы (траловые доски, грунтроп и кабели) в процессе движения траловой системы;
- зависимость глубины, на которую элементы траловой системы (траловые доски, грунтроп и кабели) проникают в морское дно;
- прогностические модели физического воздействия элементов траловой системы (траловых досок, грунтропа и кабелей);
- влияние скорости траления донного трала  $v$  на механические свойства грунтов и грунтодинамическое сопротивление элементов траловой системы (траловых досок, грунтропа и кабелей);
- влияние механических свойств грунтов водоема на грунтодинамическое сопротивление элементов траловой системы (траловых досок, грунтропа и кабелей);
- алгоритм расчета характеристик выходных данных ХОО, ПХГ и ХГ оснастки донного трала с учетом комплексного влияния абиотических, биотических и антропогенных факторов (см. рис. 6) и на основании входных данных ХОО, ПХГ и ХГ.

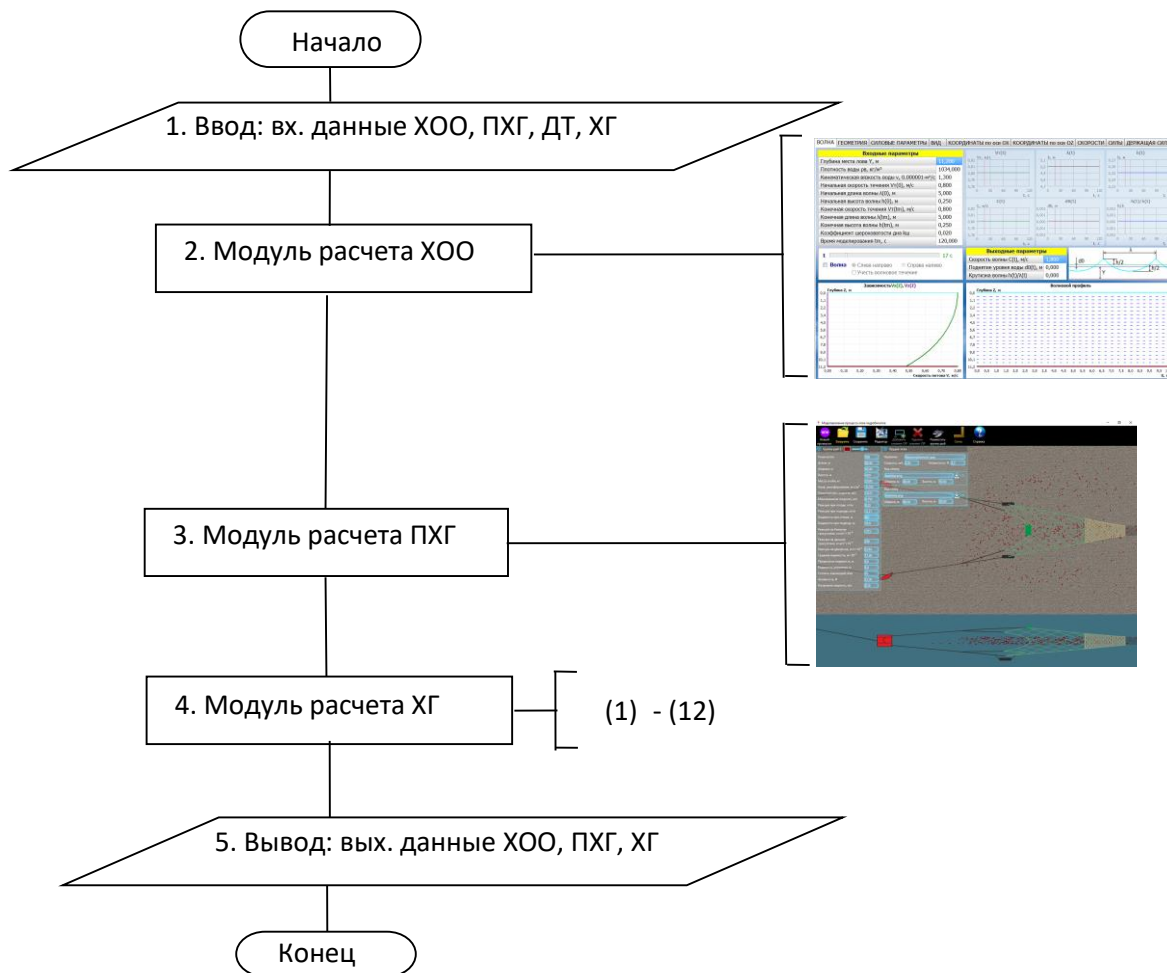


Рис. 6. Алгоритм расчета характеристик оснастки донного трала с учетом комплексного влияния абиотических, биотических и антропогенных факторов

В ходе исследований выявлено:

- грунтодинамическое сопротивление траловых досок и деталей грунтотрапа увеличивается по мере увеличения ее веса;
- угол атаки, крена и дифферента траловой доски влияет на грунтодинамическое сопротивление, так как коэффициент, учитывающий энергию на отбрасывание пласта грунта, зависит от формы отвала и свойств грунта;
- грунтодинамическое сопротивление неподвижных деталей грунтотрапа больше сопротивления качения;
- неподвижные детали оснастки донных траловых систем могут проникать в морское дно на меньшую глубину при буксировке на более высоких скоростях; когда они катятся, такой зависимости нет.

На основании математических зависимостей (1) и (12) возможно минимизировать влияние антропогенного фактора на бентос водоема.

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. Биденко Г.Е. Механика грунтов. Сб. трудов АтлантНИРО. Вып. L. 1971. С. 33-54.
2. Биденко Г.Е. Испытания моделей досок в грунтовом канале. Сб. трудов АтлантНИРО. Вып. L. 1971. С. 55-67.



3. Биденко Г.Е. Методика определения формы и площади устья сетной части трала. Сб. трудов АтлантНИРО. Вып. L. 1971. С. 137-149.
4. Веденеев В.Л. Исследование влияния грунта на работу траловых распорных устройств: Дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Калининград: КТИРПХ, 1974. 110 с.
5. Веденеев В.Л. Методика учета влияния грунта на работу траловых досок. Промышленное рыболовство: Экспресс-информация НИИТЭИРХ. вып. 5. - М. 1975.
6. Пиоро Е.В., Ошкин А.Н. Взаимосвязи акустических характеристик и показателей физических и деформационных свойств глинистых грунтов. Вестник МГУ. Серия 4. Геология. №6. 2011. С.71-74.
7. Середин В.В., Сысолятин С.Г., Вагин А.Л., Хрулев А.С. Влияние напряженного состояния грунтов на модуль деформации. Инженерная геология. № 2. 2015. С. 12-16.
8. Fryer R. J., Summerbell, K., O'Neill F. G. A meta-analysis of vertical stratification in demersal trawl gears. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 74(8). 2017. pp. 1243-1250.
9. O'Neill F. G., Summerbell K., & Ivanović A. The contact drag of towed demersal fishing gear components. *Journal of Marine Systems*. 177. 2018. pp. 39-52.
10. Rijnsdorp A.D., Depestele J., Eigaard O.R., Hintzen N.T., Ivanovic A., Molenaar P., O'Neill F., Polet H., Poos J.J., & van Kooten T. Mitigating seafloor disturbance of bottom trawl fisheries for North Sea sole *Solea solea* by replacing mechanical with electrical stimulation. *PLoS One*. 15(11). 2020.
11. Rijnsdorp A. D., Depestele J., Molenaar P., Eigaard O. R., Ivanović A., & O'Neill, F. G. Sediment mobilization by bottom trawls: a model approach applied to the Dutch North Sea beam trawl fishery. *ICES Journal of Marine Science*. 2021. 78(5). pp. 1574-1586.
12. Takagi, T., Moritomi, Y., Iwata, J., Nakamine, H., and Sannomiya, N. Mathematical model of fish schooling behaviour in a set-net. - *ICES Journal of Marine Science*, 2004 - 61: 1214-1223.
13. Nakamine, H., and Sannomiya, N. Effect of autonomous decentralization mechanism in fish behaviour. *Transactions of Institute of Systems, Control and Information Engineers*, 1995 - 8: 350-356.
14. Gun-Ho LEE, Chun Woo LEE, Young-Bong KIM, Pingguo He. Simulating the behavior of Atlantic mackerel and their capture by pelagic trawls / 8th International workshop - Methods for the Development and Evaluation of Maritime Technologies DEMAT 2007. V.5. 2007. Germany. Rostock. pp. 285-295.
15. Breimann S. A., O'Neill F. G., Summerbell K., & Mayor D. J. Quantifying the resuspension of nutrients and sediment by demersal trawling. *Continental Shelf Research*. 2022. 233 p.
16. Fiorentini L., Dremiere P.Y., Leonori I., Sala A., Palumbo V. Efficiency of the bottom trawl used for the Mediterranean international trawl survey (MEDITS)// *Aquat. Living Resour.* 1999. № 12(3). pp. 187-205.
17. Shigeru F., Hiroyuki K., Masayasu H., Takehiko I., Munechika I. The shape of groundrope obtained field experiments. *Nippon Suisan Gakkaishi*. №58(9). 1992. p. 1633-1640.
18. Grewe P.R. Einige der allgemeine technischen Grundsätze, welche die Konstruktion einer Schleppausrüstung betreffen. *FAO - Fanggeratekongress*. 1963. 65 p.
19. Коротков В.К. Трал, поведение объекта лова и подводные наблюдения за ними. - М: Пищевая промышленность. 1972. 271 с.
20. Коротков В.К. Реакция рыб на трал, технология их лова. - Калининград: СЭЖБ АО «МАРИНПО». 1998. 397 с.
21. Недоступ А.А., Альтшуль Б.А., Ражев А.О., Дятченко С.В., Бедарева О.М., Багрова А.А. Математическое моделирование поведенческих характеристик стаи рыб при облове разноглубинным тралом. *Морские интеллектуальные технологии*. №4(46) Т.4. 2019. - С. 181-185.
22. Мизюркин М.А. Влияние угла атаки траловых досок на сопротивление и геометрические параметры донной траловой системы. *Известия Калининградского государственного технического университета*. №24. 2012. С.158-165.
23. Недоступ А.А., Ражев А.О. Критерий, характеризующий степень воздействия траловой доски на бентос водоема. Сборник статей по материалам XLIX международной научно-практической конференции «Вопросы технических и физико-математических наук в свете современных исследований». - Сибирская академия книги. Новосибирск. 2022. С. 26-30.

# ALGORITHM FOR CALCULATION OF CHARACTERISTICS OF BOTTOM TRAWL, TAKING INTO ACCOUNT THE COMPLEX EFFECT OF ABIOTIC, BIOTIC AND ANTHROPOGENIC FACTORS

<sup>1</sup>Nedostup Aleksandr Alekseevich, associate professor, PhD in Technical Sciences

<sup>2</sup>Razhev Aleksey Olegovich, research scholar, PhD in Technical Sciences

<sup>1,2</sup>Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,

e-mail: <sup>1</sup>nedostup@klgtu.ru; <sup>2</sup>progacpp@live.ru

*During the operation of bottom trawls, there is a serious impact on the benthos that lives in the fishing area. As a result of this impact, benthos in suspension forms extensive plumes of sediment and dissolved nutrients. Consequently, there may be environmental impacts as well as impacts on the efficiency and safety of the bottom trawl system and its fishing operations, which affect emissions of nitrogen oxides, sulfur oxides and greenhouse gases. When designing bottom trawls, the primary task is to compile a list of operational requirements that the bottom trawl will have to satisfy. In the general case, the list of these requirements includes functional requirements, i.e. a list of quantitative indicators of the object of fishing, which the action of the bottom trawl is directed to, indicators of special fishing conditions and restrictions under which fishing is carried out, environmental friendliness of fishing, energy costs, costs for fishing - formation, value of forces, etc. An algorithm for calculating the characteristics of bottom trawl equipment has been developed, taking into account the complex influence of abiotic, biotic and anthropogenic factors.*

УДК 639.2.081.1; 624.131.4

## МОНИТОРИНГ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ ТРАЛОВОЙ КОНСТРУКЦИЕЙ И ОБЪЕКТА ЛОВА С ПРИМЕНЕНИЕМ ГИДРОЛОКАТОРА

<sup>1</sup>Ражев Алексей Олегович, канд. техн. наук, в. научн. сотр.

<sup>2</sup>Недоступ Александр Алексеевич, канд. техн. наук, доцент

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,

Калининград, Россия, e-mail: <sup>1</sup>progacpp@live.ru; <sup>2</sup>nedostup@klgtu.ru

*Рассмотрен метод мониторинга процесса управления траловой конструкцией во время лова и объекта лова с применением гидролокации на примере двухчастотного идентификационного гидролокатора DIDSON. Рассмотрены характеристики DIDSON, алгоритм автоматизированного отслеживания данных, поступающих с гидролокатора. Алгоритм включает в себя отделение подвижных от малоподвижных объектов, фильтрацию, пороговый детектор, маркировку связанных компонентов, обнаружение объекта, отслеживание нескольких объектов и извлечение информации о их поведении такой, как траектории, скорость и направление движения. Для отслеживания объектов применяется алгоритм многоцелевого отслеживания (МТТ), связывающий отдельные объекты с их маршрутами и оценивающий их положение и скорость, основываясь на данных о текущем наблюдении и накопленных исторических данных по уже пройденным маршрутам. Обозначены недостатки алгоритма и наилучшие условия для автоматического мониторинга – однородные объекты отслеживания с умеренной плотностью размещения. Автоматическое отслеживание представляет собой полезный метод обработки данных и ценную альтернативу трудоемкой ручной обработки данных при использовании в соответствующих условиях. Применим для задач качественной и количественной оценки движения трала и рыбы в процессе траления, контроля*

эффективности работы траловой системы в целом, а также исследований поведенческих характеристик гидробионтов.

В процессе работы трал испытывает сложные комбинированные нагружения и большие деформации, на которые влияет в том числе и объект лова [1-3]. Непосредственное наблюдение за траловой системой, качественная и количественная оценка поведения рыбы в условиях траления являются сложной задачей. Мониторинг большого объема тралового пространства с достаточно высоким разрешением для выделения отдельных деталей траловой системы и гидробионтов требует технологически сложных оптических и акустических приборов [4].

Рассмотрим метод мониторинга процесса управления траловой конструкции на примере отслеживания отдельных гидробионтов внутри трала с использованием двухчастотного идентификационного многолучевого гидролокатора DIDSON [5]. В данном гидролокаторе для формирования отдельных лучей применяется акустическая линза. Благодаря своей высокой рабочей частоте (1,1–1,8 МГц) DIDSON обеспечивает более высокое разрешение и дальность, чем традиционные гидролокаторы. В условиях мутности и низкой освещенности данный гидролокатор намного превышает возможности стандартных оптических устройств, эффективно сокращая разрыв между акустическими и оптическими методами мониторинга. Кроме того, отсутствие необходимости в искусственном освещении снижает вероятность необъективных наблюдений.

DIDSON работает на двух частотах, обеспечивая выбор между высоким (1,8 МГц) и низким (1,1 МГц) разрешением. В режиме высокого разрешения сканирующая матрица состоит из 96 лучей с эквивалентным углом луча  $0,3^\circ$  на  $12^\circ$ . Массив лучей собран в сектор, образуя поле обзора  $29^\circ$  на  $12^\circ$ . Выходные данные представлены в полярной системе координат, местоположение каждой ячейки данных определяется ее идентификатором луча или его отклонением от угла относительно центральной оси преобразователя и дальности вдоль этого луча. Разрешение кадра составляет 96 на 256. Выходные данные структурированы в виде матрицы, каждая ячейка которой имеет размер 1 байт и характеризует амплитуду принимаемого сигнала в диапазоне от 0 до 90 дБ с шагом 0,35 дБ.

Так, как выходные данные гидролокатора структурируются в кадры, аналогичные кадрам в видеоданных, для их анализа можно использовать стандартные методы обработки изображений такие, как медианная фильтрация, пороговый детектор, выделение и слежение за целью, и оценка ее положения. Указанные методы требуют подбора параметров, которые влияют на итоговую точность и производительность алгоритма.

При анализе динамических процессов, для удаления статических данных, для каждого пикселя кадра можно применять вычитание усредненного по соседним кадрам значения интенсивности соответствующих пикселей. Количество кадров (длина окна), по которым вычисляется среднее значение, устанавливается исходя из требований на уменьшение влияния статических и относительно медленно движущихся элементов. Например, для задач мониторинга движения косяка рыбы относительно трала при тралении, необходимо выделить траекторию движения рыб, чтобы процесс отслеживания не включал изображение трала.

Для уменьшения высокочастотного шума в кадре (см. рис. 1 и 2) можно применять фильтр низких частот.

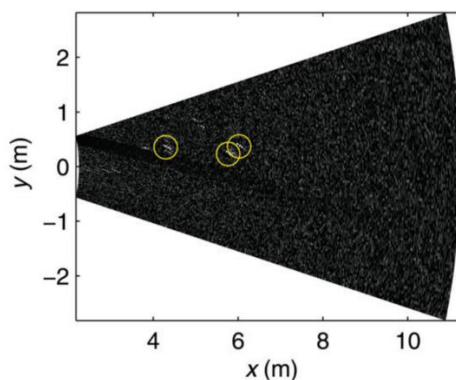


Рис. 1. Изображение необработанных данных с обнаруженными объектами

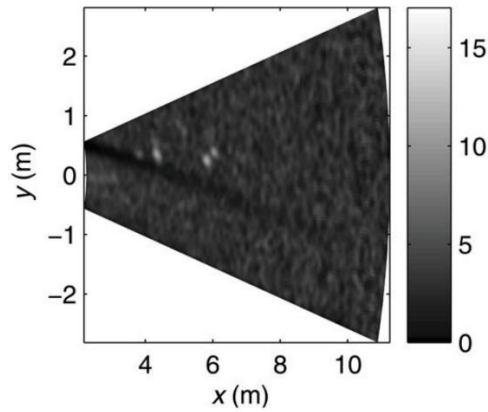


Рис. 2. Изображение после низкочастотной фильтрации

Пространственный размер пикселей изображения увеличивается с увеличением дальности из-за распространения луча. Поэтому объект постоянного размера занимает уменьшающееся количество пикселей по мере удаления от поверхности датчика гидролокатора. Кроме того, из-за перемещения объекта относительно гидролокатора, объекты часто кажутся фрагментированными на коротких дистанциях. Обе эти проблемы требуют использования метода фильтрации, зависящего от диапазона.

Предлагается использовать стандартные методы фильтрации изображений со сверткой и динамическим сопоставлением размера ядра фильтра с истинным пространственным размером таким образом, чтобы ядро фильтра охватывало большее количество лучей, расположенных ближе к преобразователю гидролокатора.

После фильтрации данные поступают на пороговый детектор. При установке порогового значения для набора кадров следует учитывать плотность распределения объектов (см. рис. 3).

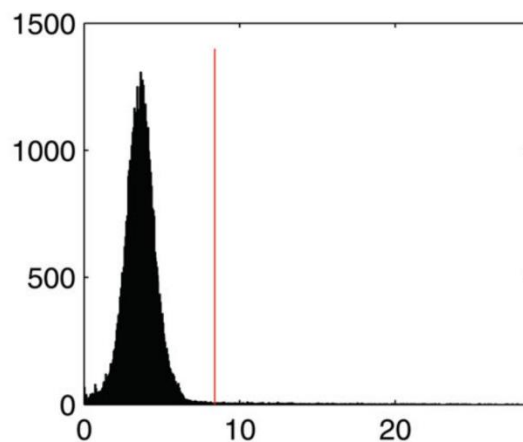


Рис. 3. Гистограмма распределения интенсивности пикселей кадра

На рис. 3 вертикальной линией показано пороговое значение интенсивности пикселей кадра. По горизонтальной оси отложена интенсивность пикселей, а по вертикальной – их количество в кадре.

Для изоляции смежных областей пикселей, представляющих отдельные объекты (см. рис. 4) предлагается применять алгоритм маркировки связанных компонентов [6]. При этом, область считать допустимым объектом только в случае, если количество занятых областью пикселей находится в допустимом диапазоне значений. Таким образом будет выполняться отделение с последующим удалением из дальнейшего анализа очень больших областей, вероятно, состоящих из нескольких перекрывающихся объектов, и очень маленьких, которые, вероятно, не были допустимыми объектами.

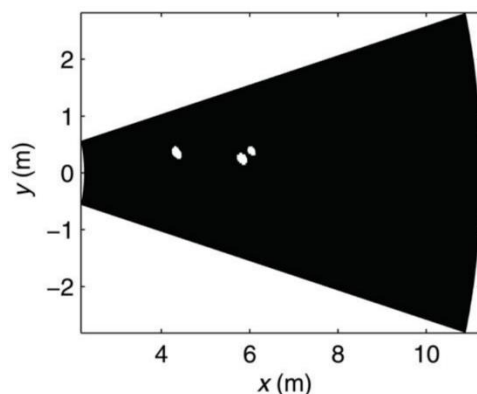


Рис. 4. Изображение после порогового детектора

Чтобы назначить взвешенную по интенсивности одиночную позицию группе смежных пикселей, предлагается ориентироваться средним пространственным значением интенсивности пикселей в пределах смежной области. Положение обнаруженного объекта определяется зависимостью

$$\begin{bmatrix} \theta \\ r \end{bmatrix} = \frac{\sum_i \begin{bmatrix} \theta_i \\ r_i \end{bmatrix} I_i^p}{\sum_i I_i^p} \quad (1)$$

где  $\theta_i$  и  $r_i$  - значения угла и диапазона, определяющие местоположение пикселя  $i$  в найденной области;  $I_i$  - интенсивность пикселя  $i$ ;  $p$  - параметр мощности.

Параметр мощности определяет, как следует учитывать интенсивность пикселей при их оценке. При  $p = 0$ , в качестве оценки принимается среднее пространственное положение связанных пикселей без учета соответствующей интенсивности. При  $p = 1$  позиции пикселей линейно взвешиваются по интенсивности пикселей. При  $p > 1$  относительно больший вес придается наиболее интенсивному пикселю.

Алгоритмы многоцелевого отслеживания (МТТ-алгоритм) являются стандартными инструментами машинного зрения [7]. Цель МТТ-алгоритма состоит в том, чтобы связать отдельные объекты с их маршрутами и оценить их положение и скорость, основываясь на данных о текущем наблюдении и накопленных исторических данных по уже пройденным маршрутам.

Для преобразования из полярной системы координат, привязанной к движущемуся гидролокатору, в стационарную декартовую систему координат на протяжении всей процедуры отслеживания необходимо передавать данные о местоположении и ориентации гидролокатора.

На этапе стробирования МТТ-алгоритм выбирает объекты, которые рассматриваются для связи с существующими траекториями движения. Входными данными являются обнаруженные объекты и прогнозы по существующим траекториям. Прогнозы основаны на предположении о постоянной скорости между временными шагами. Оцененное положение и скорость с предыдущего временного шага используются для прогнозирования положения для текущего шага. Положение объекта преобразуется в полярные координаты и расстояние между наблюдением и прогнозом. Расстояние является мерой, которая учитывает как погрешность наблюдения, так и поведение рыбы. Стробирование просто помечает нереалистичные пары.

Следующий этап связывает наблюдения с предсказаниями в областях захвата для существующих траекторий (см. рис. 5). Если несколько объектов попадают в область захвата одной траектории, для привязки выбирается ближайший к траектории объект. Если один объект попадает в области захвата нескольких траекторий, для привязки объекта к наиболее подходящей траектории используется метод ближайшего соседа [7] и алгоритм аукциона Берцекаса [8].

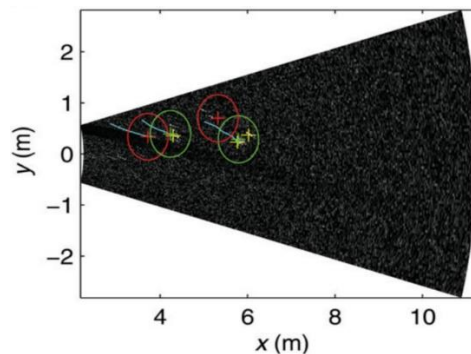


Рис. 5. Связывание наблюдений с предсказанием

После того, как наблюдения и прогнозы связаны, они используются для вычисления местоположения и скорости объекта. Вычисление производится с применением альфа-бета фильтра с фиксированным коэффициентом усиления [7]. Параметры  $\alpha$  и  $\beta$  являются константами, которые определяют, какой вес следует поместить в прогнозируемую на основе истории отслеживания (либо иными способами, например, по математической модели) позицию объекта. Параметр  $\alpha$  воздействует на прогнозируемое и наблюдаемое положения на текущем временном шаге, а параметр  $\beta$  взвешивает прогноз скорости для оценки положения цели на следующем временном шаге, формально определяемом как

$$\begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \end{bmatrix} + \alpha \left( \begin{bmatrix} x_y \\ y_y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \end{bmatrix} \right) \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{\dot{x}} \\ \hat{\dot{y}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{\dot{x}} \\ \tilde{\dot{y}} \end{bmatrix} + \frac{\beta}{T} \left( \begin{bmatrix} x_y \\ y_y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \end{bmatrix} \right) \quad (3)$$

где  $x_y$  и  $y_y$  - наблюдения, отображенные в декартовых координатах (символы « $\hat{\cdot}$ » и « $\tilde{\cdot}$ » обозначают оценку и прогноз, соответственно; точка над переменными – первая производная по времени);  $x$  и  $y$  - положение в декартовом пространстве.

Объекты, которые не были отнесены ни к одной из незавершенных траекторий, используются для инициирования новых траекторий с предположением о начальной скорости (например, поток воды внутри трала относительно гидролокатора). Не связанные с объектами в течение заданного времени траектории считаются завершенными. Все незавершенные траектории имеют оценку положения и скорости. Предполагая постоянную скорость, положение объекта может быть предсказано для следующего кадра данных. Это предсказание является отправной точкой МТТ-алгоритма для следующего временного шага.

Альфа-бета фильтр используется только для сопоставления данных. После того, как объекты объединены в траектории, можно использовать несколько методов для извлечения информации, описывающей поведение отдельных объектов или группы объектов. Истинное движение объекта может быть оценено путем применения линейной регрессии, сглаживающего сплайна или другой стандартной модели к данным траектории, уменьшая влияние ошибок наблюдения на оценки скорости. Оценки сплайнов хорошо работают для акустических данных с разделенным лучом [9]. Здесь положения и скорости объектов оцениваются путем подгонки сглаживающего сплайна к соответствующим оценкам положения объекта. Скорости раскладываются на компоненты скорости и направления путем преобразования декартовых векторов скорости в полярные координаты, что служит основой для оценки средней скорости и направления движения по траектории. Среднее направление вычисляется с использованием методов круговой статистики [10].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В исследовании представлен метод автоматизированного подхода к мониторингу и последующему анализу движения гидробионтов и элементов трала в процессе управления траловой конструкцией. Как и при любом подобном анализе, автоматическое отслеживание требует базового по-



нимания лежащих в основе процессов, что, в свою очередь, обеспечивает разумный уровень уверенности в результатах. Например, при изучении поведения рыбы в тралах может быть полезно измерить ближайшее приближение рыбы к какому-либо объекту, например, к траловой доске. Это может быть достигнуто с использованием данных маршрута рыбы в сочетании с оценкой положения траловой доски. Предпочтительные положения различных видов гидробионтов в рыболовных тралах, а также время их пребывания в определенных участках трала полезны при проектировании траловых конструкций с целью управления их селективностью [11, 12]. Метод отслеживания может обеспечить средства для измерения взаимодействия между рыбой и поверхностью трала, позволяя объективно классифицировать определенные способы лова.

Производительность алгоритма отслеживания во многом зависит от выбора его входных параметров. Определение оптимальных параметров для определенной среды обработки данных требует итеративного подхода, при котором производительность отслеживания оценивается визуально с использованием подмножества данных для оптимизации входных параметров.

Недостатком предложенного метода является увеличение погрешности отслеживания при мониторинге высокой плотности скопления крупной рыбы с близкого расстояния, что может привести к фрагментации объекта наблюдения на несколько «ложных» объектов. Аналогичным образом, небольшие объекты, такие как молодь рыбы, трудно выделить из фонового шума, в результате чего данные объекты могут быть не распознаны. Акустически менее видимые объекты имеют меньшую вероятность быть обнаруженными, что может привести к общему смещению размера в результатах отслеживания. Этот эффект также имеет значение для различных уровней фонового шума, внося искажения при низком отношении сигнал/шум.

Важнейшей частью процесса отслеживания является оценка траектории движения объекта по соответствующим его позициям во времени. Чтобы описать движение рыбы на основе данных о местоположении, нам нужно подобрать соответствующую модель. Сложность выбора модели зависит от диапазона предполагаемых движений. Надежные и простые модели, такие как линейная регрессия, часто хорошо работают там, где объект наблюдения резко не меняет своего направления движения. Например, элементы траловой конструкции при тралении. При исследовании резких изменений или прерывистости в движении объекта, например реакции рыбы на какое-либо препятствие на пути движения, сплайновая модель может быть менее полезной, поскольку она предполагает аналогичное сглаживание по всей траектории движения. В таких случаях сегментированная регрессия может оказаться более подходящей.

Применительно к рыбе, ее траекторию движения можно предсказать с использованием математической модели биомеханики гидробионтов и их поведенческих характеристик с учетом препятствий [13] (см. рис. 6).

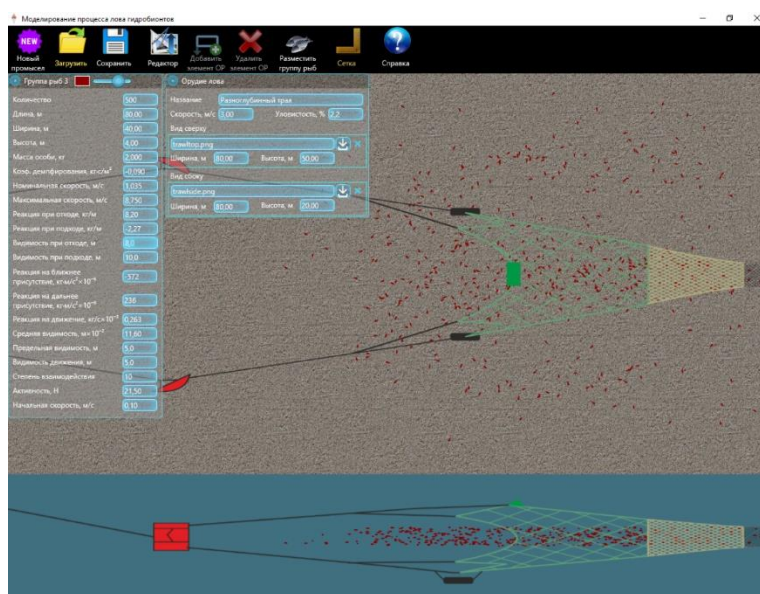


Рис. 6. Программное обеспечение по биомеханике гидробионтов и их поведенческих характеристик

Описанный метод будет апробирован при лове ряпушки спроектированным в разработанной авторами системе автоматизированного проектирования орудий промышленного рыболовства [14-18] и изготовленным экспериментальным разноглубинным траловым комплексом на озере Виштынецкое в Калининградской области (см. рис. 7).



*Рис. 7. Экспериментальный разноглубинный траловый комплекс для лова ряпушки*

В заключение, автоматическое отслеживание является полезным инструментом для характеристики поведения организмов и может быть особенно полезно для количественной оценки движения рыбы в трале при использовании гидролокатора. Наилучшие условия для автоматического мониторинга - однородные объекты отслеживания с умеренной плотностью размещения. В таких условиях мониторинг обеспечивает многообещающий метод извлечения качественной и количественной информации в процессе управления траловой конструкцией, в том числе о поведении гидробионтов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Калининградской области в рамках научного проекта № 19-48-390004.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Недоступ А.А. Метод расчета силовых и геометрических характеристик разноглубинных тралов// Известия ТИНРО. Владивосток. Т. 157. 2009. С. 229 - 246.
2. Недоступ А.А. Метод расчета силовых и геометрических характеристик донных тралов// Известия ТИНРО. Владивосток. Т. 164. 2011. С. 341-352.
3. Дверник А.В., Недоступ А.А., Янчук А. Особенности расчета вертикального раскрытия с учетом характера распределения пелагических рыб и тактики наведения разноглубинных тралов на скопления. Рыбное хозяйство. №4. - 2016. - С. 99-103.
4. Handegard, N. O., Williams, K. Automated tracking of fish in trawls using the DIDSON (Dual frequency IDentification SONar). – ICES Journal of Marine Science. 2008. 65. pp. 636–644.
5. Belcher, E. Dual-frequency Identification Sonar. DIDSON operation manual, 4.47.15. Sound Metrics, Seattle, WA. 2002. 44 pp.
6. Haralick, R. M., Shapiro, L. G. Computer and Robot Vision, 1. Addison-Wesley, Reading, MA. 1992. 672 pp.
7. Blackman, S. S., Popoli, R. Design and Analysis of Modern Tracking Systems. Artech House, MA. 1999.



8. Bertsekas, D. P. The auction algorithm for assignment and other network flow problems: tutorial. *Interfaces*. 20. 1990. pp. 133–149.
9. Handegard, N. O., Patel, R., Hjellvik, V. Tracking individual fish from a moving platform using a split-beam transducer. *Journal of the Acoustical Society of America*. 118. 2005. pp. 2210–2223.
10. Zar, J. H. *Biostatistical Analysis*. Prentice Hall, NJ. 1999.
11. Albert, O. T., Harbitz, A., Hoines, A. S. Greenland halibut observed by video in front of survey trawl: behaviour, escapement and spatial pattern. *Journal of Sea Research*. 50. 2003. pp. 117–127.
12. Piasente, M., Knuckey, I. A., Eayrs, S., McShane, P. E. In situ examination of the behavior of fish in response to demersal trawl nets in an Australian trawl fishery. *Marine and Freshwater Research*. 55. 2004. pp. 825–835.
13. Недоступ А.А., Альтшуль Б.А., Ражев А.О., Дятченко С.В., Бедарева О.М., Багрова А.А. Математическое моделирование поведенческих характеристик стаи рыб при облове разноглубинным тралом. *Морские интеллектуальные технологии*. №4(46) Т.4. 2019. - С. 181-185.
14. Ражев А.О., Недоступ А.А., Львова Е.Е. Математическая модель визуализации крученых канатно-веревочных изделий для задач проектирования орудий промышленного рыболовства // *Материалы XI Национальной (всероссийской) научно-практической конференции «Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промысловое и техническое использование»*. П-Камчатский. ФГБОУ ВО «КамчатГТУ». - 2020. - С. 222-226.
15. Ражев, А. О. Архитектура аппаратной части системы автоматизированного проектирования орудий промышленного рыболовства [Электронный ресурс] / А. О. Ражев, А. А. Недоступ, Е. Е. Львова // *Материалы 64-й Международной научной конференции Астраханского государственного технического университета, посвященной 90-летию юбилею со дня образования Астраханского государственного технического университета (Астрахань, 2020) : материалы (тез. докл., сб. ст.)*. – Астрахань : Изд-во АГТУ, 2020. – Режим доступа : 1 CD-диск. – № гос. регистрации 0322002778. – URL: [http://www.astu.org/Uploads/files/izdatelstvo/64-%D1%8F%20%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D1%86%D0%B8%D1%8F\\_%D0%A71.zip](http://www.astu.org/Uploads/files/izdatelstvo/64-%D1%8F%20%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D1%86%D0%B8%D1%8F_%D0%A71.zip) (дата обращения: 24.08.2022).
16. Ражев, А. О. Архитектура программного обеспечения системы автоматизированного проектирования орудий промышленного рыболовства [Электронный ресурс] / А. О. Ражев, А. А. Недоступ, Е. Е. Львова // *Материалы 64-й Международной научной конференции Астраханского государственного технического университета, посвященной 90-летию юбилею со дня образования Астраханского государственного технического университета (Астрахань, 2020) : материалы (тез. докл., сб. ст.)*. – Астрахань : Изд-во АГТУ, 2020. – Режим доступа : 1 CD-диск. – № гос. регистрации 0322002778. – URL: [http://www.astu.org/Uploads/files/izdatelstvo/64-%D1%8F%20%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D1%86%D0%B8%D1%8F\\_%D0%A71.zip](http://www.astu.org/Uploads/files/izdatelstvo/64-%D1%8F%20%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D1%86%D0%B8%D1%8F_%D0%A71.zip) (дата обращения: 24.08.2022).
17. Ражев, А. О. Расчет формы и нагрузок в рыболовном трале в процессе его проектирования [Электронный ресурс] / А. О. Ражев, А. А. Недоступ, Е. Е. Львова // *Материалы 64-й Международной научной конференции Астраханского государственного технического университета, посвященной 90-летию юбилею со дня образования Астраханского государственного технического университета (Астрахань, 2020) : материалы (тез. докл., сб. ст.)*. – Астрахань : Изд-во АГТУ, 2020. – Режим доступа : 1 CD-диск. – № гос. регистрации 0322002778. – URL: [http://www.astu.org/Uploads/files/izdatelstvo/64-%D1%8F%20%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D1%86%D0%B8%D1%8F\\_%D0%A71.zip](http://www.astu.org/Uploads/files/izdatelstvo/64-%D1%8F%20%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D1%86%D0%B8%D1%8F_%D0%A71.zip) (дата обращения: 24.08.2022).
18. Ражев, А. О. Структура данных системы автоматизированного проектирования орудий промышленного рыболовства [Электронный ресурс] / А. О. Ражев, А. А. Недоступ, Е. Е. Львова // *Материалы 64-й Международной научной конференции Астраханского государственного технического университета, посвященной 90-летию юбилею со дня образования Астраханского государственного технического университета (Астрахань, 2020) : материалы (тез. докл., сб. ст.)*. – Астрахань : Изд-во АГТУ, 2020. – Режим доступа : 1 CD-диск. – № гос. регистрации 0322002778. – URL: [http://www.astu.org/Uploads/files/izdatelstvo/64-%D1%8F%20%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D1%86%D0%B8%D1%8F\\_%D0%A71.zip](http://www.astu.org/Uploads/files/izdatelstvo/64-%D1%8F%20%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D1%86%D0%B8%D1%8F_%D0%A71.zip) (дата обращения: 24.08.2022).

# MONITORING OF THE MANAGEMENT PROCESS OF THE TRAWL STRUCTURE AND THE FISHING OBJECT USING SONAR

<sup>1</sup>Razhev Aleksey Olegovich, research scholar, PhD in Technical Sciences

<sup>2</sup>Nedostup Aleksandr Alekseevich, associate professor, PhD in Technical Sciences

<sup>1,2</sup>Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,

e-mail: <sup>1</sup>progacpp@live.ru; <sup>2</sup>nedostup@klgtu.ru

*This article discusses a method for monitoring the process of controlling a trawl structure during fishing and a fishing object using sonar on the example of a two-frequency identification sonar DIDSON. The characteristics of DIDSON, an algorithm for automated tracking of data coming from sonar, are considered. The algorithm includes separation of mobile from sedentary objects, filtering, threshold detector, marking of related components, object detection, tracking of several objects and extracting information about their behavior such as trajectories, speed and direction of movement. To track objects, a multiple-target tracking algorithm (MTT) is used, linking individual objects with their routes and estimating their position and speed based on data on current observation and accumulated historical data on routes already traveled. The disadvantages of the algorithm and the best conditions for automatic monitoring are identified – homogeneous tracking objects with moderate density of placement. Automatic tracking is a useful data processing method. It is applicable for the tasks of qualitative and quantitative assessment of the movement of trawl and fish in the process of trawling, monitoring the efficiency of the trawl system as a whole, as well as studies of the behavioral characteristics of hydrobionts.*

УДК 639.2.081.1

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗНОГЛУБИННОГО ТРАЛА 18/95 м ДЛЯ ЛОВА РЯПУШКИ (*Coregonus albula L.*) В ОЗЕРЕ ВИШТЫНЕЦКОЕ

<sup>1</sup>Недоступ Александр Алексеевич, канд. техн. наук, доцент

<sup>2</sup>Шибяев Сергей Вадимович, д-р биол. наук, профессор

<sup>3</sup>Насенков Павел Владимирович, специалист по УМР в УИЛ САПР техники  
промышленного рыболовства

<sup>4</sup>Новожилов Олег Анатольевич, канд. биол. наук, доцент

<sup>5</sup>Львова Екатерина Евгеньевна, канд. техн. наук, доцент

<sup>6</sup>Алдушин Андрей Викторович, ст. преподаватель кафедры водных биоресурсов  
и аквакультуры

<sup>7</sup>Сысенко Владимир Владимирович, студент магистратуры промышленного рыболовства

<sup>8</sup>Аскаров Дмитрий Всеволодович, студент магистратуры промышленного рыболовства

<sup>9</sup>Белозер Иван Сергеевич, студент магистратуры промышленного рыболовства

<sup>1-9</sup>ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,  
Калининград, Россия, e-mail: <sup>1</sup>nedostup@klgtu.ru

*Приводятся первые опытные данные эксплуатации разноглубинного трала 18/95 м для лова ряпушки (*Coregonus albula L.*) в озере Виштынецкое Калининградской области. Трал буксировался с учетом мощностей двумя соединенными между собой (в катамаран) моторными лодками "Wellboat" (мотор мощностью 25 л/с или 18,3 кВт). При проектировании разноглубинного трала*

18/95 м были использованы данные экспериментов с плавучим якорем и ПО «Система автоматизированного проектирования орудий промышленного рыболовства (САПР-ОР)». Получены технические характеристики проекта трала 18/95 м. При скорости траления  $v = 1,8$  м/с агрегатное сопротивление траловой системы составляет не более 2,9 кН, что удовлетворяет промыслу ряпушки в озере Виштынецкое.

Озеро Виштынецкое является самым крупным водоемом, расположенным на территории Калининградской области, в котором обитают жилые формы сиговых - ряпушка и сиг [1]. Внушительная площадь зеркальной поверхности водоема (1,8 тыс. га), его большая глубина (54 м) со сложным рельефом дна делают данный олиготрофный водоем уникальным по своей природе.

Промысел ряпушки (*Coregonus albula* L.) в озере Виштынецкое ведется ставными сетями [2-5]. При этом ставной сетью достаточно сложно оценить запасы ряпушки с точки зрения точности. К тому же уловы ставными сетями не достигают необходимых значений промыслового усилия. Из-за проблем с определением обловленного пространства водоема показателями промыслового усилия в основном следует принимать абсолютное количество сетей, а также стандартизированное количество сетей с учетом различия уловов, а иногда и времени их работы.

Отметим, что облов ряпушки (*Coregonus albula* L.) ведется преимущественно в озерах, реже в реках, но и в Ботническом и Финском заливах Балтийского моря. Предпочитает чистое песчаное или глинистое дно, держится в озерах преимущественно на глубине, избегая очень теплой воды. Особенности поведения ряпушки (*Coregonus albula* L.) в озере Виштынецкое описаны в трудах [2-5]. В 70-80 годы прошлого столетия европейская ряпушка (далее ряпушка) была основным объектом промысла, уловы данного вида достигали 28 т. [2-5]. Размерами достигает 13-20 см, максимальная величина - до 35 см. Однако с начала 90-х годов наблюдалось резкое снижение уловов, обусловленное, прежде всего, социально-экономическими причинами. Несмотря на возрождение промысла на озере и предпринимаемые попытки увеличения вылова ряпушки, ее уловы оказались на порядок ниже по сравнению с периодом интенсивного рыболовства.

На основании данных эхозаписей [5] вертикальное раскрытие устья проектируемого разноглубинного трала должно быть в районе 8-10 м. Рыболовной единицей будет две соединенные между собой (в катамаран) моторные лодки «Wellboat», мощность моторов которых составляет 25 л/с, или 18,3 кВт. Винт мотора - грузовой.

Основной задачей разработки методов и орудий рыболовства для рациональной добычи ряпушки (*Coregonus albula* L.) в озере Виштынецкое является обоснование тралового лова, так как трал для лова ряпушки будет эксплуатироваться и окажет существенное приращение улова ценного вида гидробионтов.

Полученные результаты исследований позволяют сделать вывод о необходимости интенсификации промысла ряпушки в оз. Виштынецком. Более того, введение тралового лова в рамках научных работ (наряду с гидроакустическим методом) позволит использовать указанные сведения для достоверной оценки состояния популяции ряпушки и управлению ее запасами.

По правилам рыболовства для Западного рыбохозяйственного бассейна (приказ Минсельхоза от 21 октября 2020 г. N 620) ряпушку на озере можно вылавливать ставными сетями (п. 19). В соответствии с п. 19.3 данных правил к видам запретных орудий и способов добычи (вылова) водных биоресурсов относятся тралы и другие тралящие орудия добычи (вылова). Вылов тралом возможен только для исследовательских (научных) целей, для учетных съемок и обоснования ОДУ. При этом согласно п. 20 правил в Ладожском и Чудском озерах тралами запрещено вылавливать ряпушку только в прибрежных зонах, ограниченных 20-метровой изобатой, а также в шхерных районах - в течение всего года в северной части Ладожского озера; пелагические тралы повсеместно в южной части Ладожского озера, за исключением двух пелагических тралов в 3 и 4 квартале на участке к северу ограниченном прямыми линиями, соединяющими точки с соответствующими.

На основании экспериментальных данных с плавучим якорем в гидроканале ООО «Фишеринг Сервис» (см. рис. 1) и на полигоне на лодке (см. рис. 2) получены значения располагаемой тяги лодки Ока-4 с мотором мощностью 25 л/с, или 18,3 кВт, она составила  $P_p=1,517$  кН при скорости буксировки  $v=1,5$  м/с.

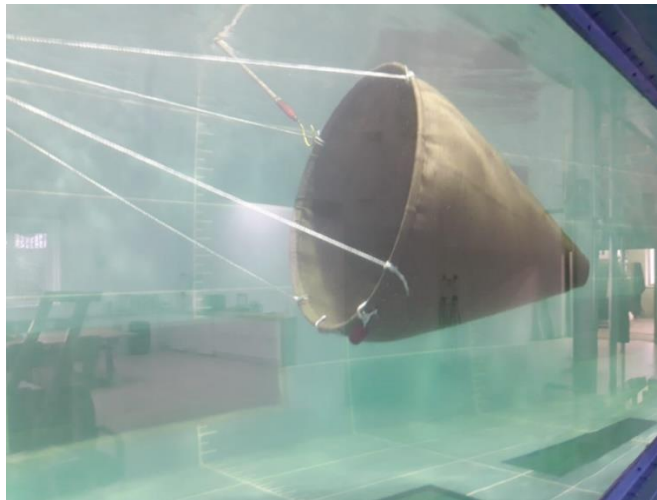


Рис. 1. Эксперименты с плавучим якорем в гидроканале ООО «Фишеринг Сервис»



Рис. 2. Эксперименты с плавучим якорем на полигоне

Так как максимальная скорость буксировки плавучего якоря на полигоне одной лодкой составила  $v_{\max}=1,5$  м/с, то при тралении двумя лодками скорость будет немного больше (эксперименты с двумя лодками не проводились), и тяга катамарана будет  $P_p \geq 2,9$  кН. Это означает, что при скорости траления (необходимая скорость траления)  $v=1,8$  м/с агрегатное сопротивление спроектируемого трала должно быть не более  $R_a \leq 2,9$  кН.

Для конструкции катамарана (две лодки «Wellboat») для буксировки трала 18/95 м соорудили кабельно-сетной барабан с ручным приводом (см. рис. 3).



Рис. 3. Промысловая единица, две лодки «Wellboat»

Для обоснования, приведенного выше были проведены экспериментальные исследования в озере Виштынецкое Калининградской области с плавучим якорем, который буксировался промышленной единицей. Скорость буксировки составила 2,07 м/с. По формуле (1) определим значение сопротивления плавучего якоря, которая соответствует располагаемой тяги катамарана на данной скорости

$$R_a = 1060 \frac{\pi D^2}{4} v^2 = 1060 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,9^2}{4} \cdot 2,07^2 = 2,9 \text{ кН}, \quad (1)$$

где  $D=900$  мм - диаметр наибольшего основания плавучего якоря; показатель 1060 имеет размерность плотности  $\text{кг/м}^3$ .

На основании значения  $R_a \leq 2,9$  кН и используя программное обеспечение САПР «Система автоматизированного проектирования орудий промышленного рыболовства» [6] разработаны чертежи канатных и сетных частей разноглубинного трала ряпушки (*Coregonus albula*) в озере Виштынецкое (см. рис. 4 и 5).

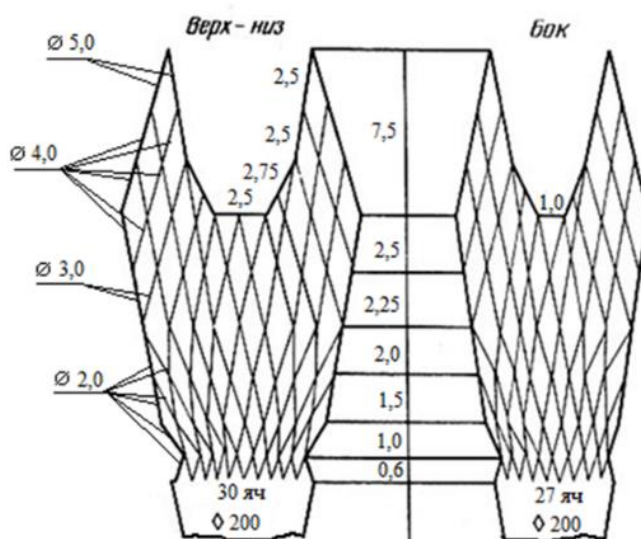


Рис. 4. Канатная часть разноглубинного трала 18/95 м

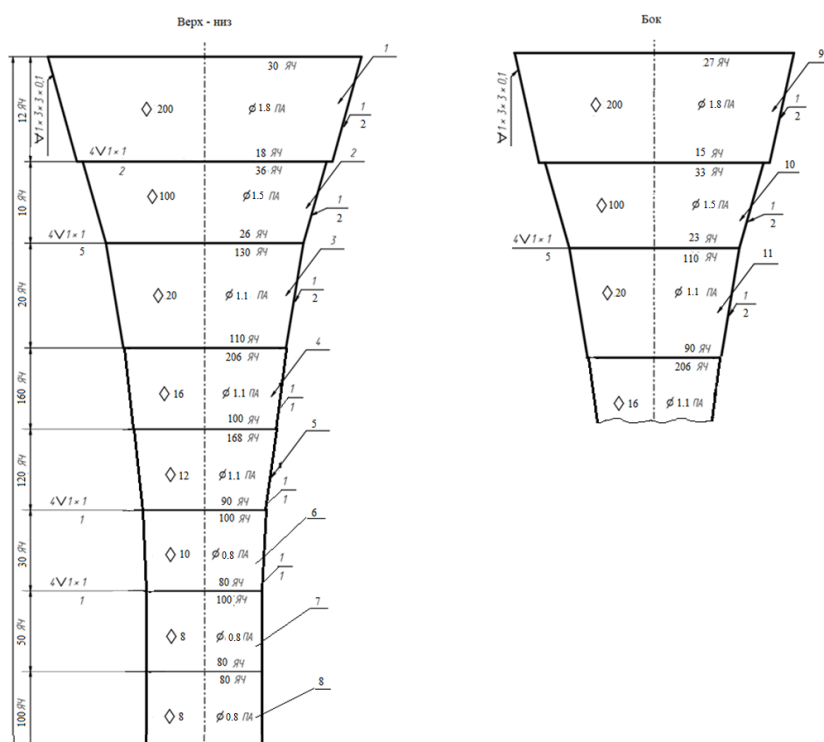


Рис. 5. Сетная часть разноглубинного трала 18/95 м



Неотъемлемой частью CAD, CAM и CAE является 3D моделирование трала в ПО «Система автоматизированного проектирования орудий промышленного рыболовства», результаты которого приводятся на рис. 6.

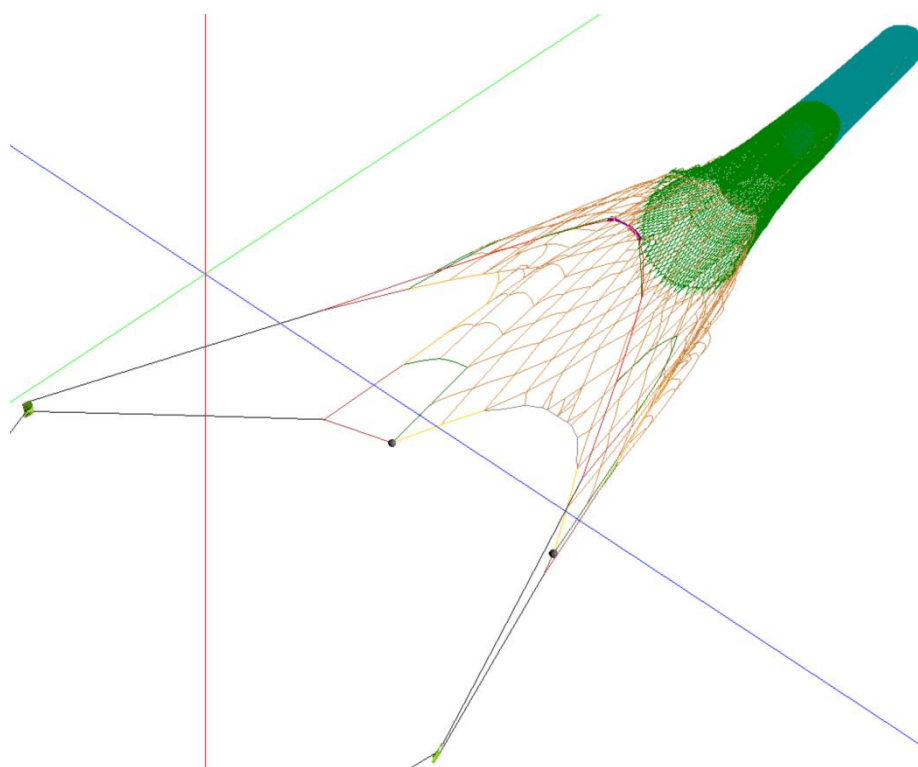


Рис. 6. 3D трала 18/95м

Результаты моделирования приводятся в таблице 1 и 2.

Таблица 1

**Расчетные значения параметров разноглубинного трала 18/95 м**

Скорость траления, $V$ м/с	Сплошность, $F_o$	Площадь канатно-сетной части, $F_{НК}$ м <sup>2</sup>
1,8	0,03	12,03

Таблица 2

**Расчетные конструктивные, геометрические и силовые характеристики модели трала**

Горизонтальное раскрытие устья трала по гужу, $L$ м	Вертикальное раскрытие устья трала по гужу, $H$ м	Коэффициент сопротивления канатно-сетной части трала, $c_x$	Агрегатная сила сопротивления трала, $R_a$ кН
8,0	8,75	0,08	1,8

Отметим, что опыты с тралом на оз. Виштынецкое проводятся с более и менее постоянством [7]. Это связано с необходимостью облавливать скопления ряпушки активными орудиями рыболовства. Эксперименты 2012 года изображены на рис. 7.

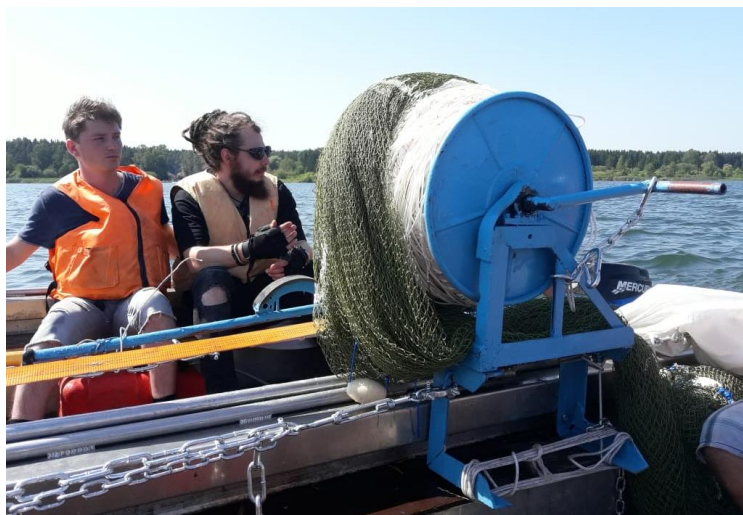


*Рис. 7. Эксперименты с тралом (близнецовый лов)*

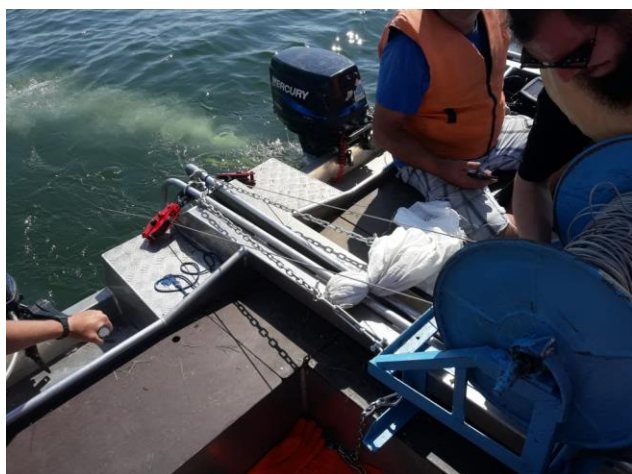
На рис. 7-10 приводятся фотографии с промысла разноглубинным тралом 18/95 м 17 августа 2022 г. на оз. Виштынецкое.



*Рис. 7. Постановка трала 18/95м*



*Рис. 8. Промысловая команда*



*Рис. 9. Эксплуатация кабельно-сетного барабана*



*Рис. 10. Траление*

В ходе экспериментов с разноглубинным тралом 18/95 м на промысловой единице удалось поставить трал и буксировать его на глубине 16 м (см. рис. 11). Постановка трала с учетом подсединения грузов-углубителей и траловых досок выполнена штатно. Нештатная ситуация произошла при запутывании ваера на кабельно-сетном барабане и поломки его ручной тяги. Поэтому буксировка выполнялась на глубине 16 м. По эхозаписи видно (см. рис. 11), что вертикальное разрытие устья трала соответствовало примерно 9 м.

По итогам проведенных экспериментов принято решение разработать механизированную промысловую схему с разделенными ваерными лебедками и кабельно-сетным барабаном.

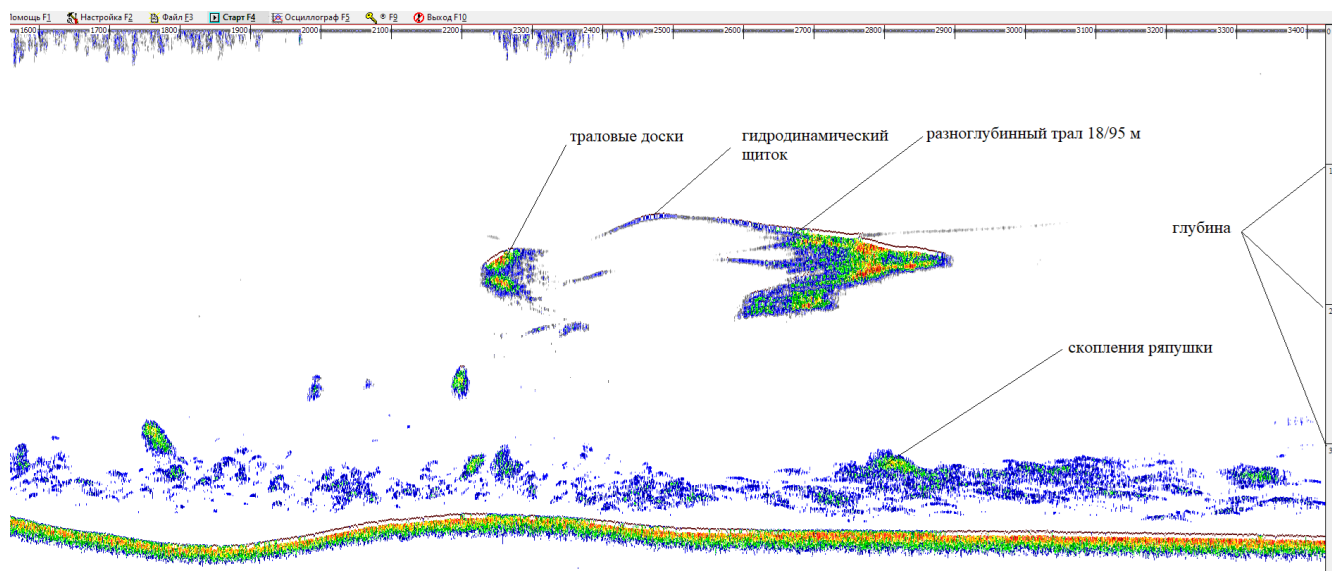


Рис. 11. Эхозапись трала 18/95 м и скоплений ряпушки

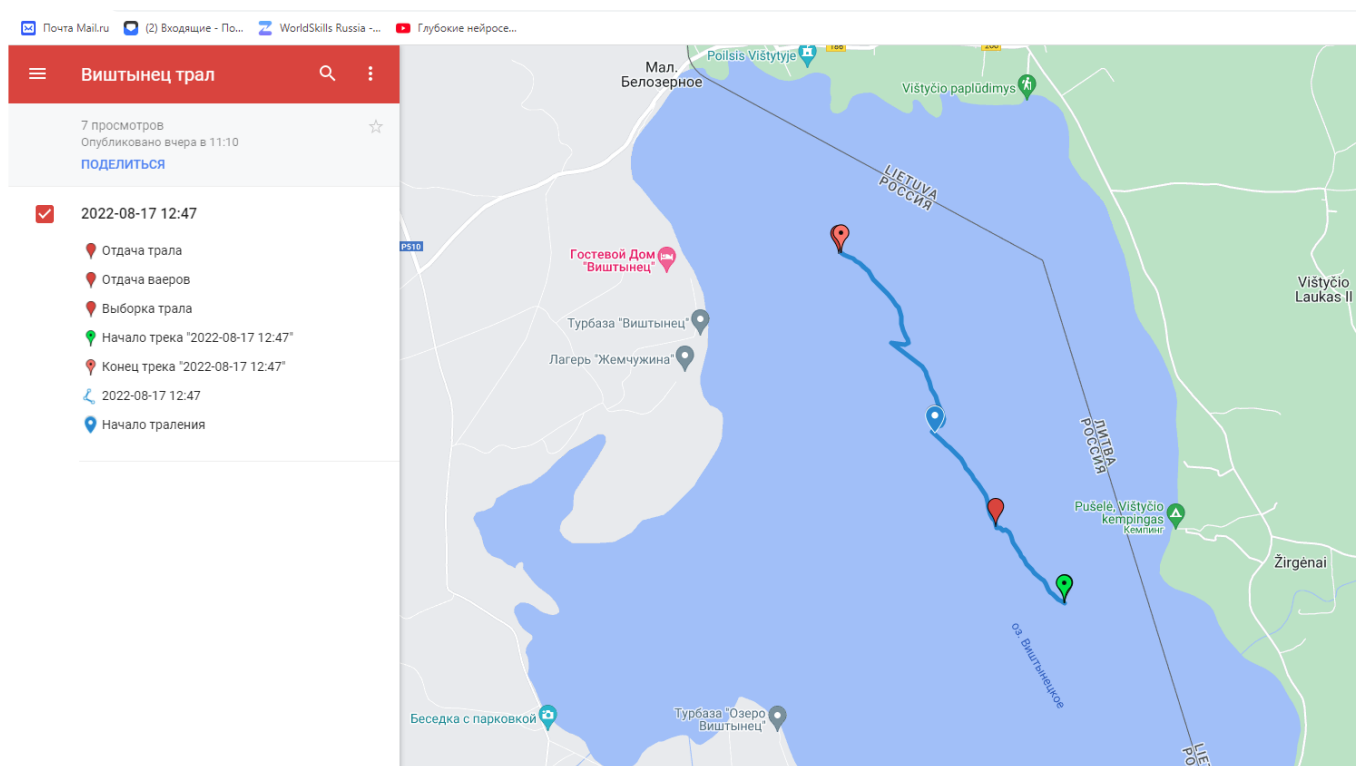


Рис. 12. Маршрут промысловой единицы в процессе траления, с указанием промысловых операций



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. Озеро Виштынецкое. Калининград: ИП Мишуткина И.В. - 2008. - 144 с.
2. Шибяев С.В., Соколов А.В., Алдушин А.В. Современное состояние популяции ряпушки (*Coregonus albula* L.) в озере Виштынецком Калининградской области // Биология, биотехника разведения и состояние запасов сиговых рыб: Матер. VII Всерос. науч.-производ. совещ. по биологии, биотехнике сиговых рыб. Тюмень, 2010. С. 64–68.
3. Шибяев С.В., Алдушин А.В. Пространственно-временная динамика ихтиоценоза пелагиали оз. Виштынецкого Калининградской области // Современное состояние биоресурсов внутренних водоемов: Матер. I Всерос. конф. М., 2011. Т. 2. С. 852–859.
4. Шибяев С.В., Соколов А.В. Структура донного ихтиоценоза озера Виштынецкого Калининградской области // Изв. Калининград. гос. техн. ун-та. 2014. № 32. С. 11–20.
5. Алдушин А.В., Шибяев С.В. Гидроакустические исследования пелагического ихтиоценоза озера Виштынецкого Калининградской области // Биология внутренних вод, 2016, №4. С 1-10.
6. <https://digitechlab.ru/>
7. Шибяев С.В., Левченко С.В., Алдушин А.В., Новожилов О.А., Белых А.В. Первые результаты экспериментального тралового лова в оз. Виштынецком калининградской области // Труды X международной научной конференции «инновации в науке, образовании и бизнесе-2012», Калининград, ФГБОУ ВПО «Калининградский государственный технический университет», 2012, в двух частях, часть 1. С. 71-73.

## EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF THE 18/95 m MIDDLE-WATER TRAIL FOR CATCHING *Coregonus albula* L. IN LAKE VISHTYNETSKOE

<sup>1</sup>Nedostup Aleksandr Alekseevich, associate professor, PhD in Technical Sciences

<sup>2</sup>Shibaev Sergey Vladimirovich, professor, PhD in Biological Science

<sup>3</sup>Nasenzov Pavel Vladimirovich, specialist in UMR, in UIL, CAD of industrial fishing

<sup>4</sup>Novogilov Oleg Anatolievich, associate professor, PhD in Biological Sciences

<sup>5</sup>Lvova Ekaterina Evgenievna, associate professor, PhD in Technical Sciences

<sup>6</sup>Aldushin Andrey Viktorovich, Senior Lecturer of the Department of Aquatic Bioresources and Aquaculture

<sup>7</sup>Sysenko Vladimir Vladimirovich, Master's student in industrial fishing

<sup>8</sup>Askarov Dmitry Vsevolodovich, Master's student in industrial fishing

<sup>9</sup>Belozher Ivan Sergeevich, Master's student in industrial fishing

<sup>1-9</sup>Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia, e-mail: <sup>1</sup>nedostup@klgtu.ru

*The article presents the development of a project for a mid-water trawl for catching *Coregonus albula* in Lake Vishtynetskoye, taking into account the fishing rules for the Northern and Western fishery basins (fishing for scientific purposes), as well as taking into account the capacities of two interconnected (into a catamaran) motor boats: Oka-4 (motor with a capacity of 25 hp or 18.3 kW). When designing a mid-depth trawl 18/95 m, data from experiments with a floating anchor and software «Computer-aided design system for industrial fishing gear (CAD-OR)» were used. The technical characteristics of the 18/95 m trawl design were obtained. At a trawling speed of  $v = 1.8$  m/s, the aggregate resistance of the trawl system is no more than 2.8 kN, which satisfies the fishery of *Coregonus albula* in Lake Vishtynetskoye.*

## МОБИЛЬНАЯ СЕТЕПОСАДОЧНАЯ ФАБРИКА И ЕЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

<sup>1</sup>Чмутина Дарья Юрьевна, магистрант кафедры промышленного рыболовства

<sup>2</sup>Савченко Андрей Евгеньевич, инженер-технолог

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,  
Калининград, Россия, e-mail: dasha.chmutina1999@gmail.com

<sup>2</sup>ООО «Приморрыбснасть», Владивосток, Россия, e-mail: tral-azimut@mail.ru

*Рассмотрен проект мобильной сетепосадочной фабрики. Рассчитаны основные экономические затраты на внедрение проекта мобильной «сетепосадки». Проведен сравнительный анализ классической фабрики и мобильного проекта. Проанализированы варианты снижения себестоимости изготовленного продукта.*

В мире существует множество фабрик по изготовлению орудий рыболовства. Это как небольшие узконаправленные цеха, так и производства, которые включают в себя все процессы по изготовлению орудий лова, начиная от изготовления каболок, заканчивая огромными орудиями лова, такие как трал или кошельковый невод.

Для собственного производства обязательной процедурой является учет расходов, из которых выявляется как рентабельность предприятия в целом, так и верная постановка стоимости произведенного продукта, исходя из себестоимости. Номенклатура статей калькуляционного листа устанавливается следующая:

- сырье и материалы за вычетом возвратных отходов;
- покупные изделия и услуги производственного характера сторонних предприятий и организаций;
- топливо и энергия;
- основная заработная плата производственных рабочих;
- дополнительная заработная плата производственных рабочих;
- отчисления на социальное страхование;
- расходы на содержание и эксплуатацию оборудования;
- цеховые расходы.

В себестоимость продукции и услуг вспомогательных производств, предназначенных для реализации за пределы предприятия, для собственного капитального строительства, капитального ремонта могут включаться и общехозяйственные расходы [1].

Особую роль у сетевязальных предприятий играет местоположение. Предприятиям, которые находятся близ морского пространства (прибрежные зоны Мурманской, Калининградской, Архангельской областей, Приморский край, Камчатка [2]) имеют более выгодное экономическое расположение, в отличие от тех предприятий, которые не имеют возможности беспрепятственно контактировать с морем (Тюменская, Московская области [2]) и, соответственно, имеют дело с дополнительными затратами на транспортировку своей продукции.

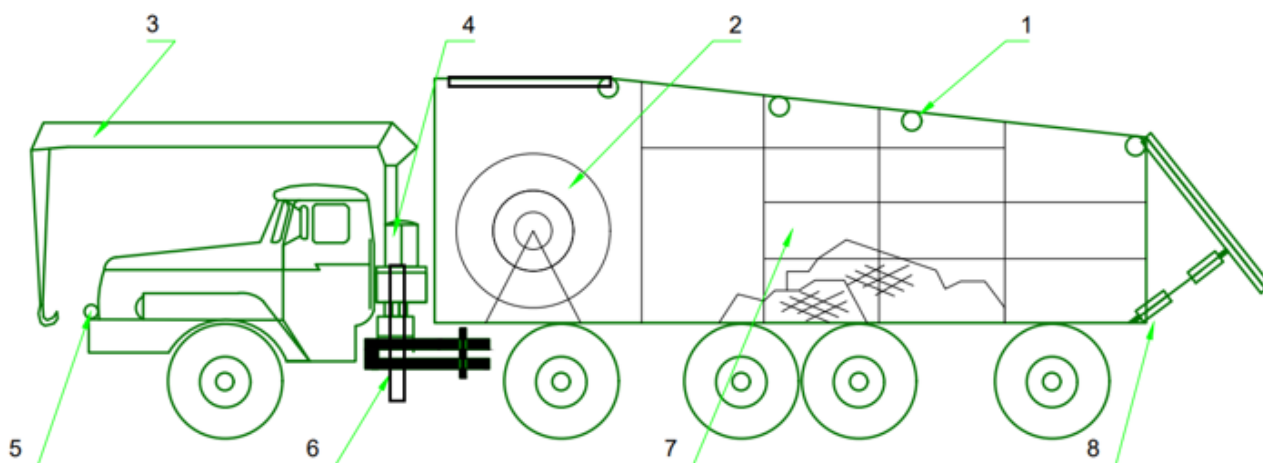
Если изучить расходы отдельных предприятий, то можно увидеть, что большая часть затрат приходится на закупку материалов, заработную плату рабочему персоналу, аренду здания и энергетическую составляющую (рассматривалось на примере ООО «Приморрыбснасть» г. Владивостока и на ООО «Фабрика орудий лова» п. Подъяпольск). И как говорилось ранее, по этим составляющим выявляется себестоимость изготовленной продукции и, соответственно, выставляется стоимость.

При рассмотрении себестоимости и стоимости продукции, можно увидеть, что в среднем они разнятся на 20-50 % в зависимости от вида работы, сроков изготавливаемой продукции, а также предприятия, которое занималось предоставлением услуги.

В попытках сокращения себестоимости продукции стоит прибегнуть к сокращению расходов из калькуляционного листа. Можно прибегнуть к мобильности, не арендуя здание, и таким образом

убрать и/или сократить затраты калькуляционного листа производства. Это такие статьи как: аренда здания, электроэнергия и т.д. Мобильность будет осуществляться с помощью проекта передвижных сетепосадочных фабрик.

Передвижные сетепосадочные фабрики представляют собой машину с встроенным краноманипулятором (КМУ) и с фургоном, в котором встроены два непропорциональных отсека. В малом отсеке находится барабан, с помощью которого можно транспортировать орудия лова разных размеров. Погрузка будет производиться по трапу, который является крышей фургона и заводится через люк, который находится в крыше над самим отсеком. Для уменьшения трения по трапу будут располагаться роилы. В большом отсеке находятся стеллаж с полками и отсеками, где будет храниться все необходимое для изготовления и ремонта орудий рыболовства на месте: дель, канаты, такелажные принадлежности и вспомогательные инструменты (иглицы, ножи, электроинструменты и т.д.), а также смазочные материалы и топливо. Эскизный чертеж представлен на рисунке 1.



*Рис. 1. Передвижная сетепосадочная фабрика  
роил; 2 – барабан; 3 – кран-балка; 4 – пульт управления краном и барабана;  
5 – балка для крепления крюков; 6 – аутригеры, 7 – стеллажи;  
8 – гидравлический механизм открывания двери*

Для удобства использования, возможно использование балки как на передней части машины, так и на самом фургоне, на которую, при отсутствии условий работы, можно будет прикрепляться как жесткими креплениями, так и гибкими. Также при необходимости крюк на кране можно заменить на другие комплектующие – подвесной блок, гак и др.

Для устойчивого положения на всех машинах с КМУ фабрично встроены аутригеры для безопасности загрузки тяжелых грузов, к которым могут относиться и крупные орудия лова.

Машины с КМУ могут быть разных типов и марок. При рассмотрении многих видов и сопоставив цену, качество и производительность, лучшими оказались машины марки URAL, КАМАЗ, некоторые из марки Daewoo. Некоторые варианты представлены в таблице 1.

Барабан подбирается в зависимости от вместимости фургона, грузоподъемности машины и максимальных размеров орудия лова, которое будет перевозиться.

Фургон или фабричный крытый кузов машины укомплектовывается по усмотрению. На рисунке 1 представлено примерное оформление отсеков. В основе представлен фургон со стеллажами, в которых хранится все необходимое для беспрепятственной работы с орудиями лова. Это расходные материалы, такие как дель, канаты, нитки, веревки, иглицы, ножи, свайки и др., электрооборудование, смазочные материалы, расходные запчасти для машины и КМУ и т.д.

**Марки машин с КМУ и их характеристики**

Марка КМУ	Характеристики	Цена
Урал Next	Грузоподъемность 8000 кг; КМУ Hiab, грузоподъемность на мин. вылете (2.0 м) – 5000 на макс. вылете (8.4 м) - 1750	от 7 500 000
КАМАЗ 65115-773094-50	Грузоподъемность 6000 кг; КМУ XCMG, грузоподъемность на мин. вылете - 6300 на макс. вылете (19.8) - 300	от 3 500 000
Daewoo Novus	Грузоподъемность 7000 кг; КМУ Hangil, грузоподъемность на мин. вылете (2.0 м) – 7500 на вылете 20.3 м (макс) – 450	от 6 500 000
Урал 5557	Грузоподъемность 7000 кг; КМУ Maeda 373, грузоподъемность 2900, длина стрелы 7,7 м,	от 1 500 000
КамАЗ 53212	Грузоподъемность 10000; КМУ Галичанин 150, грузоподъемность на мин. вылете – 7000 На макс. вылете – 300	От 2 000 000

Экономический расчет проекта мобильной сетепосадочной фабрики был сделан на примере проекта мобильной фабрики на основе Урала Next с КМУ Hiab. Расчет производился с учетом стоимости машины с КМУ, стоимости фургона и его переоборудования. Также с в расчет берется средняя стоимость барабана, средняя стоимость всех вспомогательных материалов. Все расходы на внедрение проекта в работу представлены в таблице 2.

Таблица 2

**Основные расходы на мобильную сетепосадочную фабрику**

Наименование	Стоимость, руб.
Урал Next с КМУ Hiab 2021 г.	8 000 000
Фургон 8000x2580x2300 из сэндвич-панелей	300 000
Гидравлический барабан	500 000
Переоборудование фургона с установкой гидравлического барабана	1 800 000
Вспомогательные материалы	50 000
<b>ИТОГО</b>	<b>10 650 000</b>

Таким образом проект мобильной сетепосадки на основе Урала Next с КМУ Hiab выходит примерно в 10 650 000 рублей.

Также было проведено сравнение стандартной фабрики орудий лова и проекта мобильной «сетепосадки». Рассматривались статьи калькуляционного листа и также некоторые возможности обоих вариантов.

Как говорилось ранее, фабрики орудий лова зависят от местоположения, и в связи с этим добавляются или наоборот удаляются некоторые статьи расходов калькуляционного листа. Также, исходя из местоположения, возрастает аренда здания, либо же его стоимость к приобретению. Основываясь на средней стоимости аренды зданий Дальнего Востока на 2021 год, можно рассчитать, что в среднем стоимость аренды подходящего здания для данного производства за год выйдет около 7 – 8 млн. рублей. Напротив, проект мобильной сетепосадочной фабрики предполагает однократное приобретение всего необходимого на долгий срок пользования, так же можно воспользоваться арендой, но по стоимости она будет в десятки раз меньше в отличие от аренды здания. Из минусов такого решения можно отметить только условия труда и выработки. Чаще всего в условиях мобильной «сетепосадки» работа будет проводиться либо на улице, либо в необорудованном помещении. Но под такие условия можно приспособиться наличием всех вспомогательных инструментов, которые будут находиться в фургоне.

Говоря про выработку готовых изделий очевиден факт, что на фабрике стандартного типа процент выпущенной продукции будет больше, чем в условиях мобильной «сетепосадки». Но этот недостаток будет перекрывать себестоимость продукции, которая в условиях мобильной «сетепосадки» будет меньше, нежели в условиях фабрики. Поэтому для достижения большего процента рентабельности будет возможно прибегнуть к некоторому увеличению стоимости изделия, которая будет меньше, либо равна стоимости готового изделия, изготовленного в условиях фабрики, при этом качество работы будет одинаковое.

Расходы на транспортировку продукции и изделий – неотъемлемая часть калькуляционного листа предприятия. Туда входит расходы на доставку приобретенного имущества, расходы на доставку покупателям продукции, расходы на обслуживание автопарка [3]. Мобильная сетепосадочная фабрика предполагает выход к работе уже с запасом тех или иных материалов (в зависимости от заказа целесообразно заранее рассмотреть все необходимые материалы и закупить их). А ремонт и обслуживание машины и вспомогательного оборудования можно отнести к цеховым расходам, поэтому транспортные расходы упраздняются вовсе.

В цеховые расходы проекта мобильной сетепосадочной фабрики будут входить ремонт и обслуживание машины и вспомогательных механизмов, закупка расходных материалов и продуктов. Цеховые расходы на фабрике стандартного типа похожие, только в отличие от мобильного проекта ремонт и обслуживание машин, как говорилось ранее, будет входить в транспортные расходы, но будут иметь место расходы на обслуживание здания и цехового оборудования.

Также в условиях мобильной сетепосадочной фабрики можно упразднить расходы на электроэнергию. Напротив, вырастут расходы на топливо и смазочные материалы.

При условиях фабрики нужен относительно большой штат рабочих. В зависимости от масштабов фабрики и планов выработки, на фабриках стандартного типа должен присутствовать организационный отдел, бухгалтерия, и другие отделы, которые будут формировать бесперебойную и слаженную работу технологического цеха. Соответственно, расходы на заработную плату и на социальные отчисления будут составлять одну из самых больших статей расходов. Для бесперебойной работы на мобильной сетепосадочной фабрике требуется небольшой штат рабочих, в который должны входить: начальник цеха, инженер-технолог и несколько профессиональных изготовителей орудий лова. Обязанности каждого из штата описаны в таблице 3.

Таблица 3

### Расписание обязанностей сотрудников мобильной сетепосадочной фабрики

Сотрудники	Обязанности
Начальник цеха	- ведение отчетной документации; - работа с заказчиками; - ведение финансового оборота; - заказ расходных материалов и материалов для работы с заказом; - изготовление и ремонт орудия лова.
Инженер-технолог	- расчет, изготовление и ремонт орудий лова; - составление и чтение чертежей; - организация работы по изготовлению и ремонту орудий лова;
Изготовители орудий лова	- управление барабаном с пульта управления; - управление КМУ с пульта управления; - управление машиной; - изготовление и ремонт орудия лова; - поддержание порядка на рабочем месте, в машине и фургоне; - отчетность о проделанной работе инженеру-технологу.

Заработная плата такого штата работников может быть как сдельная, так и рассчитываться по окладу. Однако заработная плата как статья расходов будет также одной из самых больших статей. Но при этом, рабочие могут получать более высокую заработную плату, а в условиях сдельной заработной платы, рабочий штат будет промотивирован на выполнение большего числа заказов, что принесет прибыль как и им самим, так и самому предприятию.

Таким образом, исходя из всего вышеперечисленного, можно сделать вывод, что мобильная сетепосадочная фабрика имеет большие перспективы в развитии. Данный проект можно воплотить как отдельное предприятие, так и внедрить в крупные фабрики, которым эта перспектива подходит как для возможной мобильности, так и для расширения возможностей выполнения заказов, предлагаемым заказчиком.

В некоторых странах данный проект уже используется как отдельные предприятия, и также пользуются популярностью у заказчиков, благодаря возможности исполнителей приехать на место ведения промысла или на судно, которое находится в порту, и в кратчайшие сроки выполнить работу по заказу. В России данный проект еще никем не внедрен, хотя имеет достаточно большую актуальность и перспективы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Учет затрат и калькулирование себестоимости на предприятиях рыбной отрасли: кон. лекций для студ. напр. 38.04.01 / О.В. Макарова. – Керчь: КГМТУ, 2020. – 92 с.
2. Сетевязальная промышленность // Электрон. Дан. Режим доступа URL: <https://comreport.ru/okonh/17134> (дата обращения 15.08.2022)
3. Транспортные расходы – это прямые или косвенные расходы? // Электрон. Дан. Режим доступа URL: [https://nalog--nalog-ru.turbopages.org/nalog-nalog.ru/s/uchet\\_zatrat/transportnye\\_rashody\\_eto\\_pryamy\\_e\\_ili\\_kosvennye\\_rashody/](https://nalog--nalog-ru.turbopages.org/nalog-nalog.ru/s/uchet_zatrat/transportnye_rashody_eto_pryamy_e_ili_kosvennye_rashody/) (дата обращения 18.08.2022)

## MOBILE NETTING FACTORY AND ITS ECONOMIC JUSTIFICATION

<sup>1</sup>Chmutina Daria Yurievna, master student of the Department of Commercial Fishing

<sup>2</sup>Savchenko Andrey Evgenievich, engineer-technologist

<sup>1</sup>Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,

e-mail: [dasha.chmutina1999@gmail.com](mailto:dasha.chmutina1999@gmail.com)

<sup>2</sup>LLC Primorrybsnast, Vladivostok, Russia, e-mail: [tral-azimut@mail.ru](mailto:tral-azimut@mail.ru)

*This article discusses the project of a mobile netting factory. The main economic costs for the implementation of the mobile netting factory project have been calculated. A comparative analysis of the classical factory and the mobile project was carried out. Analyzed options for reducing the cost of the manufactured product.*

# СЕКЦИЯ «ПРИКЛАДНАЯ РАДИОФИЗИКА, РАДИОТЕХНИКА И ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ»

## SECTION "RADIOPHYSICS, RADIO ENGINEERING AND INFORMATION SECURITY"

УДК 621.396.677

### ЛОГОПЕРИОДИЧЕСКИЙ ОБЛУЧАТЕЛЬ БОЛЬШИХ ЗЕРКАЛЬНЫХ АНТЕНН ДЛЯ ОДНОВРЕМЕННОГО ПРИЕМА РАДИОВОЛН ВЕРТИКАЛЬНОЙ И ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

<sup>1</sup>Волхонская Елена Вячеславовна, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры судовых радиотехнических систем

<sup>1</sup>Коротей Евгений Владимирович, доцент кафедры судовых радиотехнических систем

<sup>1,2</sup>Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия, e-mail: <sup>1</sup>volkhonskaya\_e@mail.ru; <sup>2</sup>eugeny\_korotey@mail.ru

*Представлены результаты модельных исследований характеристик излучения однозеркальной параболической антенны с печатным логопериодическим облучателем двойной поляризации, функционирующим в С диапазоне. Показано, что основные характеристики излучения изменяются в пределах рабочего диапазона частот на 1,2–2,6 % и только ширина диаграммы направленности претерпевает более ощутимые изменения в 9,4 %. Однако данные изменения являются типовыми и не свидетельствуют о недостатках изложенной в работе модели поля излучения. Все полученные значения характеристик излучения соответствуют предъявляемым к ним требованиям.*

#### Постановка задачи

В системах спутниковой связи и вещания существует практика многократного использования имеющейся полосы частот. Это осуществляется, либо за счет пространственного разнеса лучей, либо за счет развязки по поляризации.

Логопериодические и рупорные антенны находят широкое применение в качестве облучателей зеркальных антенн наземного сегмента систем спутниковой связи. Конструкция логопериодических антенн [1] предполагает прием волн, либо горизонтальной, либо вертикальной поляризации. В общем случае волна может иметь составляющие с обоими типами поляризации, то есть иметь вращающуюся поляризацию [2]. Для приема таких радиоволн могут использоваться специальные рупорные или логопериодические антенны двойной поляризации [3-6].

Конструкция облучателя зеркальной антенны должна не только обеспечивать возможность приема волн горизонтальной и вертикальной поляризации, но и обеспечивать характеристики всей антенной системы, удовлетворяющие требованиям к ним [7]. Одним из важных вопросов в данном случае является обеспечение кросс-поляризационной развязки между каналами приема волн с вертикальной и горизонтальной поляризациями. Для решения данного вопроса на стадии проектирования важным является исследование взаимного влияния излучающих элементов, отвечающих за прием волн различной поляризации [8].

В рамках данной работы был проведен анализ диапазонных свойств однозеркальной параболической антенной с логопериодическим облучателем двойной поляризации, функционирующим в С диапазоне (3,4 – 4,1 ГГц).

## Конструкции логопериодического облучателя двойной поляризации

В диапазоне ультравысоких частот (УВЧ) конструкция таких антенн (рисунок 1) предполагает наличие двух распределительных фидеров, изолированных друг от друга и имеющих отдельные коаксиальные разъемы для подачи сигнала или приема радиоволн линейной поляризации.

Однако при работе в СВЧ диапазоне размеры излучающих элементов становятся слишком малыми, и оправдан переход к печатному исполнению таких антенн.

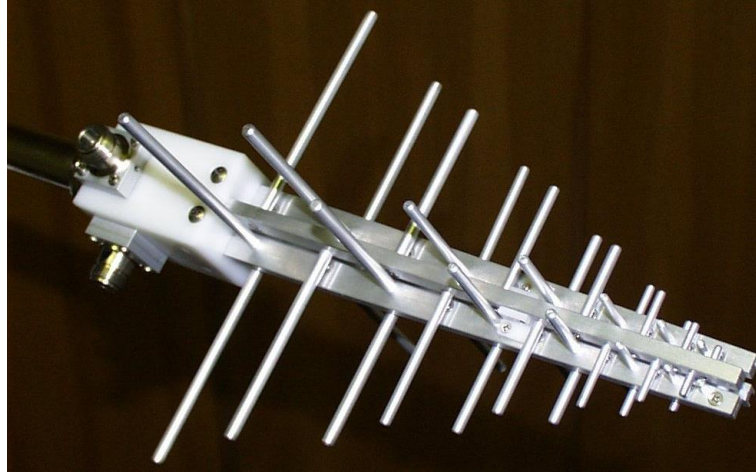
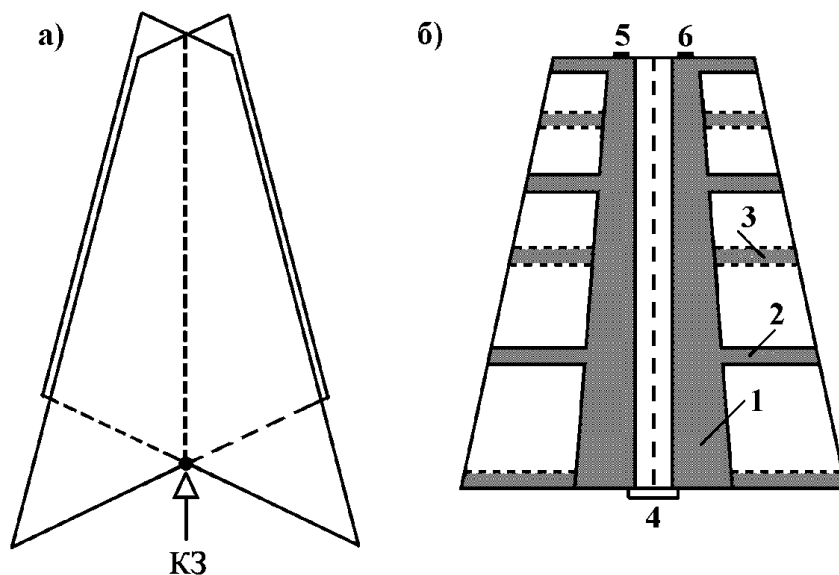


Рис. 1. Конструкция «монолитной антенны»

Проведенный анализ патентной информации показал, что в случае антенн двойной поляризации печатных аналогов для приведенной проволочной логопериодической антенны (ЛПА) не существует. В отчете о НИР [9] представлен возможный вариант конструкции такой антенны (рисунок 2), а также результаты модельных исследований ее направленных свойств.



- 1 – траверса распределительного фидера;  
2, 3 – излучающие элементы лицевой и оборотной стороны платы;  
4 – короткозамкнутый фидер;  
5, 6 – точки подключения центральной жилы и оплетки коаксиального кабеля;

Рис. 2. Структура печатной логопериодической антенны двойной поляризации:  
а) общий вид; б) структура половины антенны



## Оптимизация геометрических параметров зеркальной антенны

Оптимизированная в [9] конструкция логопериодического облучателя была применена для расчета «полевых» характеристик однозеркальной параболической антенны в соответствии с методикой расчета, изложенной в [10] и адаптированной под логопериодический облучатель в [11]. Для получения оптимальных значений параметров излучения, удовлетворяющих требованиям к ним, изложенным в [7], были специальным образом подобраны два параметра рефлектора – фокусное расстояние  $f$  и радиус раскрыва  $R$ .

Изначально радиус раскрыва рефлектора был выбран равным 1 м, как и в работе [12], в которой проводилось сравнение точностных характеристик моделей зеркальной антенны на основе апертурного метода и метода поверхностных токов. Для выбора оптимального значения фокусного расстояния была выставлена центральная рабочая частота облучателя и при изменении величины варьируемого параметра фиксировались значения параметров излучения зеркальной антенны. При этом глубина рефлектора однозначно связана с радиусом раскрыва и фокусным расстоянием [10]. Результаты данных исследований приведены в таблице 1.

Таблица 1

### Оптимизация фокусного расстояния рефлектора

$f$ , мм	$\Delta\theta$ , град	$\Delta\theta_{\max}$ , град	$\xi$ , дБ	$\xi_{\max}$ , дБ	$D$ , дБи	$D_{\min}$ , дБи	$\nu$
550	0,234	0,273	-16,178	-14	57,726	54,924	0,968
600	0,233		-14,778		57,511		0,921
650	0,231		-13,17		57,160		0,850
700	0,228		-11,914		56,785		0,780
750	0,225		-10,974		56,432		0,719
800	0,222		-10,242		56,100		0,666

Из полученных значений видно, что с ростом фокусного расстояния рефлектора уменьшается ширина диаграммы направленности (ДН)  $\Delta\theta$ , растет максимальный относительный уровень боковых лепестков (УБЛ)  $\xi$ , уменьшаются коэффициент направленного действия (КНД)  $D$  и коэффициент использования поверхности (КИП) рефлектора  $\nu$ . При фокусных расстояниях свыше 600 мм значение максимального УБЛ превышает -14 дБ и становится неприемлемым. При этом значение фокусного расстояния должно быть как можно больше, чтобы обеспечить дальнюю зону для расположения фазового центра облучателя (по крайней мере, оно должно быть больше длины облучателя). Поэтому на следующем этапе было зафиксировано максимальное приемлемое значение фокусного расстояния 600 мм, и менялся радиус рефлектора. Результаты данных исследований приведены в таблице 2.

Таблица 2

### Оптимизация радиуса раскрыва рефлектора

$R$ , мм	$\Delta\theta$ , град	$\Delta\theta_{\max}$ , град	$\xi$ , дБ	$\xi_{\max}$ , дБ	$D$ , дБи	$D_{\min}$ , дБи	$\nu$
900	0,230	0,273	-12,954	-14	57,125	54,924	0,843
950	0,232		-13,831		57,330		0,884
1000	0,233		-14,778		57,511		0,921
1050	0,234		-15,647		57,645		0,950
1100	0,234		-16,100		57,703		0,963

Анализ полученных результатов позволяет утверждать, что с ростом радиуса раскрыва рефлектора максимальный УБЛ уменьшается, а КНД и КИП растут. Таким образом, следует увеличить радиус раскрыва рефлектора и повторить процедуру оптимизации фокусного расстояния контррефлектора. В результате нескольких итерационных процедур были выбраны значения радиуса раскрыва рефлектора 2 м и значение фокусного расстояния 1,1 м.

## Результаты модельных исследований

Для установленных значений конструктивных параметров рефлектора было проведено модельное исследование направленных свойств в пределах рабочего диапазона частот облучателя. Результаты данных исследований приведены в таблице 3.

Таблица 3

### Частотные свойства однозеркальной антенны

$f$ , МГц	$\Delta\theta$ , град	$\Delta\theta_{\max}$ , град	$\xi$ , дБ	$\xi_{\max}$ , дБ	$D$ , дБи	$D_{\min}$ , дБи	$\nu$
3462	0,248	0,295	-14,601	-14	56,621	54,264	0,874
3551	0,241	0,287	-14,453		56,904	54,484	0,886
3642	0,234	0,280	-14,276		57,144	54,704	0,891
3735	0,229	0,273	-14,548		57,310	54,924	0,880
3869	0,222	0,264	-14,834		57,462	55,231	0,849
3969	0,218	0,257	-15,105		57,691	55,451	0,851
4030	0,213	0,253	-14,747		57,853	55,584	0,856
4112	0,209	0,248	-14,735		58,088	55,760	0,868

На рисунке 3 приведены данные частотные зависимости.

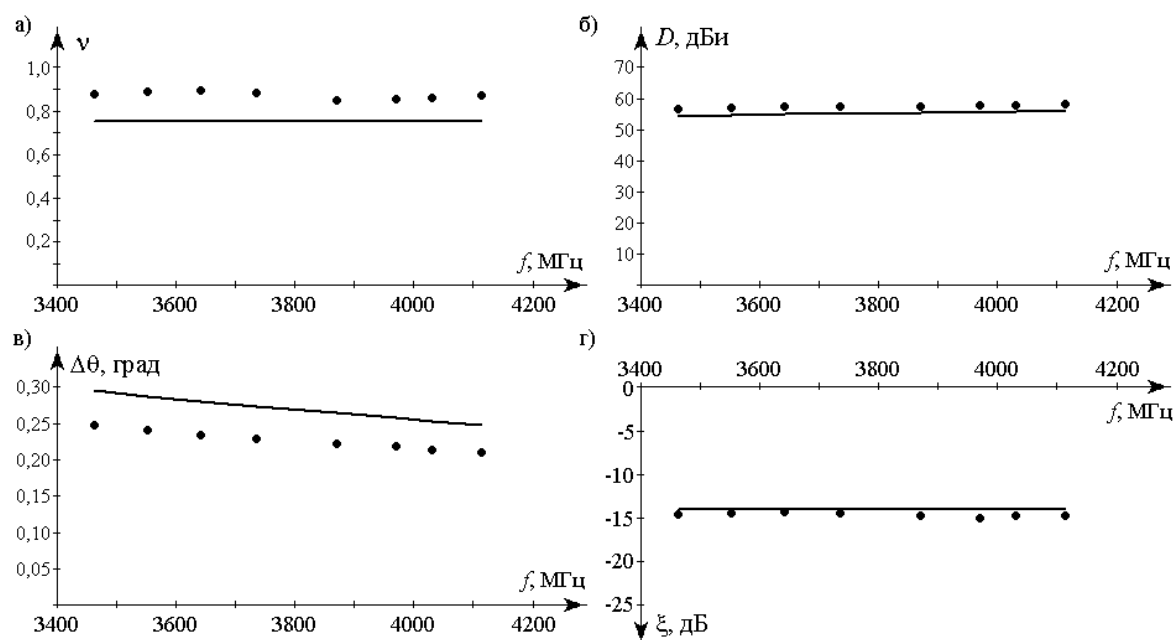


Рис. 3. График частотной зависимости КИП (а), КНД (б), ширины ДН (в) и максимального УБЛ (г) для однозеркальной антенны с облучателем в виде печатной ЛПА двойной поляризации

Анализ полученных результатов показал, что зеркальная антенна сохраняет свои направленные свойства в пределах всего рабочего диапазона частот и значения параметров излучения соответствуют требованиям к ним: КИП составляет  $0,869 \pm 0,022$  (изменение на 2,5 %) и превышает минимальное требуемое значение 0,75; КНД составляет  $57,38 \pm 0,07$  дБи (изменение на 1,2 %) и превышает минимально необходимое значение на каждой рабочей частоте; ширина ДН составляет  $0,227^\circ \pm 0,021^\circ$  (изменение на 9,4 %) и не превышает максимально допустимого значения на каждой рабочей частоте; максимальный УБЛ составляет  $-14,66 \pm 0,39$  дБ (изменение на 2,6 %) и не превышает максимально допустимого значения  $-14$  дБ на каждой рабочей частоте.

Если отключить питание одной из половин антенны двойной поляризации, то можно выяснить, какая мощность наводится на ней второй половиной антенны, а значит, узнать величину кросс-поляризационной развязки  $\gamma$  между каналами приема волн горизонтальной и вертикальной поляризации в составе зеркальной антенны. Полученные результаты приведены в таблице 4.

### Частотная зависимость кросс-поляризационной развязки

$f$ , МГц	3462	3551	3642	3735	3869	3969	4030	4112
$\gamma$ , дБ	-51,051	-49,418	-52,299	-50,275	-50,386	-48,617	-51,856	-49,521

Анализ полученных значений позволяет утверждать, что оптимизированный облучатель двойной поляризации в составе однозеркальной антенны будет обеспечивать требуемый уровень кросс-поляризационной развязки -20 дБ для круговой поляризации без уплотнения и -30 дБ – для линейной поляризации с уплотнением и без него [7].

### Заключение

Таким образом, в работе показано, что использование структуры микрополосковой логопериодической антенны позволяет создавать облучатели больших зеркальных антенн для приема волн вращающейся поляризации. Получаемые при этом характеристики излучения зеркальных антенн не только соответствуют предъявляемым к ним требованиям, но и демонстрируют стабильность в пределах рабочего диапазона частот.

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием на выполнение НИОКР «Разработка электродинамических моделей облучателей больших зеркальных антенн в составе системы ГМССБ для исследования качества решения задач спутниковой радиосвязи и радионавигации», приказ № 61 от 12.02.2021 г., п.п. 1.18.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ротхаммель К. Антенны. Том 1. / Кришке А. // Пер. с нем. – 11-е изд., исправ. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 256 с.
2. Семенов Н. А. Техническая электродинамика. Учебное пособие для вузов. – М.: Связь, 1973. – 480 с.
3. Каталог антенн RFSpin // Электрон. дан. Режим доступа URL: [https://sernia.ru/upload/pdf\\_files/katalog-antenn-rfspin.pdf](https://sernia.ru/upload/pdf_files/katalog-antenn-rfspin.pdf) (дата обращения 10.02.2021).
4. RFSpin // Обзор антенн двойной поляризации. Электрон. дан. Режим доступа URL: <http://rfspin.ru/info/obzor-antenn-dvoinoi-poliarizacii-id42> (дата обращения 10.02.2021).
5. RODE&SCHWARZ // R&S®HL024A1/S1 Antenna. Crossed Log-Periodic Antennas. Электрон. дан. Режим доступа URL: [https://www.rohde-schwarz.com/ru/product/hl024a1-s1-productstartpage\\_63493-9063.html](https://www.rohde-schwarz.com/ru/product/hl024a1-s1-productstartpage_63493-9063.html) (дата обращения 15.02.2021).
6. Направленная антенная система СВЧ диапазона 1-18 ГГц (с возможностью расширения до 40 ГГц) R&S®AC300. // Электрон. дан. Режим доступа URL: [https://radio.vilcom.ru/upload-files/antennye\\_ustroystva/izmeritelnye\\_antenny/rhode\\_schwarz/ac300/ac300\\_ti\\_ru.pdf](https://radio.vilcom.ru/upload-files/antennye_ustroystva/izmeritelnye_antenny/rhode_schwarz/ac300/ac300_ti_ru.pdf) (дата обращения 15.02.2021).
7. Фролов О. П. Антенны для земных станций спутниковой связи. – М.: Радио и связь, 2008. – 376 с.
8. Волхонская Е. В., Коротей Е. В., Власова К. В. Ср Подход к оценке взаимных сопротивлений вибраторов в конструкции логопериодической антенны двойной поляризации // IX Балтийский морской форум [Электронный ресурс]: материалы Международного морского форума. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2021. – Т. 4. – с. 158-164. № гос. рег.
9. Разработка электродинамических моделей облучателей больших зеркальных антенн в составе системы ГМССБ для исследования качества решения задач спутниковой радиосвязи и радионавигации [Текст]: отчет о НИР (заключит.): ФГБОУ ВО "КГТУ"; рук. Волхонская Е. В. – Калининград, 2021. – 76 с. – Исполн.: Коротей Е. В., Власова К. В. – 121120100137-7. – БГАРФ/2021-1.18/ГБ.
10. Дробкин А.Л., Зузенко В.Л. Антенно-фидерные устройства. – М.: Сов. радио, 1961. – 816 с.
11. Разработка электродинамических моделей облучателей больших зеркальных антенн в составе системы ГМССБ для исследования качества решения задач спутниковой радиосвязи и радио-

навигации [Текст]: отчет о НИР (промежуточ.): ФГБОУ ВО "КГТУ"; рук. Волхонская Е. В. – Калининград, 2019. – 63 с. – Исполн.: Коротей Е. В., Власова К. В. – АААА-А19-119110690079-6. – БГАРФ/2019-1.19/ГБ.

12. Волхонская Е. В., Коротей Е. В., Кужекин Д. В. Сравнительный анализ оценки поля излучения параболической зеркальной антенны апертурным методом и методом поверхностных токов // IV Балтийский морской форум [Электронный ресурс]: материалы Международного морского форума. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2016. – с. 401-407. № гос. рег. 0321603515.

## **LOGOPERIODIC IRRADIATOR OF LARGE MIRROR ANTENNAS FOR SIMULTANEOUS RECEPTION OF VERTICALLY AND HORIZONTALLY POLARIZED RADIO WAVES**

<sup>1</sup>Volkhonskaya Elena Vyacheslavovna, Grand PhD in Engineering sciences, the associate professor, the professor of department of ship radio engineering systems

<sup>2</sup>Korotey Evgeniy Vladimirovich, the associate professor of department of ship radio engineering systems

<sup>1,2</sup>Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia, e-mail: <sup>1</sup>volkhonskaya\_e@mail.ru; <sup>2</sup>eugeny\_korotey@mail.ru

*The results of model studies of the radiation characteristics of a single-mirror parabolic antenna with a printed log-periodic double-polarization irradiator operating in the C band are presents in this paper. It is shown that the main radiation characteristics vary within the operating frequency range by 1.2–2.6 % and only the beam width undergoes more noticeable changes of 9.4%. However, these changes are typical and do not indicate the disadvantages of the radiation field model described in the work. All the obtained values of the radiation characteristics correspond to the requirements imposed on them.*

УДК 621.391.019.3

## **ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ**

<sup>1</sup>Петров Сергей Васильевич, аспирант

<sup>2</sup>Пахотин Валерий Анатольевич, д-р физ.-мат. наук, профессор, профессор кафедры

<sup>3</sup>Власова Ксения Валерьевна, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры

<sup>1,2</sup>Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия,

e-mail: <sup>2</sup>VРakhotin@kantiana.ru

<sup>3</sup>Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия,

e-mail: <sup>3</sup>p\_ksenia@mail.ru

*Представлен анализ скорости передачи информации в современных системах связи. Рассмотрены возможности увеличения скорости передачи информации на основе амплитудно-частотной модуляции. Анализируются возможности систем связи, основанных на П-образных фильтрах, согласованных фильтрах, фильтрах максимального правдоподобия. Обсуждается вопрос о скорости передачи информации в системах связи с ортогональными несущими частотами. Анализируется возможность создания систем связи с неортогональными несущими частотами. Приведены результаты модельных расчетов, иллюстрирующих возможности увеличения скорости передачи информации в неортогональных системах связи.*

## Введение

Современные системы связи представляют собой сложные радиотехнические комплексы, предназначенные для решения задачи передачи больших потоков информации [1]. Однако потребности общества в области систем связи постоянно возрастают. В настоящее время наряду с обычными сообщениями возникает необходимость в передаче видеоизображений, в передаче динамических видеоизображений. Это видеоконференции, это дистанционное зондирование, дистанционное диагностирование, это связь с движущимися объектами. В этих условиях возникает проблема повышения эффективности существующих систем связи и разработка новых возможностей передачи информации. Основными направлениями решения указанной проблемы является освоение новых участков частотного диапазона, развитие методов сжатия информации, развитие методов модуляции, развитие методов многоскоростной обработки цифровых сигналов [2]. Однако эти возможности в определенной степени исчерпаны. Наиболее востребованные участки частотного диапазона часто бывают перегруженными. Возникает острый дефицит выделенных частотных полос. Повышение эффективности использования выделенных частотных полос является важной и востребованной задачей.

### Предельная скорость передачи информации

Основным ограничением в системах связи является теорема Шеннона о предельной скорости передачи информации. Предельная скорость передачи информации в одном канале определяется полосой частот  $\Delta f_0 = \frac{2}{T}$  ( $T$  – длительность сигнала) и отношением мощности сигнала  $P_c$  к мощности шума  $P_{ш} = \sigma^2$ .

$$\vartheta = \Delta f \ln_2 \left( 1 + \frac{P_c}{P_{ш}} \right) = \Delta f \ln_2 \left( 1 + \frac{U_c^2}{\sigma^2} \right). \quad (1)$$

Отношение  $\frac{P_c}{P_{ш}}$  определяет возможность кодирования за счет отношения сигнал/шум. Чем больше отношение сигнал/шум тем больше скорость передачи информации. Однако эта зависимость достаточно слабая - логарифмическая. По мере развития радиотехники стало ясно, что отношение мощностей должно быть заменено отношением энергии сигнала и шума. В этом случае выражение для формулы Шеннона будет иметь вид

$$\vartheta = \Delta f_0 \ln_2 \left( 1 + \frac{E_c}{E_{ш}} \right) = \Delta f_0 \ln_2 \left( 1 + \frac{U_c^2 T}{2\sigma^2 \tau_k} \right) = \Delta f_0 \ln_2 \left( 1 + \frac{U_c^2 N}{2\sigma^2} \right) \quad (2)$$

где  $T$  – длительность сигнала;

$\tau_k$  – интервал корреляции шума;

$N$  – количество некоррелированных отсчетов шума.

Выражение (2) для формулы Шеннона учитывает возможности фильтрации сигналов. Отношение сигнал/шум увеличивается в  $\sqrt{N}$  раз, логарифмически увеличивая скорость передачи информации. Однако можно выражение для формулы Шеннона представить в другом виде / Хартли/.

$$\vartheta = \Delta f_0 N_f \ln_2 (N_U N_\varphi), \quad (3)$$

где  $N_U, N_\varphi$  – количество независимых состояний сигнала по амплитуде и по фазе;

$N_f$  – количество частотных каналов в системе связи.

Выражение для теоремы Шеннона в виде (3) позволяет учитывать возможности амплитудно-фазо-частотной модуляции. Количество независимых состояний сигнала по фазе и амплитуде зависит от отношения сигнал шум. В настоящее время при оптимальной обработке сигналов дисперсия параметров оценивается выражением Рао-Крамера. Следовательно, можно оценить количество независимых состояний сигнала по амплитуде и по фазе выражениями

$$N_U = 1 + U_{max}/k1\Delta U \text{ и } N_\varphi = 180/k1\Delta\varphi, \quad (4)$$

где  $U_{max}$  – максимально допустимая амплитуда сигнала;

$\Delta U, \Delta\varphi$  –среднеквадратичные отклонения Рао-Крамера по амплитуде и фазе сигнала;

$k1$  – коэффициент, определяющий помехоустойчивость системы связи.

Чем меньше  $k1$ , тем меньше расстояние между сигналами с разными состояниями и тем меньше помехоустойчивость. Их этой оценки ясно, что при амплитудно-фазовой модуляции увеличение скорости передачи информации осуществляется за счет уменьшения помехоустойчивости.

Рассмотрим возможность увеличения скорости передачи информации при бинарной передаче (два состояния сигнала: 0 и 1). В этом случае в соответствии с теоремой Шеннона (3) скорость полностью определена разрешенной полосой пропускания.

$$\vartheta = \Delta f_0 N_f. \quad (5)$$

Такое выражение для скорости передачи информации справедливо при фильтрации канального сигнала из группового с помощью П-образных фильтров. В этом случае несущие частоты в соседних каналах связи отличаются на ширину канала  $\Delta f_0$ . В этом случае спектр сигнала оказывается ограниченным и на выходе П-образного фильтра форма сигнала искажается переходными процессами, длительность которых пропорциональна  $1/\Delta f_0$ . При этом возникает межсимвольная интерференция, уменьшающая помехоустойчивость систем связи. Для уменьшения межсимвольной интерференции, как правило, используют защитные интервалы, длительность которых достигает  $0.3 \div 0.5$  от длительности сигнала. При использовании оконных функций для исключения временных защитных интервалов, ширина спектральной линии увеличивается. Это снижает эффективность использования выделенной частотной полосы. Таким образом, при использовании в системах связи П-образных фильтров принципиально невозможно достичь предельную скорость передачи информации, определяемую теоремой Шеннона. В современных системах связи, работающих на основе П-образных фильтров, скорость передачи информации достигает  $0.7 \div 0.8$  от предельной скорости согласно Шеннону.

В настоящее время известны согласованные фильтры [1]. Их импульсная характеристика совпадает с формой сигнала при единичной амплитуде и нулевой начальной фазе. При их использовании в системах связи различие между несущими частотами в соседних каналах равно  $\Delta f_c = \frac{\Delta f_0}{2}$ . Сигналы в соседних каналах систем связи оказываются ортогональными ( $\Delta f_c = \frac{1}{T}$ ,  $T$  – длительность сигнала). Появляется возможность создания систем связи с ортогональными несущими частотами (OFDM). В каждом частотном канале связи в этом случае скорость передачи информации равна предельной скорости Шеннона. Однако количество каналов связи в разрешенной полосе частот удваивается. Скорость передачи информации в таких системах связи будет равно

$$\vartheta_c = \Delta f_0 N_c \ln_2(N_U N_\varphi) = \Delta f_0 (2N_f - 1) \ln_2(N_U N_\varphi), \quad (6)$$

где  $N_c = 2N_f - 1$ .

В работах БФУ им. И. Канта на основе положений теории оптимального приема разработаны фильтры максимального правдоподобия [3,4,5]. Их отличительной особенностью является возможность отфильтровывать канальные сигналы из группового сигнала при неортогональных несущих частотах. Введем коэффициент неортогональности, как отношение разности соседних несущих частот каналов связи для П-образных фильтров к разности соседних несущих частот при неортогональных системах связи  $k = \frac{\Delta f_0}{\Delta f_H}$ .  $k=2$  характеризует ортогональные системы связи.

В этом случае количество неортогональных каналов связи на выделенной частотной полосе будет

$$N_n = k(2N_f - 1) + 1. \quad (7)$$

Скорость передачи информации в неортогональных системах связи будет определено выражением

$$\vartheta_n = \Delta f_0 N_n \ln_2(N_U N_\varphi) = \Delta f_0 k((2N_f - 1) + 1) \ln_2(N_U N_\varphi). \quad (8)$$

Таким образом, одной из перспективных возможностей повышения эффективности систем связи является разработка неортогональных систем связи, основанных на фильтрах максимального правдоподобия. Коэффициент неортогональности может практически меняться в пределах  $k = 1 \div 10$ .

### Результаты модельных расчетов

Приведем результаты модельных расчетов, иллюстрирующих возможности увеличения скорости передачи информации в различных системах связи. На рисунке 1 показана частотная структура различных систем связи. На выделенной полосе частот размещаются два канала связи, работающих на основе П-образных фильтров. На этой же полосе частот размещаются три канала ортогональных систем связи согласно (6). На этой же полосе частот размещаются, при  $k = 5$ , пятнадцать неортогональных каналов связи, работающих на основе фильтров максимального правдоподобия. Следовательно, можно будет передать в 7.5 раза больше информации по сравнению с системами связи на основе П-образных фильтров.

На рисунке 2 показана статистика амплитуд и начальных фаз канальных сигналов после их фильтрации фильтрами максимального правдоподобия в неортогональных системах связи. Коэффициент неортогональности равен  $k=7$ . Длительность сигнала 1 мс, разнесение несущих частот в каналах 0.3 кГц, частотная полоса одного канала  $\Delta f_0 = 2$  кГц, отношение сигнал/шум равно 25 дБ. Рисунок иллюстрирует независимость оценок амплитуд и начальных фаз канальных сигналов. Задача фильтрации решена вполне удовлетворительно. СКО амплитуд и фаз иллюстрируют помехоустойчивость системы связи с неортогональными несущими частотами.



Рисунок 1. Частотная структура различных систем связи.

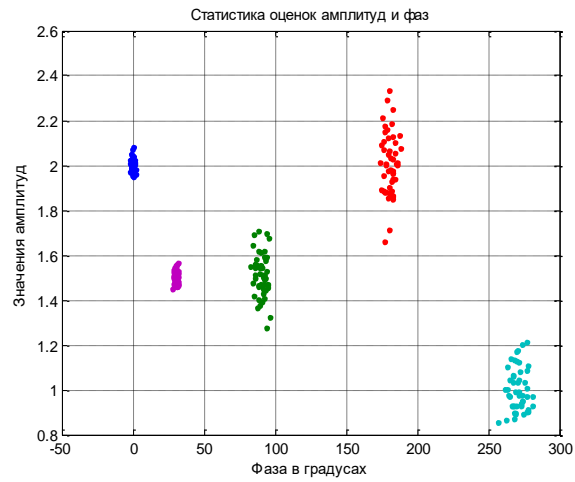


Рисунок 2. Статистика амплитуд и начальных фаз в пяти частотных каналах неортогональной системы связи.

На рис. 3 представлена зависимость скорости передачи информации в неортогональных системах связи относительно подобной скорости в системах связи, основанных на П-образных фильтрах в зависимости от коэффициента неортогональности. По горизонтали отложено отношение выделенной полосы частот к частотной ширине одного канала связи – количество каналов связи на основе П-образных фильтров.

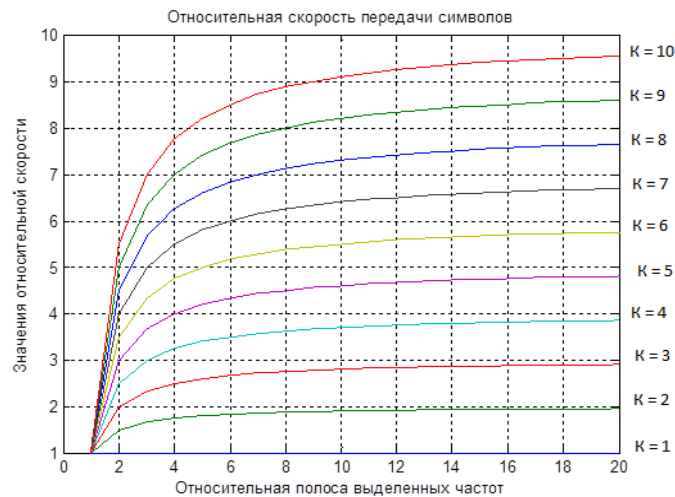


Рисунок 3. Зависимость относительной скорости передачи информации в неортогональных системах связи от относительной полосы выделенных частот при разных коэффициентах неортогональности.

### Основные результаты

В настоящей работе проведен анализ скорости передачи информации в системах связи, работающих на основе П-образных фильтров, на основе согласованных фильтров, на основе фильтров максимального правдоподобия. Основные результаты следующие.

1. Установлено, что теорема Шеннона о предельной скорости передачи информации определена для систем связи, работающих на основе П-образных фильтров. В результате межсимвольной интерференции эффективность систем связи, на основе П-образных фильтров составляет  $0.7 \div 0.9$  от предельной эффективности по Шеннону.

2. Показано, что в системах связи с ортогональными несущими частотами, основанных на согласованных фильтрах, скорость передачи информации увеличена  $\approx$  в 2 раза по сравнению с предельной скоростью согласно теореме Шеннона.



3. Показано, что в системах связи с неортогональными несущими частотами скорость передачи информации может быть увеличена в несколько раз в зависимости от коэффициента неортогональности.

4. Сделан вывод: системы связи с неортогональными несущими частотами являются перспективными системами связи при решении проблемы дефицита частотных полос.

### Литература

1. Радиотехнические системы: Учеб. пособие для вузов по специальности «Радиотехника» / Ю.П. Гришин, В.П. Ипатов, Ю.М. Казаринов и др.; под редакцией Ю.М. Казаринова. - М.: Высшая школа, 1990. - 496 с.

2. Чобану М. Многомерные многоскоростные системы обработки сигналов. Москва: Техносфера, 2009.-480 с.

3. Пахотин В.А., Петров С.В., Сергеев М.А., Алещенко Н.А. Потенциальные возможности неортогональных систем связи. В сб. Цифровая обработка сигналов и ее применение. DSPA-2022. Доклады на 24-й Международной конференции. Сер. «Цифровая обработка сигналов и ее применение». Москва.2022. С.130-134.

4. Петров С.В., Пахотин В.А., доц. Власова К.В., Молостова С.В., Бессонова Н.В. Потенциальные возможности фильтрации сигналов фильтрами максимального правдоподобия. В сб. Цифровая обработка сигналов и ее применение. DSPA-2021. Доклады на 23-й Международной конференции. Сер. «Цифровая обработка сигналов и ее применение». Москва.2021. С.32-35.

5. Петров С.В., Власова К.В., Пахотин В.А., Молостова С.В. Частотное уплотнение каналов в системах связи. В сб. Цифровая обработка сигналов и ее применение. DSPA-2019.С.228-232.

## PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF DIGITAL COMMUNICATION SYSTEMS

<sup>1</sup>Petrov Sergey Vasilievich, graduate student

<sup>2</sup>Pakhotin Valery Anatolyevich, D., F.-M.S., professor

<sup>3</sup>Vlasova Ksenia Valerievna, Ph.D., associate professor

<sup>1,2</sup>Federal State Educational Institution of Higher Education

"Immanuel Kant Baltic Federal University" Kaliningrad, Russia, e-mail: <sup>2</sup>VPakhotin@kantiana.ru

<sup>3</sup>Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia, e-mail: <sup>3</sup>p\_ksenia@mail.ru

*The analysis of the information transmission rate in modern communication systems is presented. The possibilities of increasing the speed of information transmission based on amplitude-frequency modulation are considered. The possibilities of communication systems based on U-shaped filters, matched filters, maximum likelihood filters are analyzed. The issue of information transmission rate in communication systems with orthogonal carrier frequencies is discussed. The possibility of creating communication systems with non-orthogonal carrier frequencies is analyzed. The results of model calculations illustrating the possibilities of increasing the speed of information transmission in non-orthogonal communication systems are presented.*

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ВЕКТОРА СОБЫТИЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ УГРОЗ В ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

<sup>1</sup>Подтопельный Владислав Владимирович, ст. преподаватель кафедры информационной безопасности

<sup>2</sup>Воробейкина Ирина Владимировна, ст. преподаватель кафедры информационной безопасности

<sup>1,2</sup>Институт цифровых технологий ФГБОУ ВО «КГТУ»,  
Калининград, Россия, e-mail: <sup>1</sup>ionpvt@mail.ru; <sup>2</sup>vorobeykina59@mail.ru

*Изучаются проблемы, возникающие при решении задач построения вектора признаков события информационной безопасности в корпоративной инфраструктуре. Приведены и охарактеризованы различные способы фиксации связей между вершинами вектора события, использование которых упрощает определение типа события безопасности, при условии, что само событие формируется из массива признаков других событий, которые не интерпретируются системными службами безопасности как опасные. Построение вектора события безопасности рассматривается как способ анализа состояния безопасности информационных систем. При построении вектора определяются особенности использования параметра времени и последовательности фиксации признаков событий как характеристики, указывающей наиболее вероятную интерпретацию событийного ряда при наличии посторонних событий. Предлагается использовать вектор применительно к топологии многоуровневой инфраструктуре организации. Рассматривается влияние дисперсии на вероятностные характеристики вектора.*

Для построения вектора событий безопасности в Российской Федерации применяются различные SIEM-системы (Ankey SIEM, MaxPatrol SIEM, RuSIEM, КОМРАД, СёрчИнформ SIEM). В данных системах при определении фактора проявления инцидента безопасности предполагается учитывать признаки событий на разных системах, поставляющих на сервер SIEM данные о событии [1]. Однако в большинстве подобных систем отсутствует явно описанная и применяемая методика анализа событий в их взаимосвязи, поскольку ранее трактуемые как безопасные события, в совокупности (при сопряжении данных разных сегментов, разных систем) могут указывать на действия нарушителя и даже характеризовать потенциал возможных нарушителей (уровень их квалификации, наличие средств атаки, а также предложено рассмотреть аспекты целеполагания нарушителей).

Современные SIEM-системы направлены на рассмотрение, сбор информации в распределенных информационных системах клиентско-серверной архитектуры, но при этом не исключается рассмотрение локальных систем (они не предполагают применение сетевых технологий для поддержки работоспособности системных и пользовательских компонентов).

Очевидно, что типы информационных систем и специфика поиска признаков инцидентов безопасности должны быть учтены при построении векторов распространения угроз. В современных SIEM векторы событий не подразумевают формальный учёт вероятностных показателей сопряжения фиксируемых в различных локациях признаков угроз. Соответственно, для более точного построения вектора событий, необходимо использовать формальными способы определения сопряженности различных событий, которые могут сигнализировать об атаке.

Гипотетический вектор событий должен учитывать возможность возникновения множества ветвлений (сопряжений), появление новой ветви событий безопасности. Соответственно, вектор, построенный с учетом факторов, изменяющих порядок построения событийной ветви (на это может повлиять множество факторов, в том числе, применение средств защиты), будет содержать определенное количество сегментов, описываемых как сопряжения событий, то есть ветви одного корневого дерева, с признаками проявления опасности, маркировка которых может зависеть как от выбора настроек администратором безопасности, так исходя из данных баз угроз [2]. Подобный способ

формирования вектора применим при аудите и при контроле в реальном режиме времени многосегментных систем, поскольку в этом случае будут учитываться все особенности используемых при обработке информации технологий, особенности средств защиты. Продление вектора или появление нового направления последовательно сопряженных событий, будет зависеть от меры успешности определения и степени важности (опасности) предшествующих событийных последовательностей. При осуществлении контроля над разделенными информационными системами (ИС), и, соответственно, при использовании процедур поиска признаков компрометации может проявиться проблема несогласованности или неправильности оценки и установки параметров событий безопасности, выбранных администратором, и баз данных угроз. Это затрудняет определение направления вектора атаки при множестве данных о состоянии безопасности.

Поскольку, многие параметры событий могут определяться как маркеры угроз только тогда, когда они используются совместно с другими маркерами, следует внести классификацию интерпретаций признаков (однозначно опасный, возможно опасной, неопасный), и их фиксацию воспроизводить как инициализацию множества событий (аналог сигнатур). В противном случае компрометирующий признак может указывать на простую ошибку. Соответственно, само выявление какого-либо сигнатурного признака в некоторых случаях не гарантирует того, что выстроенный порядок событий соответствует реалиям проявления угроз. Более того, повышается вероятность получения ошибочных интерпретаций событий безопасности при больших цепочках последовательно связанных событий, которые внутри могут иметь также событийные кластеры. Допустим, в векторе событий сегментов и уровней ИС признаки потенциально опасного событий следующие: запрос к службе аутентификации в нелегитимное время; множество запросов к службе аутентификации в ограниченный период времени, множество неправильных запросов (неверных логинов и паролей). Последний параметр нельзя отнести к явным признакам атаки, так как он зависит от человеческого фактора [4]. Более того, события безопасности в своей последовательности могут включать большой массив признаков легитимных событий по сравнению с однозначно маркирующим класс атаки признаками, (рис. 1). Стандартно к параметрам, которые однозначно (явно) маркируют событие безопасности можно отнести только то, что противоречит правилам политики безопасности:

Таким образом, среди событий безопасности, позволяющих создать событийное пространство, можно выделить три типа: явные, косвенные, легитимные (неопасные). Очевидно, что не все косвенные события можно игнорировать. Но при заданном рассмотрении в правилах всех косвенных событий вероятность неправильной интерпретации при определении присутствия угрозы будет увеличиваться. Поэтому необходимо построению вектора событий безопасности учитывать однозначно интерпретируемые события, которые должны быть в построение вектора использоваться либо как корневые, либо как узловы.

Чтобы снизить величину вероятности ложных регистраций событий безопасности в SIEM, требуется использовать формальные методы корректирования формируемый вектора событий [5]. Одним из способов построения вектора событий является использования теории рисков (графа компрометации) с учетом теории вероятностей. В данном графе посредством ребер обозначаются связи между событиями безопасности. Можно выделить типы узлов в графе построения вектора, который в итоге образует интерпретируемое множество по их признакам: корневой узел (А), узел-ветвление (Б), однозначно интерпретируемой как опасной событие - узел (усиление В), неоднозначно интерпретируемой как опасное событие – узел (ослабление Г) (рис.1). Граф предполагает ветвление в зависимости от наличия или отсутствия ослабления признака опасности [6].

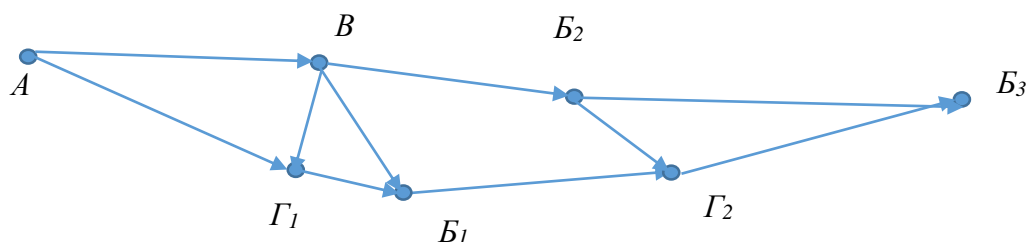


Рис. 1. Граф и ветвление

При работе корпоративных информационных систем (КИС) выделяются множества различных параллельно и последовательно связанных объектов. Векторы событий необходимо формировать при учете специфик сегментов подсистем, классифицируемых по их функциям. Выстраивается последовательность вероятностей подтверждения событий, ассоциированных с конкретными элементами КИС. Это позволит локализовать начала процесса развертывания инцидента безопасности места, или определить область нахождения причины сбоев [7]. Такой подход к формированию вектора событий предполагает использование переходов в логическом отображении сетевой инфраструктуре организации. Подход дает лишь с некоторой долей достоверности дает отобразить вектор событий с учетом всех особенностей, так как предполагается вычисление вероятностей переходов от одного узла к другому. Соответственно, требуется рассмотреть подходы, представляющие граф событий как набор этапов с возможной локализацией и учетов вероятностных показателей.

Для формирования вектора есть связанные между собой наборы фиксируемых признаков событий, которые составляют последовательности множеств с учетом времени фиксации признаков. Формируемый граф с учетом периодов времени и типов событий создается в контексте массива сходных событий, множеств событий. При этом в каждом случае предполагается различная скорость накопления признаков путем продвижения по переходам графа (его вершинами) при наименьшем количестве ослаблений связи между вершинами (чем меньше ослаблений, тем выше скорость накопления), что влияет на приоритет ветви вектора при определении специфики события, то есть наличия инцидента безопасности. Таким образом, важнейшим параметром в описании вектора является величина потенциальных ослаблений связей между событиями, как наборами признаков достижения некоего общего суммарного состояния компрометации, выраженного в виде ранее неактивного однозначно интерпретируемого признака атаки (набора признаков атаки). Описание этого признака нетривиальная задача. Допустим при анализе сканирования сетевых фиксации времени регистрации запроса к порту размещенному на сетевом интерфейсе резко осложняется неравномерной скоростью сканирования. В таб. 1 можно видеть различные варианты значений времени отклика сетевого интерфейса. Это может привести к тому, что система, регистрирующая события, зафиксирует разные подмножества событий сканирования (наборы запросов) как не связанные, что в итоге не позволит построить направленный граф, поскольку зависимости между этими множествами не будут очевидны. Соответственно, система не определит наличие сканирования (сетевой разведки). На временные показатели подмножеств событий могут влиять следующие факторы [5]:

- объем трафика в сети в период сканирования;
- пропускная способность сетевого трафика;
- алгоритм сканирования.

Таблица 1.

#### Результаты сканирования сетевого интерфейса

№ сканирования	число портов	1 скан.	2 скан.	3 скан.	4 скан.	5 скан.	6 скан.	7 скан.	8 скан.	9 скан.
1.	500	6,2	6,2	5,20	3,16	6,19	3,11	3,14	3,14	11,71
2.	750	9,20	8,61	8,60	8,0	7,81	7,69	7,82	4,10	8,60
3.	1000	33,71	11,89	9,49	11,11	11,12	9,49	35,37	21,80	35,25
4.	1500	14,23	16,53	16,75	34,12	14,21	16,52	49,80	45,27	40,45
5.	2000	18,32	90,1	41,9	37,5	71,8	13,2	74,1	84,42	59,74

Присутствует смешение параметров-признаков событий безопасности. Часть признаков с учетом фиксации последовательности их проявления или регистрации становятся паразитным набором данных. Если нет возможности разделить векторы последовательных событий (их множеств, признаковых пространств), может возникнуть ослабление связей между вершинами графа. Поэтому нужно считать наличие компрометирующего события как некую числовую сумму, которая возникает в результате сбора последовательно фиксируемых событий, как маркированных числовых параметров. Как только возникает предупреждение системы о возникновении такой суммы, необходимо прервать обсчет цепочки событий, и начинать ее (регистрацию событий) заново, воспринимая полученное агрегированное пространство последовательно связанных признаков событий как единое множество, и, соответственно, точку отчета новой цепочки, то есть вектора. Однако суммарный

его вес (его значение), должно быть скорректирован (уменьшено с помощью коэффициента значимости, веса), чтобы избежать дисбаланса значений в новых формируемых векторах.

Регистрируемые признаки событий ( $U$ ) можно представить, как случайную дискретную последовательность, длиной  $n$  отсчетов:

$$U = [u_1, u_2, u_3, \dots, u_n] \quad (1)$$

Их можно вероятностно описать с помощью многомерной плотности распределения вероятностей ( $a$ ):

$$a(u_1, u_2, \dots, u_n) = a(u_1) * a(u_2|u_1) \dots a(u_n|u_1, \dots, u_{n-1}) \quad (2)$$

Но очевидно, что все данные признаков в этом случае будут независимыми между собой, что в рамках поля фиксируемых признаков будет смешение ложных признаков и признаков отслеживаемой цепочки подозрительных событий.

Для выявления связи признаков событий безопасности при дальнейшем формировании вектора требуется условные распределения вероятности проявления некоего признака сделать зависимым только от ранее зафиксированного, то есть ближайшей вершины графа, которая связанной одной дугой со следующей, то есть зависимой вершиной:

$$a(u_3|u_1, u_2) = a(u_3|u_2) \quad (3)$$

$$\dots$$

$$a(u_n|u_1, \dots, u_{n-1}) = a(u_n|u_{n-1})$$

Затем необходимо типологически дифференцировать признаки событий и все случайные последовательности, которые соответствуют правилу, выраженному в марковской последовательности. можно выразить следующим образом [9]:

$$a(u_1, \dots, u_n) = a(u_1) \prod_{i=2}^n a(u_i|u_{i-1}), \quad u_i = u_{i-1} + \xi_i, \quad (4)$$

$$u_i = u_{i-1} + \xi_i, \quad (5)$$

где показатель  $u_{i-1}$  – предшествующие скомпрометированное состояние сетевого узла с фиксированным признаком атаки;  $\xi_i$  – случайное изменение как величина нормальной плотности распределения вероятностей с нулевым математическим ожиданием дисперсией  $\sigma_{\xi}^2$ .

Таким образом, вектор событий (набора зафиксированных признаков) можно совместить с системной топологией, чтобы получить последовательность и наиболее вероятную следующую вершину в массиве событий-вершин (комплексов признаков) с учетом веса переходов от одного локализованного состояния компрометации к другому.

Можно таким образом прогнозировать изменения вектора событий, и, соответственно, построить алгоритм ее реализации. Создаваемый вектор будет содержать вершины, фиксируемых признаков. Для коррекции возрастающей величины дисперсии при выявлении суммарно значительных цепочек событий (состоящих их последовательны фиксируемых признаков), на малых сравнительно малых по числу признаков не требуется дополнительных вычислений. Также находимо помнить о делении вектора на отдельные цепочки, которые потом, при начале новой цепочки воспринимаются как начальная вершина (фактически происходит свертка графа), что так же обуславливает снижение дисперсии (рис.2).

Соответственно, разброс величин (вероятностей отклонения вектора событий) будет незначителен. В системах глобального масштаба со множеством массивов событий расчет дисперсии будет оправдан. Для масштабных интернет-топологий с большим количеством узлов и, следовательно, событий требуется скорректировать величину дисперсии (используется авторегрессия 1-го порядка (нужно добавить случайную величину с дисперсией)).

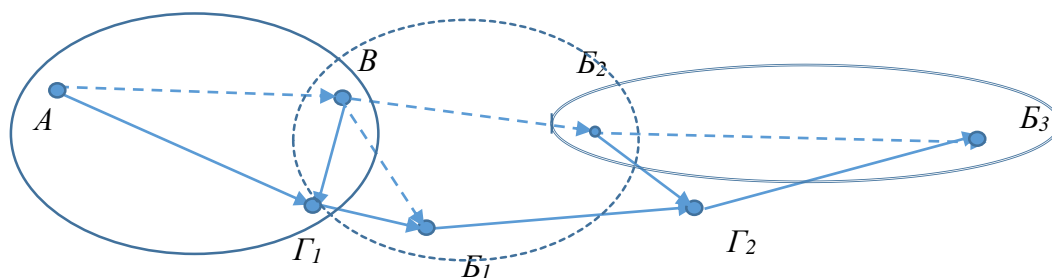


Рис. 2. Делении вектора на отдельные цепочки

Используя векторные марковские последовательности можно рассмотреть особенности построения векторов событий с учётом системной и компонентной организации инфраструктуры организации. Поскольку в такой инфраструктуре фиксируемое событие ассоциировано с компонентом информационной системы фактически всегда, предлагается, что сама информационная среда является топологической системой координат, в которой учитывается уровень VLAN (уровень агрегации сетевых пакетов, и возможность воздействия на целевые сетевые узлы), сетевые узлы, время фиксации события и отбора подозрительного признака, связанного с инцидентом безопасности, системные службы, системные компоненты операционных сред. Принципы формирования координатной плоскости могут быть разными. Предлагается построение цепочки событий от ядра инфраструктуры. При этом направление дуг графа может меняться, может быть направлено от ядра или к ядру инфраструктуры. Нужно понимать, что наименьшее время между двумя событиями означает наибольшую значимость связи эти событий (вес дуги), то есть между вершинами графа. Это позволяет рассмотреть время как аналог скорости распространения вектора событий. Вторым важным фактором, влияющим на значимость связи. Является специфичность признака события. Который выделяется специалистом безопасности. Наиболее приоритетный вектор будет определяться высокой скоростью распространения, то есть наименьшее количество времени затраченным на преодоления всех вершин графа событий.

Таким образом, формирование вектора предполагает использование связанных наборов регистрируемых признаков событий, которые составляют последовательности множеств с учетом времени фиксации признаков. Выстраиваемый граф с учетом временных отрезков, событий формируется в среде случайных и связанных событий. Однако при рассмотрении графа в каждом случае требуется учитывать скорость накопления признаков путем продвижения между вершинами графа. При этом требуется наличие ослабленных связей между вершинами, для того чтобы определить важность, приоритет ветви вектора. Тем самым, можно определить тип события, инцидент безопасности. Главным параметром, определяющим построение вектора, является наличие слабых связей между вершинами графа (означает значимость события для множества) как наборами признаков указывающих на компрометацию. Вектор событий (набора последовательно связанных зафиксированных признаков) для определения локальных характеристик инцидента можно наложить на топологию инфраструктуры контролируемого объекта. Это позволит получить прогноз последовательного фиксирования признаков, то есть наиболее вероятную следующую вершину в во множестве вершин (комплексов признаков). При этом требуется учитывать вес переходов от одного локализованного признака к другому. Это позволяет прогнозировать изменения направления дуг в графе, тем самым, контролируется актуальное построение вектора. Влияние возрастающей величины дисперсии при определении значительных по величине весов последовательностей событий (состоящих их последовательно фиксируемых признаков) можно не учитывать при работе с современными инфраструктурами, поскольку их топология не предполагает значительного количества узлов (в такой инфраструктуре фиксируемое событие ассоциировано с компонентом информационной системы), за исключением Интернет-инфраструктур.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методика оценки угроз безопасности информации Методический документ ФСТЭК России: утв. ФСТЭК России 5 февраля 2021 г.

2. Р 56546-2015 Национальный стандарт российской федерации. Защита информации. Уязвимости информационных систем. Классификация уязвимостей информационных систем. М.: Стандартинформ, 2018 г.
3. Горбачев И.Е., Глухов А.П. Моделирование процессов нарушения информационной безопасности критической инфраструктуры // Труды СПИИРАН. – Москва, 2015. – Вып. 1(38). – С. 112 – 135.
4. Котенко И. В. Многоагентные технологии анализа уязвимостей и обнаружения вторжений в компьютерных сетях // Новости искусственного интеллекта. – Москва, 2004. – № 1. – С. 56–72.
5. Щеглов А.Ю. «Защита компьютерной информации от несанкционированного доступа». - СПб.: Наука и Техника, 2004. - 384 с.
6. Галатенко В.А. Управление рисками: обзор потребительных подходов (часть 2) // Jet Info, №12 [Электронный ресурс], 2018 г.
7. Астахов А. Введение в аудит информационной безопасности [Доклад] // GlobalTrust Solutions [Электронный ресурс]. 2018. – URL: <http://globaltrust.ru> (дата обращения: 29.01.2018).
8. Аверченков В.И., Рытов М.Ю., Гайнулин Т.Р Оптимизация выбора состава средств инженерно-технической защиты информации на основе модели Клементса–Хоффмана // Вестник Брянского государственного технического университета. – Брянск, 2008 г. - № 1(17). Марковские процессы в дискретном времени: [сайт]. URL: <https://proproprogs.ru/dsp/markovskie-processy-v-diskretnom-vremeni>

## **PECULIARITIES OF FORMATION OF THE SECURITY EVENT VECTOR WHEN DETERMINING THREATS IN INFORMATION SYSTEMS**

<sup>1</sup>Podtopelny Vladislav Vladimirovich, art. lecturer, information security department

<sup>2</sup>Vorobeikina Irina Vladimirovna, art. lecturer, information security department

<sup>1,2</sup>Institute of Digital Technologies, FSBEI HE "KSTU",  
Kaliningrad, Russia, e-mail: <sup>1</sup>ionpvv@mail.ru; <sup>2</sup>ionpvv@mail.ru

*The problems that arise when solving the problems of constructing a vector of signs of information security co-existence in a corporate infrastructure are studied. Various ways of fixing connections between the vertices of the event vector are presented and characterized, the use of which simplifies the determination of the type of security event, provided that the event itself is formed from an array of signs of other events that are not interpreted by the system security services as dangerous. Building a security event vector is considered as a way to analyze the security status of information systems. When constructing the vector, the features of using the time parameter and the sequence of fixing the signs of events are determined as a characteristic indicating the most probable interpretation of the event series in the presence of extraneous events. It is proposed to use the vector in relation to the topology of the organization's multi-level infrastructure. The influence of dispersion on the probabilistic characteristics of the vector is considered.*

## ОПТИМАЛЬНЫЙ ПРИЁМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ ВБЛИЗИ СИНГУЛЯРНОГО МАКСИМУМА РЕШЕНИЙ УРАВНЕНИЙ ПРАВДОПОДОБИЯ

<sup>1</sup>Симонов Р.В., аспирант

<sup>2</sup>Пахотин Валерий Анатольевич, д-р физ.-мат. наук, профессор, профессор кафедры

<sup>3</sup>Власова Ксения Валерьевна, канд. физ.-мат. наук, доцент

<sup>1,2</sup>Балтийский Федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

<sup>3</sup>Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

*Рассмотрено решение задач статистической радиотехники при приёме двух ультразвуковых сигналов в области их высокой корреляции. Проанализированы возможности оценивания параметров и обнаружения сигнала вблизи сингулярного максимума решений уравнений правдоподобия. Предложен критерий определения рабочей области, в которой возможно раздельное оценивание параметров и обнаружение сигналов на основе минимума преобразованного функционала правдоподобия.*

Применение технологии оценивания параметров сигнала на основе преобразованного функционала правдоподобия позволяет получать решения задач статистической радиотехники при высокой корреляции принятых сигналов, однако сближение оценочных значений параметров ограничивает область, в которой такое решение возможно. Оно приводит к возникновению сингулярного максимума на поверхностях решения уравнений правдоподобия. В связи с этим, важным является вопрос о том, насколько близко к максимуму может быть получено решение.

Рассмотрим решение задач статистической радиотехники на примере сигнала, содержащего два импульса, различающихся временем задержки на малую, по сравнению с их длительностью, величину. Такая ситуация часто наблюдается при многолучевом распространении ультразвука. Пусть принятое сообщение содержит два сигнала, и аддитивный гауссов шум. Его можно представить выражением:

$$\hat{y}(t) = \hat{U}_1 m(t - t_1) e^{i\omega(t-t_1)} + \hat{U}_2 m(t - t_2) e^{i\omega(t-t_2)} + \hat{U}_w(t). \quad (1)$$

Огибающая импульсов  $m(t)$  соответствует модели ультразвукового импульса. Сигнал характеризуется временами приёма импульсов  $t_1, t_2$ , и комплексными амплитудами  $\hat{U}_1, \hat{U}_2$ . Параметры сигнала неизвестны, но постоянны на интервале обработки. Амплитуды сигналов могут быть оценены на основе уравнений правдоподобия [3]. Решения уравнений приводят к следующим выражениям для оценочных амплитуд принятых сигналов:

$$\hat{U}'_1(t'_1, t'_2) = \frac{\int_T \hat{y}(t) m(t - t'_1) e^{-i\omega(t-t'_1)} dt - \hat{R}^* \int_T \hat{y}(t) m(t - t'_2) e^{-i\omega(t-t'_2)} dt}{E(1 - |\hat{R}|^2)}, \quad (2)$$

$$\hat{U}'_2(t'_1, t'_2) = \frac{\int_T \hat{y}(t) m(t - t'_2) e^{-i\omega(t-t'_2)} dt - \hat{R}^* \int_T \hat{y}(t) m(t - t'_1) e^{-i\omega(t-t'_1)} dt}{E(1 - |\hat{R}|^2)}.$$



$E = \sum_N m^2(t)$  - эквивалентная длительность сигнала. Штрихами будем обозначать оценочные

значения параметров.  $\hat{R}$  - комплексный коэффициент корреляции сигналов.

Если разность времени приёма импульсов больше, или равна длительности импульса, коэффициент корреляции близок к нулю. Полагая  $\hat{R} = 0$  для первого и второго сигналов в (2), можно перейти к корреляционным интегралам на основе которых, как правило, решается задача обнаружения сигнала. Например, для первого сигнала получим:

$$\hat{U}'_1(t'_1) = \frac{1}{E} \int_T \hat{y}(t) m(t - t'_1) e^{-i\omega_1(t-t'_1)} dt. \quad (3)$$

Это выражение является выходной функцией оптимального приёмника, получаемой для функции правдоподобия, содержащей один модельный ультразвуковой сигнал. Решение, получаемое на основе данного выражения, широко рассматривается в литературе [1, 2]. Оценочные значения времени приёма и амплитуды сигнала соответствуют максимуму выходной функции. Решение задачи обнаружения сигнала может быть получено на основе критерия Неймана-Пирсона [1]. Пороговый уровень в данном случае можно вычислить по формуле:

$$h = \sqrt{-D_{\hat{U}} \log(P_f)}. \quad (4)$$

Его значение определяется только отношением сигнал/шум и вероятностью ложной тревоги. Здесь  $D_{\hat{U}}$  - дисперсия амплитуды сигнала, рассчитываемая согласно формуле Рао-Крамера [3]:

$$D_{\hat{U}} = \frac{\sigma^2 \tau_k}{E}. \quad (5)$$

Задача разрешения сигналов, при использовании выражения (3), решается на основе функции неопределённости [2, 3]. В качестве критерия, ограничивающего область разрешения сигналов, используется критерий Рэлея.

Если же времена приёма сигналов различаются на малую, по сравнению с их длительностью, величину, что часто наблюдается при многолучевом распространении ультразвука, коэффициент корреляции близок к единице, и для оценивания амплитуды используются выражения (2). Однако, непосредственное применение выражений (2) в литературе практически не рассматривается. Их функциональная зависимость от  $t'_1, t'_2$  имеет сингулярный максимум в точке  $t'_1 = t'_2$ , что соответствует  $|\hat{R}| = 1$ , а соответственно, не может быть использована в качестве критерия отбора решений.

Однако, в данном качестве может быть использована поверхность преобразованного функционала правдоподобия [1]. Учитывая выражения (1, 2), запишем:

$$\Delta(t'_1, t'_2) = \int_T |\hat{y}(t)|^2 dt - \int_T \hat{y}^*(t) \hat{U}'_1 m(t - t'_1) e^{i\omega(t-t'_1)} dt - \int_T \hat{y}^*(t) \hat{U}'_2 m(t - t'_2) e^{i\omega(t-t'_2)} dt. \quad (6)$$

Функционал включает оценочные значения амплитуд  $\hat{U}'_1$  и  $\hat{U}'_2$ , рассчитываемые на основе (2). Преобразованный функционал правдоподобия имеет единственный минимум, соответствующий параметрам двух сигналов, и позволяет независимо оценить их. В данном случае, решения задачи разрешения сигналов не требуется, а соответственно, отсутствует и ограничение, связанное с критерием Рэлея.

Решение задачи обнаружения сигнала осуществляется путём сравнения модулей оценочных значений амплитуд с пороговым уровнем. Если значение модуля комплексной амплитуды сигнала  $|\hat{U}'_1| > h$ , принимается решение о наличии сигнала. Пороговый уровень соответствует (4), однако

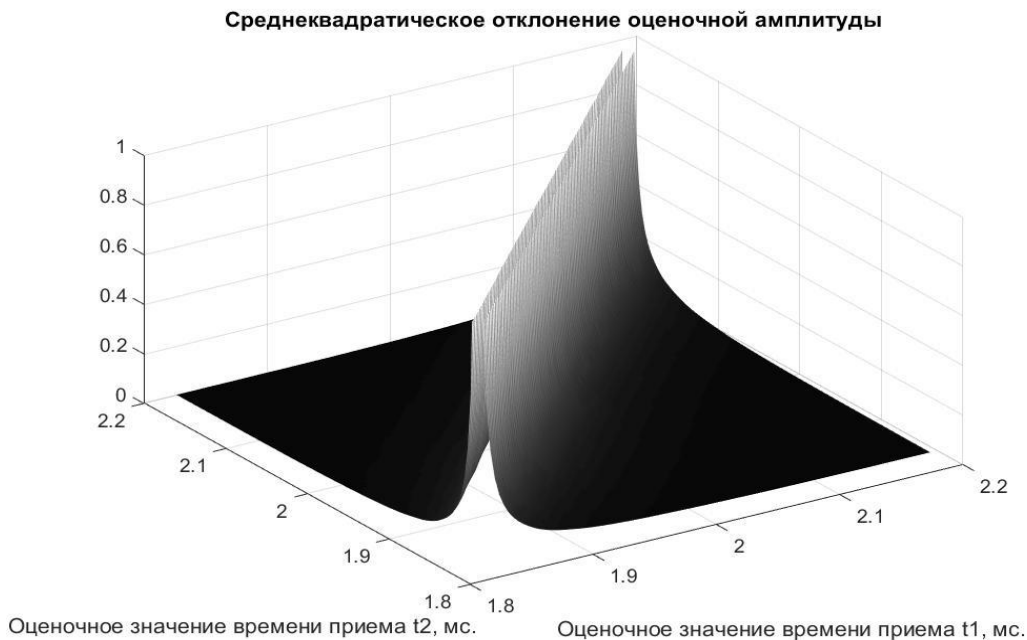
дисперсия оценочной амплитуды, входящая в это выражение, становится зависящей от коэффициента корреляции:

$$D_{\hat{U}_k} = \frac{\sigma^2 \tau_k}{E\left(1 - |\hat{R}|^2\right)}. \tag{7}$$

В области высокой корреляции принятых сигналов ( $R > 0.9$ ), дисперсия оценочных значений амплитуды существенно возрастает, а, следовательно, изменяются и плотности распределения оценочных значений амплитуды, получаемые при наличии и отсутствии сигнала. Это приводит к тому, что пороговый уровень возрастает при сближении параметров сигнала и увеличении коэффициента корреляции. С учётом зависимости дисперсии амплитуды от коэффициента корреляции, выражение для определения порогового уровня запишется в виде:

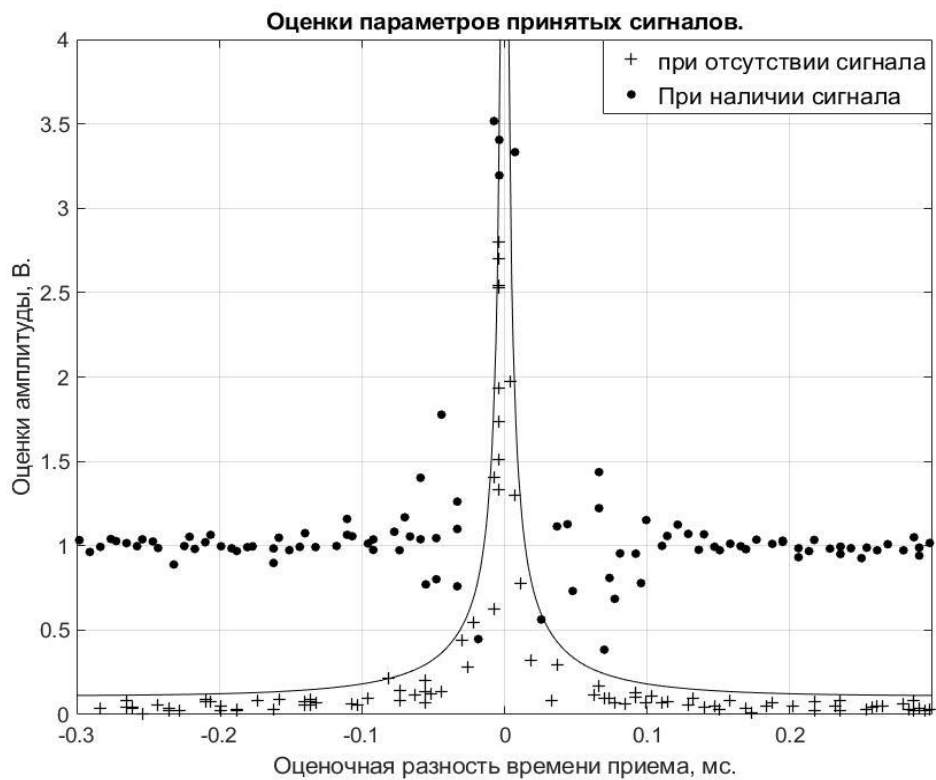
$$h = \sqrt{-\frac{\sigma^2 \tau_k}{E\left(1 - |\hat{R}|^2\right)} \log(P_f)}. \tag{8}$$

Проиллюстрируем решение задачи обнаружения сигнала с применением (8) модельным исследованием. Согласно модели, формируется принятое сообщение, содержащее два ультразвуковых импульса, в соответствии с выражением (1). На рисунке 1 показано, как возрастает дисперсия амплитуды при сближении оценочных значений времени приёма. Оценка амплитуды  $\hat{U}'_1$  получена в соответствии с (2) для 100 различных реализаций.

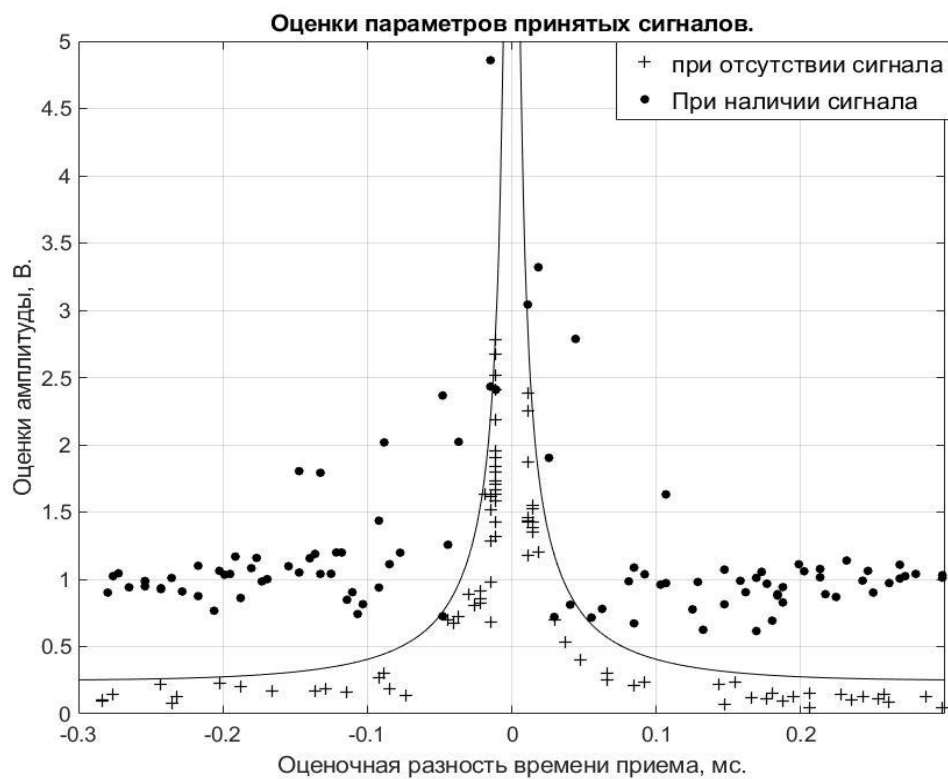


*Рисунок 1. Зависимость СКО амплитуды от времени приёма.*

В ходе моделирования, временной интервал между импульсами постепенно сокращается. Установлена вероятность ложной тревоги  $P_f = 0.001$ . Получено 100 оценочных значений разности времён приёма сигналов, и их амплитуд. Модельное исследование проведено при двух отношений сигнал/шум: 20 дБ. и 6 дБ. Время приёма первого сигнала составляет 2 мс. Время приёма второго изменяется от 1.7 до 2.3 мс. Длительность сигнала составляет 0.688 мс. На рисунке по оси абсцисс отложена разность оценочных значений времени приёма сигналов. Показаны оценочные значения амплитуды сигнала при наличии и отсутствии сигнала в принятом сообщении. Отмечается увеличение порогового уровня при сближении сигналов, согласно выражению (8).



*Рисунок 2. Оценки параметров при скорректированном пороговом уровне. Отношение сигнал/шум 20 дБ.*



*Рисунок 3. Оценки параметров при скорректированном пороговом уровне. Отношение сигнал/шум 6 дБ.*

Возможности обнаружения сигнала при оценке амплитуды на основе преобразованного функционала правдоподобия ограничиваются повышением вероятности пропуска цели при сближении параметров сигналов. Отмечается, что при сближении параметров, дисперсия оценочных значений амплитуды значительно возрастает. При разности времен приёма менее 50 мкс. существенная часть оценочных значений амплитуды оказывается ниже порога. Таким образом, возрастающая при сближении параметров сигналов, вероятность пропуска цели, определяет рабочую область при обработке принятого сигнала на основе преобразованного функционала правдоподобия. Существует также возможность корректировки значений оценочных амплитуд сигнала, позволяющая сохранить значение порогового уровня постоянным, и не зависящим от времени приёма. Однако, сложность заключается в том, что значение оцениваемого модуля комплексной амплитуды сигнала характеризуется распределением Рэлея-Райса. Дисперсия и математическое ожидание амплитуды определяются выражениями:

$$\sigma^2_U = D_{\hat{U}_k} + \left| \hat{U}_1 \right|^2 - \frac{\pi D_{\hat{U}_k}}{4} L_{1/2}^2 \left( -\frac{\left| \hat{U}_1 \right|^2}{D_{\hat{U}_k}} \right), \quad M_U = \sqrt{D_{\hat{U}_k} \pi / 4} L_{1/2} \left( -\frac{\left| \hat{U}_1 \right|^2}{D_{\hat{U}_k}} \right). \quad (9)$$

Здесь  $I_n(x)$  - модифицированные функции Бесселя.

Эти выражения зависят от истинного значения амплитуды сигнала, что не позволяет оценить их по одной принятой реализации. При отсутствии сигнала распределение Рэлея-Райса переходит в распределение Рэлея:

$$\sigma_{U_k} = (2 - \pi / 2) \sqrt{D_{\hat{U}_k}}, \quad M_U = \sqrt{D_{\hat{U}_k} \pi / 4}. \quad (10)$$

Математическое ожидание и дисперсия становятся зависящими только от дисперсии шума. Это позволяет скорректировать амплитуды при отсутствии сигнала таким образом, чтобы вероятность превышения порогового уровня оставалась заданной во всём диапазоне значений коэффициента корреляции:

$$U_1 = \left| \hat{U}'_1 \right| / \sqrt{1 - \left| \hat{R} \right|^2}. \quad (11)$$

На рисунках 4 и 5 показаны результаты моделирования, полученные с учётом выражения (11). Параметры модельного исследования совпадают с приведёнными выше.

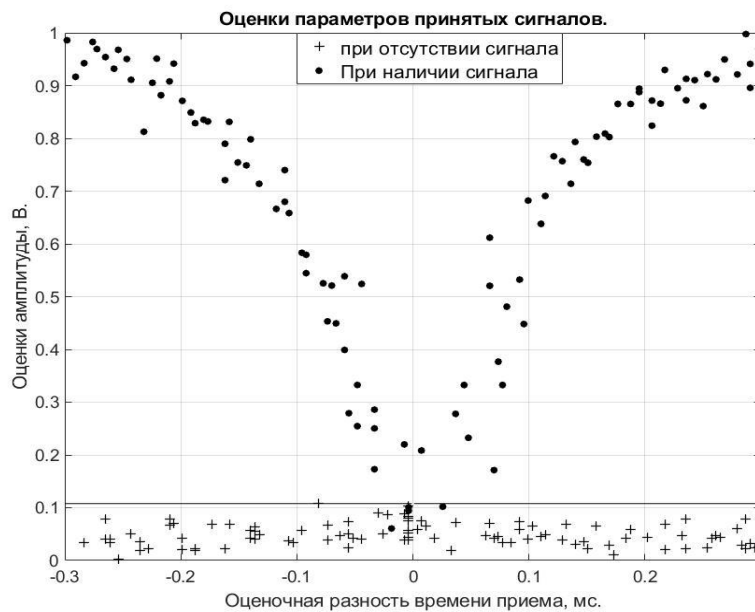


Рисунок 4. Оценки параметров при скорректированной амплитуде сигнала. Отношение сигнал/шум 20 дБ.

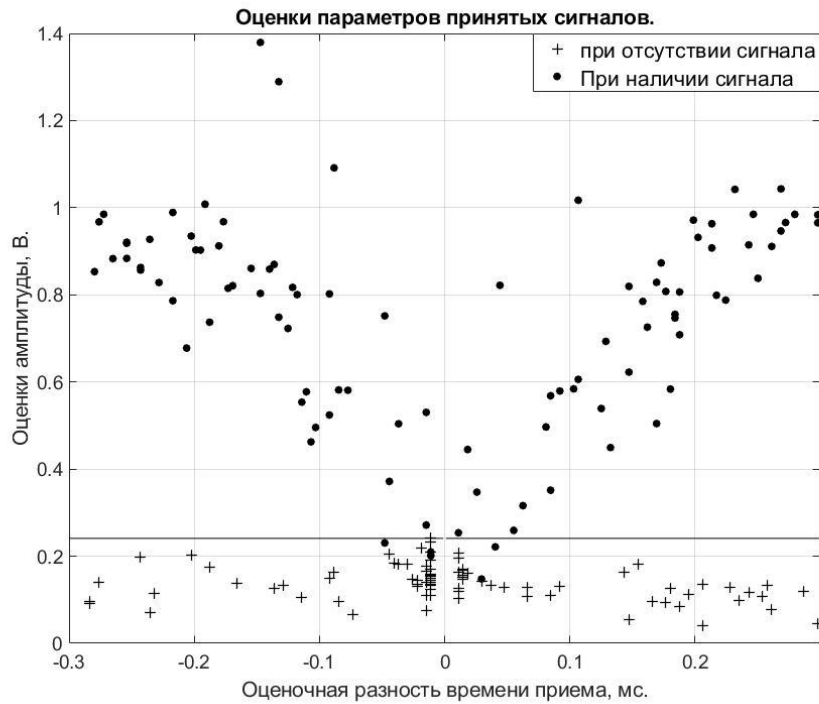


Рисунок 5. Оценки параметров при скорректированной амплитуде сигнала. Отношение сигнал/шум 6 дБ.

Можно заметить, что оценочные значения амплитуды в области высокой корреляции при наличии сигнала оказываются занижены. Это объясняется различием плотностей распределения амплитуды при наличии и отсутствии сигнала. При коэффициентах корреляции, близких к единице, наблюдаются значения амплитуды на уровне шума, что соответствует высокой вероятности ошибки. Это определяет границы области, в которой возможно совместное обнаружение двух коррелированных сигналов. Сопоставление рисунков 4 и 5 показывает, что возможность обнаружения двух сигналов в значительной степени зависит от отношения сигнал/шум.

Отмечается, что дисперсия полученного значения амплитуды при отсутствии сигнала остаётся постоянной во всём интервале коэффициентов корреляции, обеспечивая сохранение заданной вероятности ложной тревоги. Можно отметить также, что оценочные значения времени приёма при отсутствии сигнала, с высокой вероятностью имеют близкие значения, что видно на рисунке. Это объясняется тем, что при коэффициенте корреляции, равном единице, выражения (6,7) имеют точку разрыва второго рода. Малые изменения сигнала вблизи этой точки приводят к значительным изменениям функциональных зависимостей.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Перов А. И. Статистическая теория радиотехнических систем. - М.: Радиотехника, 2003. - с. 70-76, 83-94, 158-177.
2. Хелстром К., Статистическая теория обнаружения сигналов. – М.: Иностранная литература, 1963. – 432 с
3. Пахотин В.А. Теоретические основы оптимальной обработки сигналов. - издательство РГУ им. И. Канта. – 2008. – 164 с.

# OPTIMAL RECEPTION OF ULTRASONIC SIGNALS NEAR THE SINGULAR MAXIMUM OF THE SOLUTIONS OF LIKELIHOOD EQUATIONS

<sup>1</sup>Simonov R. V., graduate student

<sup>2</sup>Pakhotin Valery Anatolyevich, D., F.-M.S., professor

<sup>3</sup>Vlasova Ksenia Valerievna, Ph.D., associate professor

<sup>1,2</sup>Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

<sup>3</sup>Baltic fishing fleet state academy, Kaliningrad, Russia

*The article describes the solution of statistical radiotechnics problems in case of reception of two ultrasonic signals in the area of high correlation. Possibility of signal parameters estimation and signal detection near the singular maximum of solutions of likelihood equations was investigated. The criterion of working area, in which the separate detection and estimation of signal parameters using the transformed likelihood functional is possible, was proposed.*

УДК 519.876.5:681.883.7

## РАССМОТРЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ДАННЫХ ОТ ИМИТАТОРА ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ С РЕАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ ЭХОГРАММ

<sup>1</sup>Холоденин Дмитрий Вячеславович, ст. преподаватель

<sup>2</sup>Кузьмин Леонид Леонидович, ст. преподаватель

<sup>1,2</sup>Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ», Калининград, Россия, e-mail: <sup>1</sup>bffsa.rtf.srts.kdv@gmail.com; <sup>2</sup>44culon65@mail.ru

*Рассматривается возможность графической системы моделирования и программирования LabView совмещать сгенерированные данные, которые формируются имитатором гидроакустических сигналов, с реальными данными эхограмм, полученные от гидроакустической аппаратуры судна. Возрастающая необходимость внедрять в учебный процесс дистанционные и программные интерактивные средства обучения подчеркивает актуальность программного моделирования функциональных свойств радиотехнических систем и имитации процессов, протекающих в них.*

Компьютерная обработка данных позволяет гибко решать разного рода технические задачи. Большая часть современной аппаратуры, в том числе гидроакустической, использует оцифрованную информацию, а не аналоговую. Подбирая параметры дискретизации и квантования, можно обеспечить необходимый уровень точности получаемых результатов обработки исходной информации. Также цифровые технологии позволили вывести математическое моделирование процессов на более доступный и наглядный уровень. Например, применение графической системы моделирования и программирования LabView фирмы National Instruments позволяет, не углубляясь в синтаксис функций и команд программирования, создавать виртуальные приборы или даже полноценные программы математических моделей не только с наглядным внешним графическим интерфейсом, так называемой «лицевой панелью», но и с наглядными алгоритмами, «Блок-Диаграммами» (Block Diagram), составляемыми на графическом языке программирования «G» LabView. Данная программа применялась авторами для имитации процесса отображения гидроакустической информации, как сгенерированной непосредственно с помощью построенных математических моделей на языке «G», так и полученной из файлов эхограмм (сонограмм) записанных в реальных условиях судовой гидроакустической аппаратурой [1; 2; 3; 4; 5].

В последнем случае исходная информация представляет собой последовательность телеграмм, передаваемая по проводному интерфейсу от прибора приема-излучения сигналов к ПЭВМ, где данная последовательность записывается по байтам в файлы, для конкретности называемые файлами эхограмм. В зависимости от модели гидроакустического прибора создаются файлы определенного разработчиками формата и расширения. Например, файлы эхограмм с расширением «\*.rgt» и «\*.lft» записываются с помощью гидролокатора бокового обзора (ГБО) «Мезоскан-М», файлы с расширением «\*.smr» записываются комплексом «ПЭВ-К» (Панорамный эхолот - видеоплоттер), а файлы с расширением «\*.ek5» научно-исследовательским эхолотом Simrad EK-500 [1; 3; 6]. Формат и структура бинарных файлов, перечисленных приборов, частично рассматривается в работах [3; 5; 7], а также в более ранних трудах. Информация о структурах файлов не полная, поскольку собиралась по доступным открытым источникам и технической документации. В зависимости от формата в эхограммах могут сохраняться навигационные и гидрологические данные, такие как скорость и координаты судна, глубина, дата и время записи, диапазон, длительность импульса и т.п. Но во всех форматах есть общее: в них содержится информация, необходимая для построения изображения эхограммы (рисунок 1, рисунок 2) – значения выборок эхо-сигналов, т.е. значения интенсивностей отраженных гидроакустических импульсов.

Для генерации «Модельной эхограммы», т.е. для моделирования информационного поля сигналов и построения по нему эхограммы, использовался материал из источника [8], в котором рассмотрены вопросы проектирования гидроакустических каналов приборов различного назначения (рыбопромысловых эхолотов и гидролокаторов, приборов контроля орудий лова, приборов связи и т. д.). В указанном источнике представлен математический аппарат для расчета параметров гидроакустических каналов, а также конструктивных элементов и электроакустических характеристик гидроакустических антенн. Далее по тексту кратко описывается принцип генерации «модельного сигнала».

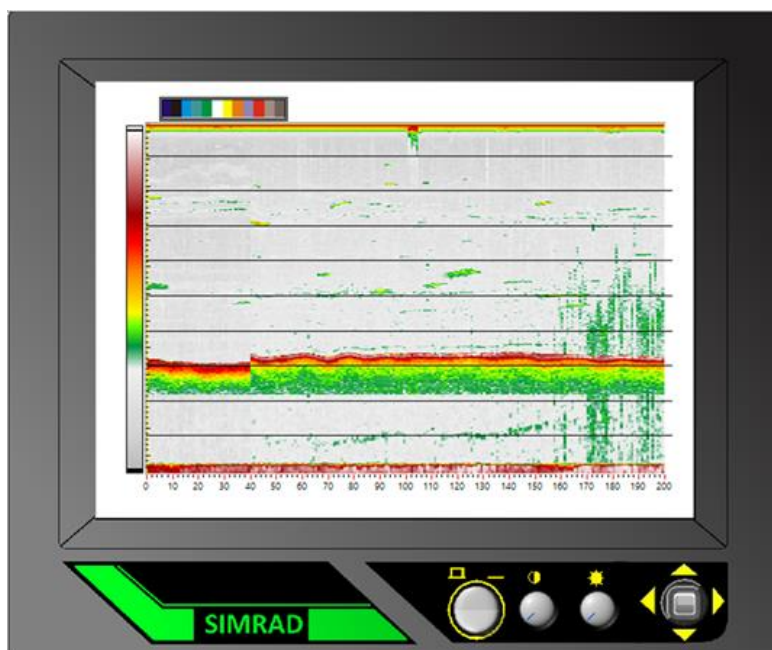


Рис. 1. Лицевая панель имитатора эхолота EK500 с отображением эхограммы

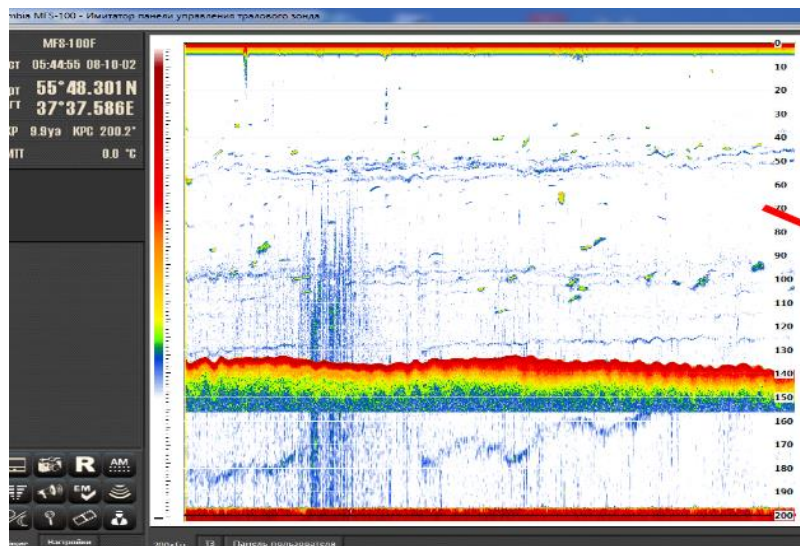


Рис. 2. Лицевая панель имитатора тралового комплекса с отображением эхограммы

## Разработка блок-диаграммы формирователя «Модельной эхограммы»

### 1.1 Моделирование сигнала от сосредоточенной цели

Виртуальная модель эхолота формирует эхограмму в виде двумерного массива, строка которого содержит информацию об одной посылке. Длина строки (количество ячеек массива) определяется отношением установленного диапазоном эхограммы к разрешающей способности по дальности, которая в свою очередь определяется длительностью импульса посылки. Каждая строка содержит информацию обо всех целях в пределах выбранного диапазона: сосредоточенных (одиночных рыб или косяков малого размера), протяженных скоплений и дна. Каждый из перечисленных типов целей формируется в виде отдельного массива, затем все массивы объединяются в один путем сложения.

При моделировании развертки по вертикали расстояние до сосредоточенной цели (положение по глубине) определяется количеством ячеек массива от его начала до верхней границы цели, протяженность цели – количеством ячеек, соответствующим длительности отраженного сигнала, а интенсивность записи (например, цвет) – числовыми значениями, записанными в эти ячейки. На протяжении всей развертки можно смоделировать необходимое количество таких сосредоточенных целей.

Сигнал от таких целей позволяет сформировать генератор одиночного прямоугольного импульса, изображенный на рисунке 3. Генератор имеет 4 входа, это параметры, которые можно задавать перед моделированием, что является главным преимуществом данного инструмента. Этим и был обусловлен выбор данного устройства из «подпалитры» инструментов-функций LabView «генерация сигналов».

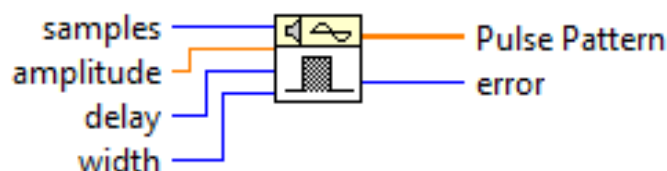


Рис. 3. Внешний вид терминала генератора импульсов

Рассмотрим каждый вход отдельно.

Вход «Samples» (выборка) – определяет количество точек сигнала в выходном массиве. Забегая вперед, для объединения массивов они должны быть одной размерности. Например, при заданном диапазоне 300 м и разрешении 0,33 м (при длительности импульса 0,5 мс) объем одномерного массива должен быть 900 ячеек (подбирается в зависимости от разрешающей способности имитируемого режима работы гидроакустического устройства или под параметры реальной эхограммы).



Вход «Amplitude» (амплитуда) – устанавливает распределение амплитуды сигнала по глубине в каждой посылке. На графике интенсивности амплитуда будет влиять на цвет точек цели (значение интенсивностей эхо-выборки).

Вход «delay» (задержка) – определяет отстояние от поверхности т.е. индекс первого элемента, имеющего высокий уровень. На графике интенсивности и на графике осциллограммы ширина будет влиять на отстояние от начала координат, иными словами, на глубину.

Вход «width» (ширина) – устанавливает количество отсчетов, для которых уровень сигнала будет высоким.

Следует заметить, что сумма значений задержки и ширины не должна превышать количество отсчетов в выборке.

## 1.2 Моделирование сигнала от рассредоточенной цели

Сигнал, отражённый от рассредоточенного скопления, отличается от сигнала от сосредоточенной цели. Он имеет существенные колебания по амплитуде, характерную дискретность по глубине, медленные колебания отстояния верхней кромки по глубине и большую протяженность по времени (горизонтальную протяженность). Поэтому была применена другая схема моделирования.

Для модуляции амплитуды цели был использован инструмент «simulate arbitrary signal» (генератор заданного сигнала). Вид кривой на рисунке 4 был задан произвольно, видно, что присутствуют минимумы и максимумы концентрации отдельных и локальных целей. Инструмент нарисовал сигнал по заданным 11 точкам.

На блок-диаграмме инструмент имеет вид, изображенный на рисунке 5. На выходе данного виртуального инструмента LabVIEW автоматический создал преобразователь динамической информации в двумерный массив для дальнейшей работы с устройством.

Полученный сигнал использован для модуляции коротких импульсов со случайным положением от начала координат, которые имитируют сигнал от отдельных рыб. Для модуляции полученного сигнала использовался инструмент «Random number» (генератор случайных чисел). Это генератор случайных чисел от 0 до 1, изображенный на рисунке 6.

Для выполнения модулирования на всем протяжении рассредоточенного сигнала, данный генератор был помещен в цикл с фиксированным числом итераций. Число итераций задает максимальное вертикальное развитие (толщину) скопления. Для имитации сигнала от рассредоточенной цели созданная ранее форма сигнала объединяется с последовательностью случайных чисел с выхода цикла посредством функции умножения, которая выполняет имитацию модулирования этого сигнала.

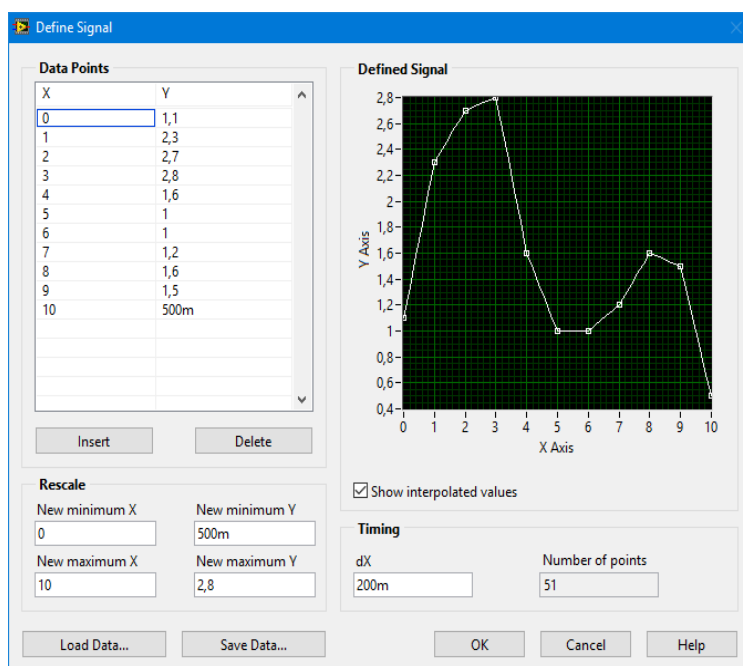


Рис. 4. Панель настройки «simulate arbitrary signal»

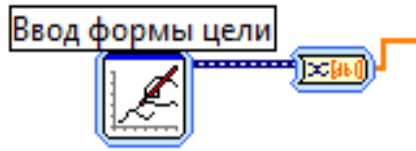


Рис. 5. «simulate arbitrary signal» на блок-диаграмме

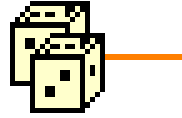


Рис. 6. Генератор случайных чисел

Моделирование рассредоточенной цели выполняется алгоритмом представленным на рисунке 7. Контроль полученных результатов представлен на графике осциллограммы (рисунок 8). Скриншот статичен и потому не может отобразить ход выполнения программы и модуляции сигнала в реальном времени. Но при работе программы результат моделирования соответствует адекватной модели.

### 1.3 Моделирование сигнала от грунта

При моделировании был задействован генератор одиночного прямоугольного импульса. Сигнал от грунта, как правило, превышает по амплитуде сигналы от остальных целей. Поэтому амплитуда сигнала от грунта устанавливается с превышением амплитуды от сосредоточенной цели более чем в пять раз (можно варьировать по определенной закономерности или случайным образом). Итоговый результат моделирования сигнала от грунта изображен на рисунке 9.

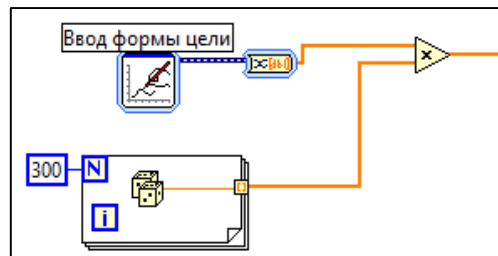


Рис. 7. Моделирование рассредоточенной цели

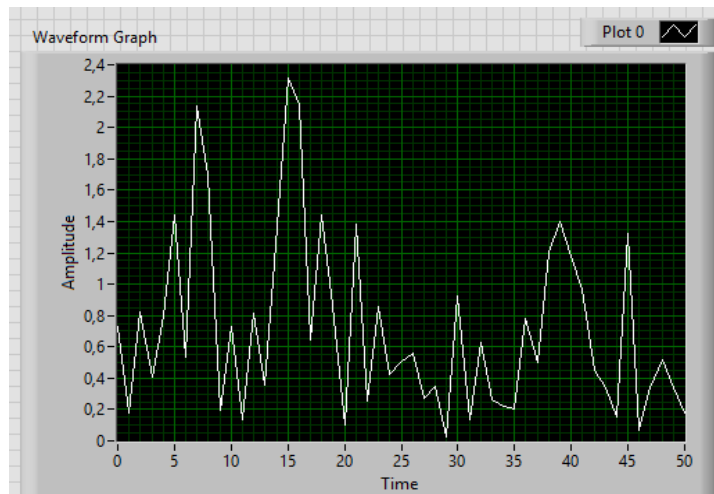


Рис. 8. Результат моделирования рассредоточенной цели

На входы генератора поданы следующие постоянные значения:

Объем массива 50 ячеек;

Амплитуда сигнала 60 ячеек;

Смещение от начала координат 0 ячеек;

Ширина сигнала 40 ячеек.

Параметры подбираются в зависимости от разрешающей способности имитируемого режима работы гидроакустического устройства или под параметры реальной эхограммы, с которой впоследствии будет осуществляться совмещение имитированных данных «Модельной эхограммы».

Закон убывания сигнала, отраженного от грунта, близок к экспоненциальному, т.к. в самом грунте затухание происходит по аналогичному закону. Для реализации закона изменения в программе использовалась структура «Formula node» (формула). Чтобы иметь возможность управлять скоростью убывания экспоненты, необходимо в ее показатель ввести регулирующий множитель  $i$ , задаваемый со счетчика итераций. Затем, используя функцию умножения, вводится закон убывания по экспоненте в прямоугольный сигнал.

Грунт имеет неравномерную структуру по глубине. Чтобы это показать, необходимо ввести модуляцию по глубине. Для такой протяженной цели как морское дно будет целесообразно использовать сигнал заданной формы, амплитуды и частоты. Из инструментария LabVIEW для этой задачи подойдет прибор «simulate arbitrary signal» (сигнал произвольной формы).

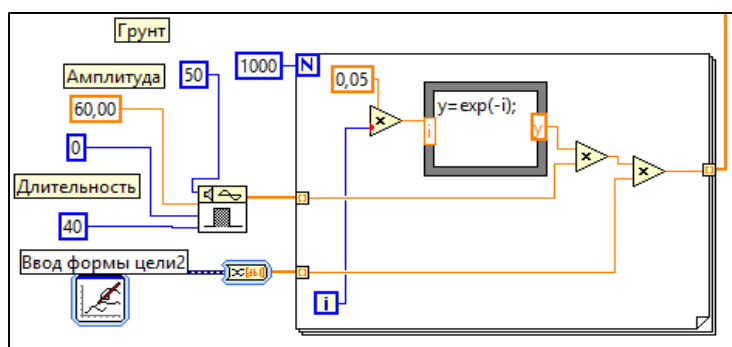


Рис. 9. Моделирование сигнала от грунта

Настраивается он по аналогии с рассредоточенной целью. В данном случае при настройке задается сигнал по 10 точкам с произвольно заданными в них значениями. Максимальный разброс амплитуды равен 1. Панель настройки устройства изображена на рисунке 10. Полученный результат приведен на графике осциллограммы на рисунке 11.

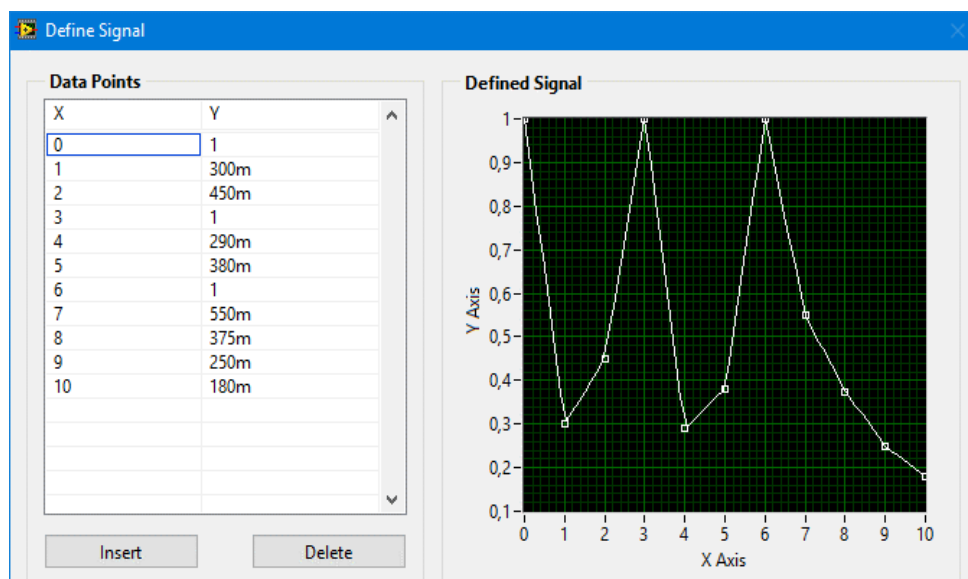


Рис. 10. Панель настройки модулирующего сигнала

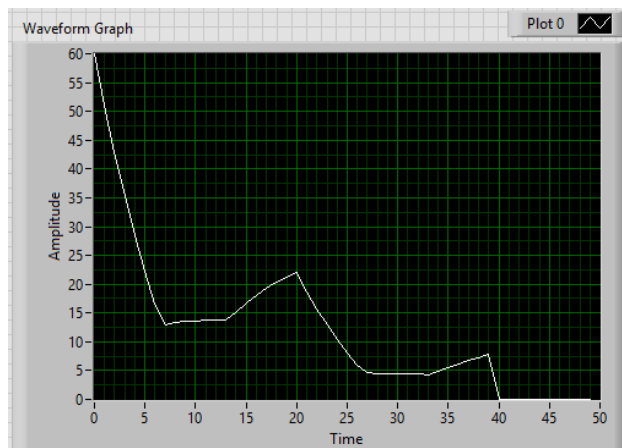


Рис. 11. Результат моделирования сигнала от грунта

#### 1.4 Моделирование шумов

Инструментарий LabVIEW очень разнообразен и имеет в своей библиотеке множество стандартных генераторов шума. Для моделирования используется генератор белого шума Гаусса, так как он является наиболее распространённым видом шума, используемым для расчёта и моделирования систем радиосвязи. Белый шум Гаусса характеризуется равномерной, то есть одинаковой на всех частотах, спектральной плотностью мощности, нормально распределёнными временными значениями и аддитивным способом воздействия на сигнал. Внешний вид генератора представлен на рисунке 12.

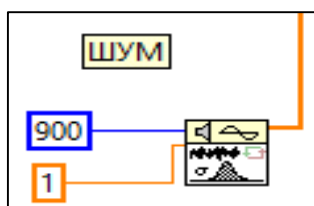


Рис. 12. Генератор белого шума Гаусса

Как и в генераторе одиночного импульса, присутствует вход «Samples» (выборка) – его значение принимается равным 900, т.к. генератор необходимо будет включить в ранее созданный массив такой же размерности. По умолчанию параметр отклонения равняется единице, изменяться это значение не будет. На выходе формируется псевдослучайная последовательность с нормальным распределением и заданным стандартным отклонением (рисунок 13).

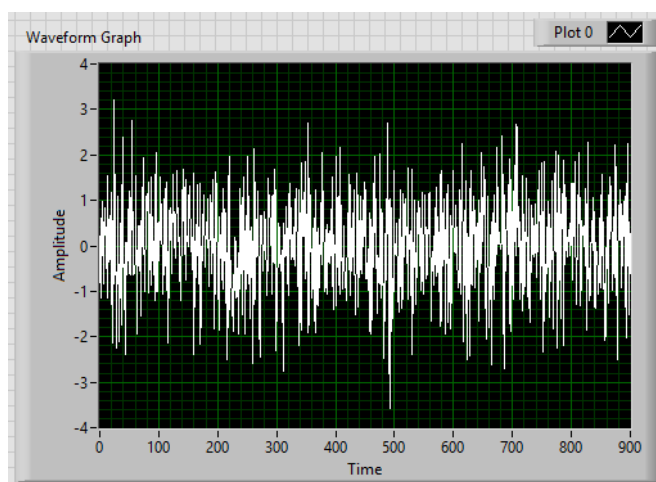


Рис. 13. Результат моделирования шумов

### 1.5 Объединение всех целей в один массив

Раннее смоделированные цели необходимо объединить в одно информационное поле.

В основе алгоритма объединения используется инструмент «Initialize array» (инициализация массива), который создает массив с необходимым количеством ячеек и записывает в каждую из них любое значение. По умолчанию принимается 0, т.к. именно в этот массив будут записаны уже созданные ранее цели. Количество ячеек задается равным 900, так как объединяемые массивы должны быть одной размерности. Внешний вид инструмента приведен на рисунке 14.

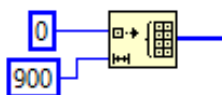


Рис. 14. Инструмент «Initialize array»

Запись в данный массив производится с помощью инструмента «Replace Array Subset» (заменить элементы массива), изображенный на рисунке 15.

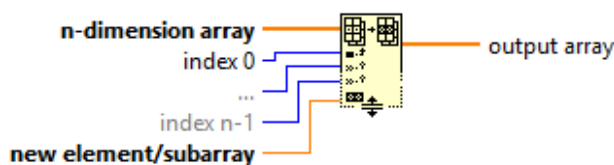


Рис. 15. Инструмент «Replace Array Subset»

Блок-диаграмма имитатора, формирующего двумерный массив данных информационного поля целей, изображена на рисунке 16.

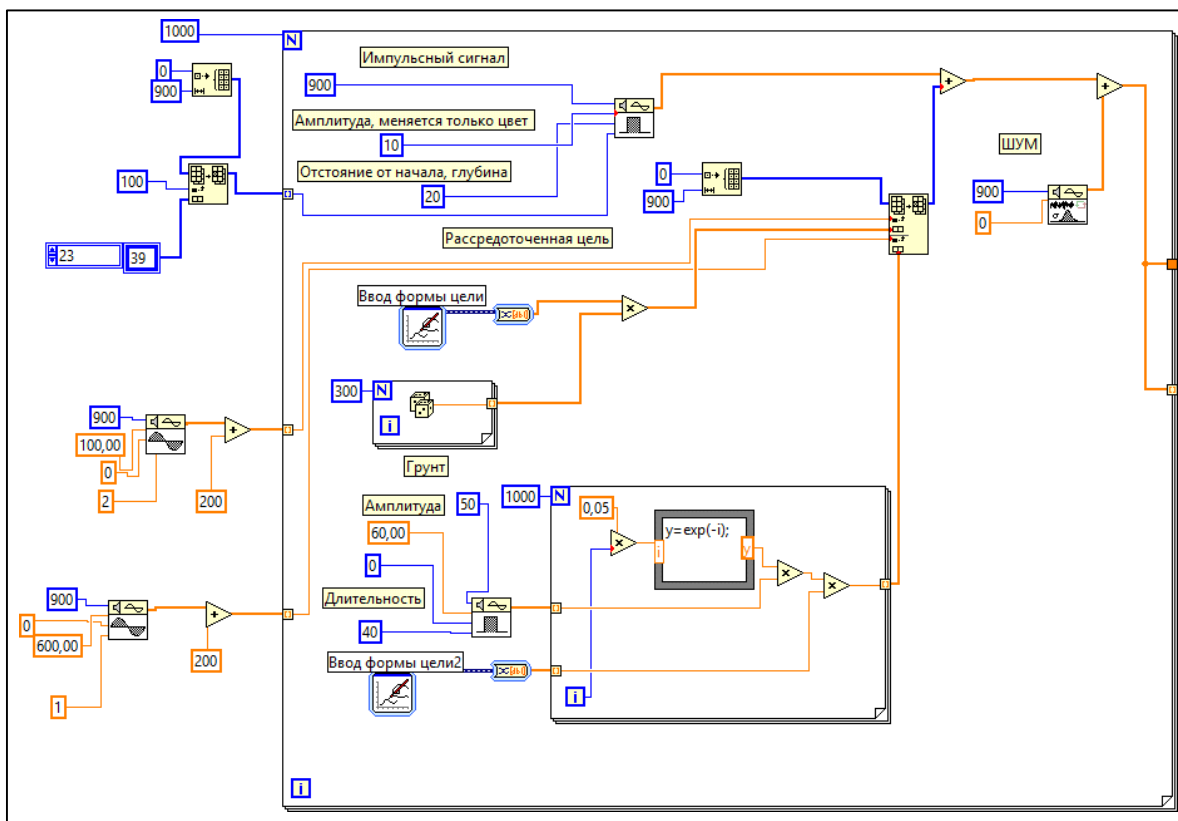


Рис. 16. Блок-диаграмма имитатора сигналов «Модельной эхограммы»

На вход «n-dimension array» подается массив, в который необходимо записать информацию от подключаемого элемента «Initialize array». Входы «index» будут управлять изменением отстоянием от начала координат. На входы «new element/subarray» подается информация, которую необходимо записать. На указанные входы подключаются приведенные ранее алгоритмы формирования сигналов рассредоточенной цели и отраженного от грунта. Полученное информационное поле целей необходимо подсоединить к устройству (элементу) отображения как показано на рисунке 18.

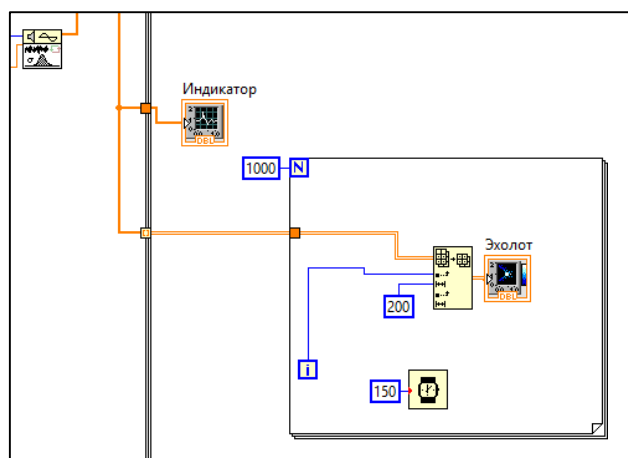


Рис. 18. Блок-диаграмма имитатора устройства отображения информации

Для наглядного отображения полученного результата имитации используется график интенсивности, показанный на рисунке 19. Для того, чтобы отобразить каждую из 900 посылок, необходимо поместить график интенсивности в цикл с фиксированным числом итераций. Число итераций выставляем равным основному циклу, то есть 1000. Запустив на выполнение программу с подключенными в единый алгоритм моделями, на индикатор «Эхолот» будет выводиться сгенерированная имитатором эхограмма.

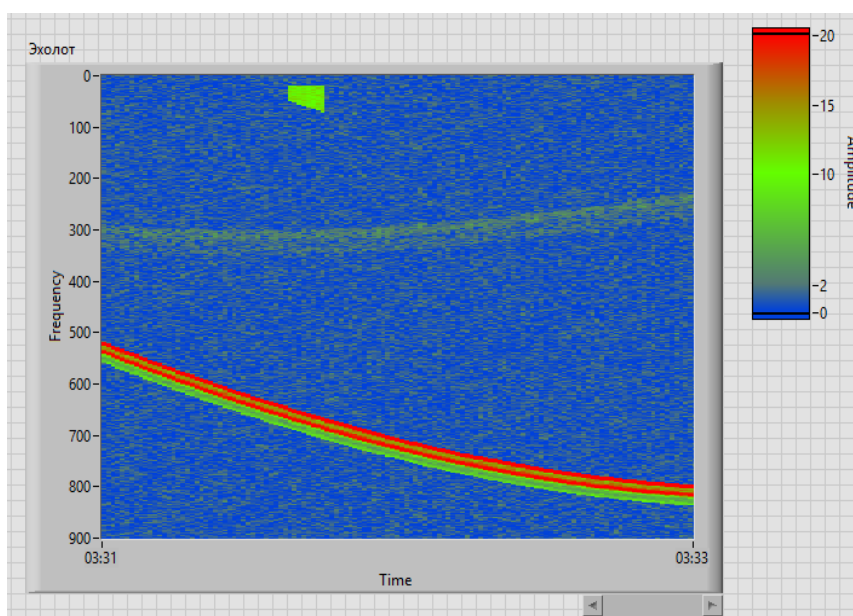


Рис. 19. Лицевая панель с отображением результата моделирования работы имитатора

Для корректного отображения каждой посылки используется элемент «Array Subset» (подмножество массива), который возвращает часть массива заданного количества элементов. На его вход подключаем счетчик итераций, а количество элементов, вычисленное эмпирическим путем, выставляем равным 200. Для уменьшения скорости перелистывания посылок устанавливается внутри массива инструмент «wait», на вход которого подается задержка 150 мс, как показано на рисунке 18.

При генерации «Модельного сигнала» и при работе с реальными исходными данными формируется массив интенсивностей отраженных сигналов. Если согласовать параметры таких массивов, то можно на реальной эхограмме формировать искусственные цели, или корректировать профиль дна.

Ниже на схеме приведен алгоритм воспроизведения реальной эхограммы (рисунок 20). В элементе «Массив 1» хранится копия значений интенсивностей посылок полученной из файла реальной эхограммы [2; 3; 4; 5]. Этот массив представляет собой матрицу (рисунок 21) значений интенсивностей сигналов, отраженных от объектов в толще воды и принятых гидроакустической антенной. Каждый пиксель, изображенный в эхограммах на рисунках 1 и 2 это один отраженный эхосигнал.

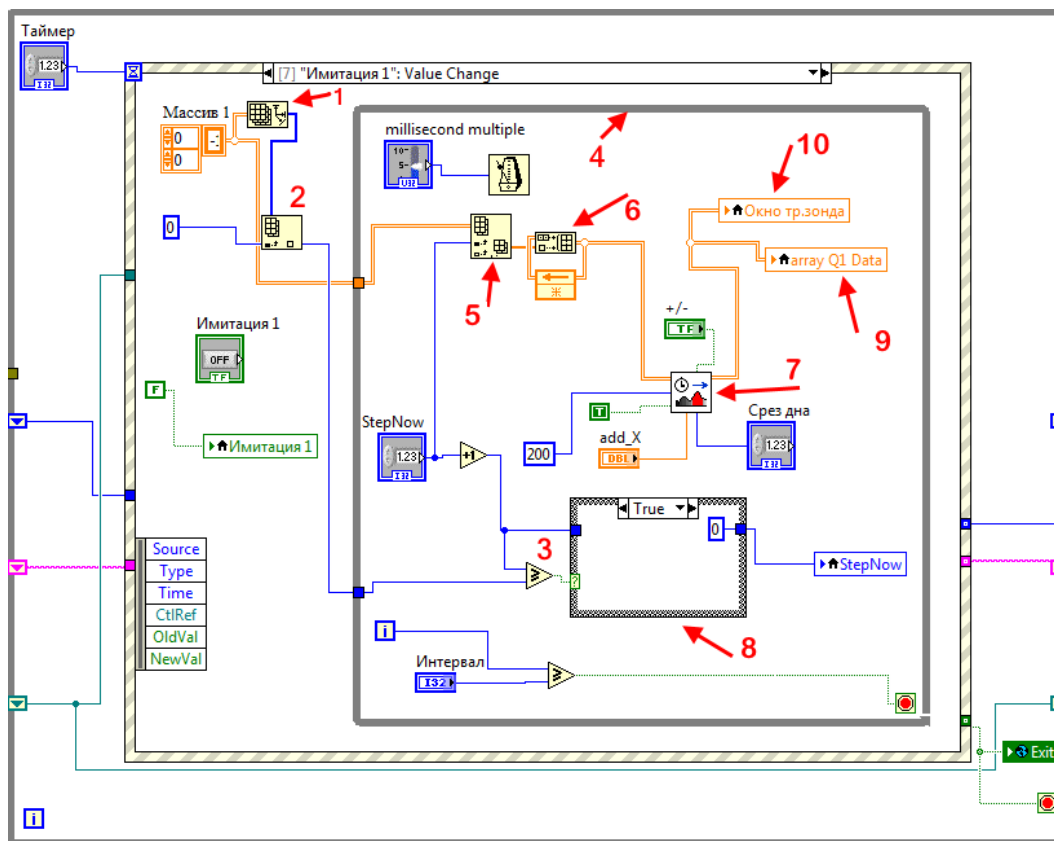


Рис. 20. Блок-диаграмма воспроизведения реальной эхограммы

0	4,915	11,35	13,75	13,96	14,15	14,15	13,81	11,05	5,444	1,646	-53,3	-55,1
0	4,915	11,35	13,75	13,96	14,15	14,15	13,81	11,05	5,444	1,646	-53,0	-55,3
	4,927	11,37	13,76	13,96	14,15	14,15	13,81	11,05	5,444	1,646	-52,8	-54,1
	4,915	11,35	13,74	13,94	14,11	14,11	13,76	11,00	5,397	1,599	-52,7	-54,5
	4,927	11,35	13,75	13,95	14,14	14,14	13,80	11,02	5,409	1,610	-53,3	-55,1
	4,915	11,35	13,75	13,96	14,15	14,15	13,81	11,04	5,432	1,634	-53,0	-52,7
	4,915	11,35	13,75	13,95	14,14	14,14	13,80	11,04	5,432	1,634	-52,9	-53,3
	4,915	11,35	13,75	13,96	14,15	14,15	13,81	11,04	5,432	1,634	-52,8	-53,7

Рис. 21. Блок константы массива данных реальной эхограммы

Функциональный элемент «Array Size», на схеме он обозначен стрелкой под цифрой 1, определяет размер массива по одной из размерности. В данном случае он определяет количество столбцов двумерного массива, то есть, другими словами, он определяет протяженность эхограмм. Если знать скорость судна и частоту повторения посылок импульсов, то можно примерно определить толщину просканированного вертикального слоя в метрах. В данном случае была взята уже изученная эхограмма, о которой известны технические данные, поэтому толщина слоя заранее известна и



составляет примерно 0,3 метра. Если же взять один пиксель эхограммы и пересчитать его реальные размеры, то размеры его составляют 0,5 метр высотой и 0,3 метра толщиной (протяженностью). Так как изображение можно сжимать и растягивать, то соответственно нужно менять коэффициент пересчета в реальный размер. В прототипе тралового комплекса для данного имитатора (рисунок 20) эхограмма выводится на экран по временным меткам, но так как на данном этапе разработки имитатора технические данные не обрабатывались, то пересчет в реальный масштаб не выполнялся. В будущем, в следующих работах, данную функцию можно будет добавить.

Далее по алгоритму имитации (рисунок 20) следует элемент под номером 2 – «Index Array». Он выдает значение из массива, соответствующий индексу, значение которого подается на поле ввода. Функция используется для выделения строки или столбца из двумерного массива. В данном случае на него подается массив, состоящий из двух ячеек – количества столбцов эхограммы (протяженность) и количество пикселей в одном столбце. То есть, другими словами, ширина и высота эхограммы. На выходе элемента 2 получается число, соответствующее количеству протяженности эхограммы, которое потом попадает внутрь условного цикла на элемент сравнения под номером 3. Этот элемент сравнивает значения от элемента 2 и от элемента «StepNow» (текущий шаг). В результате сравнения на выходе элемента 3 выдается логический сигнал «Истина» или «Ложь». Значение «Истина» появляется при условии достижения предела протяженности эхограммы. Далее цикл (номер 4 на блок-диаграмме, рисунок 20) перезапускается, тогда эхограмма начинает воспроизводиться заново.

Элемент под номером 5 считывает из «массива1» одну вертикальную посылку, которая в элементе 6 складывается в новый массив новой эхограммы, которая в свою очередь воспроизводится на экране в элементе под номером 10. Элемент 7 делает обрезку посылок эхограммы, для выполнения функции обрезки дна, аналогичной реальной функции в эхолотах и траловых зондах «белая линия». Элемент 8 обнуляет шаги итераций условного цикла 4, если количество шагов достигло предела протяженности эхограммы. Элемент 9 индикатор, в виде таблицы, в который выводятся численные значения интенсивностей эхограммы. Этот элемент аналогичен «массиву 1» и может использоваться для сохранения в память программы имитатора аналогичные потоки данных из реальных файлов совмещенных со сформированными имитатором данными при этом формировать объединенную эхограмму в новом массиве.

Элемент 10, как было уже обозначено выше, нужен для вывода налицевую панель имитатора тралового комплекса, графической части эхограммы. В общем случае, схема, изображенная на рисунке 20, выполняет считывание данных из массива и далее запускает алгоритм отображения эхограмм на лицевой панели управления имитатора тралового комплекса, т.е. создает имитацию работы тралового комплекса.

Разработанную имитационную модель генерации «искусственной эхограммы» можно использовать для внесения правок в массив данных реальной эхограммы, что дает дополнительные возможности при составлении разных сценариев и вариантов индивидуальных заданий для обучающихся. В дальнейшем планируется оптимизировать алгоритм совместной работы описанных моделей, добавить дополнительные функции полезные для учебного процесса, а далее перейти к построению трехмерной модели поверхности дна произвольной формы. Форма поверхности дна и траектория движения имитации гидроакустической станции, будут генерироваться в зависимости от параметров варианта задания или случайным образом.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Холоденин Д.В., Обеспечение безопасности мореплавания посредством улучшения восприятия информации гидролокатора бокового обзора / Д.В. Холоденин // Морская индустрия, транспорт и логистика в странах региона Балтийского моря: новые вызовы и ответы: материалы X Юбилейной международной конференции. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2012. – С. 112-117 № гос. регистрации 0321300117.

2. Холоденин Д.В., Применение LabView при вторичной обработке информации гидролокатора бокового обзора для обеспечения безопасности мореплавания / Д.В. Холоденин // Балтийский морской форум: материалы Международного форума, 28 - 31 мая 2013. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2013. – С. 32-42.



3. Холоденин, Д. В. Вторичная обработка информации гидроакустического комплекса «ПЭВ-К» в среде LabView с целью повышения безопасности мореплавания / Д. В. Холоденин, И. А. Ветров // III Балтийский морской форум (24÷30.05.2015г.): материалы Международного морского форума. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2015. – С.127-133.

4. Холоденин Д.В. Применение LabView для трехмерной реконструкции информации гидролокатора бокового обзора в масштабе реального времени / Д.В. Холоденин // IV Международный балтийский морской форум. IV Международная научная конференция «Морская техника и технологии. Безопасность морской индустрии» (22÷28.05.2016г.): материалы Международного Балтийского морского форума / КГТУ, БГАРФ ФГБОУ ВО "КГТУ". – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2016. – С .443-454.

5. Холоденин Д. В. Алгоритм формирования эхограммы по информации эхолота EK-500 в графической среде моделирования LabView / Д. В. Холоденин // V Международный балтийский морской форум. V Международная научная конференция «Морская техника и технологии. Безопасность морской индустрии» (21÷27.05.2017г.): материалы Международного морского форума. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2017. – С.525-536.

6. SIMRAD EK-500 Scientific Sounder System [Электронный ресурс]. – Режим доступа URL: [https://www.kongsberg.com/contentassets/9bcb8e2fac0044e6a065f6aca5385db4/043762ag\\_ek500\\_operator\\_manual\\_english\\_complete.pdf](https://www.kongsberg.com/contentassets/9bcb8e2fac0044e6a065f6aca5385db4/043762ag_ek500_operator_manual_english_complete.pdf) (дата обращения 10.09.2022).

7. Холоденин Д.В., Вторичная обработка информации, извлекаемой из файлов формата EK5 эхолота EK-500 в графической среде моделирования LabView / Д.В. Холоденин // БАЛТИЙСКИЙ МОРСКОЙ ФОРУМ: материалы VII Международного Балтийского морского форума 7-12 октября 2019 года [Электронный ресурс]: в 6 томах. Т. 2. «Морская техника и технологии. Безопасность морской индустрии», VII Международная научная конференция. - Электрон. дан. - Калининград: Изд-во БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ», 2019. – С.344-353, № гос. Регистрации 0321904339

8. Кузьмин, Л.Л. Расчет и проектирование гидроакустических антенн и каналов: учебное пособие по курсовому и дипломному проектированию для специальности 25.05.03 "Техническая эксплуатация транспортного радиооборудования" всех форм обучения / Л. Л. Кузьмин; Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота. - Калининград: Издательство БГАРФ, 2021. - 152 с.

9. Холоденин Д.В., Определение параметров рыбных скоплений по эхограмме в графической среде моделирования LabView / Д.В. Холоденин // БАЛТИЙСКИЙ МОРСКОЙ ФОРУМ: 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. – С.312-318, – 1 электрон. опт. диск.

## **CONSIDERATION OF THE POSSIBILITY OF COMPLEXING DATA FROM A HYDRO-ACOUSTIC SIGNALS SIMULATOR WITH REAL ECHOGRAM DATA**

<sup>1</sup>Kholodenin Dmitriy Vyacheslavovich, senior lecturer

<sup>2</sup>Kuzmin Leonid Leonidovich, senior lecturer

<sup>1,2</sup>Baltic Fishing Fleet State Academy FSBEI HE "KSTU",

Kaliningrad, Russia, e-mail: <sup>1</sup>bffsa.rtf.srts.kdv@gmail.com; <sup>2</sup>44culon65@mail.ru

*The article discusses the possibility of the LabView graphical modeling and programming system to combine the generated data, which are generated by the hydroacoustic signal simulator, with real echogram data obtained from the vessel's hydroacoustic equipment. The growing need to introduce Distance learning and software interactive teaching aids into the educational process emphasizes the relevance of software modeling of radio engineering systems and imitation of the processes occurring in them.*