

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

**XI 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 AND FISHING"

<i>Бондарева О.М., Рагулина И.Р., Рагулин А.В., Бондарева Е.В.</i> Влияние особенностей акцентуаций характера личности на профессиональную деятельность судоводителя	4
<i>Гаврильченко Г.Н.</i> Альтернативный метод имитации маневра на судах, не оборудованных САРП ...	13
<i>Ермаков С.В., Мулина Е.В.</i> Общие принципы алгоритмизации определения морскими автономными надводными судами траектории своего движения	20
<i>Ермаков С.В., Шевчук Д.В.</i> Концепция адаптивной системы оценки текущего и прогностических значений скоростного проседания судна	25
<i>Лазарева Н.Н.</i> Влияние солнечной активности на повторяемость и интенсивность тропических циклонов в Северо-западной части Тихого океана	28
<i>Лобкова К.Э., Мойсеенко С.С.</i> Анализ факторов риска возникновения чрезвычайных ситуаций и аварий в морских портах	38
<i>Якута И.В., Шкитин Д.А.</i> Определение крутящих моментов балкера при плавании на нерегулярном волнении	43

СЕКЦИЯ «СУДОСТРОЕНИЕ, СУДОРЕМОНТ И МОРСКАЯ ТЕХНИКА»

SECTION "SHIPBUILDING, SHIP REPAIR AND MARINE FACILITIES"

<i>Бураковский Е.П., Бураковский П.Е., Юсын В.М.</i> Выявление причин повреждений корпусных конструкций в носовой оконечности судов	53
<i>Бураковский Е.П., Бураковский П.Е., Юсын В.М.</i> Исследование остойчивости судов на разрушающемся волнении	58
<i>Великанов Н.Л., Наумов В.А.</i> Выбор параметров балластно - осушительной системы судна	63
<i>Давлюд И.И.</i> Архитектура, облик и реализация перспективной привязной высотной системы корабельного базирования	68
<i>Мазур Е.В., Великанов Н.Л.</i> Прогноз состояния цилиндропоршневой группы судового дизельного двигателя косвенными методами диагностики масла	74
<i>Шевердяев А.С.</i> Моделирование вариантов изготовления плоских секций корпуса судна с учетом влияния производственных элементов условий труда	80

СЕКЦИЯ «ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ОБЪЕКТОВ МОРСКОЙ ИНДУСТРИИ»

SECTION "ELECTRICAL SYSTEMS OF MARINE INDUSTRY FACILITIES"

<i>Бабасюк И.В., Бочарников А.С., Попов М.А. Чижма С.Н.</i> Защита дизель-генераторов при несимметричной нагрузке	88
<i>Белей В.Ф., Коротких К.В., Самарин В.Д.</i> Некоторые результаты исследований высших гармонических в системе электроснабжения ПСЗ «Янтарь»	94
<i>Жижечкин Ю.А.</i> Программный комплекс для обработки результатов регистрации дуговых процессов.....	101
<i>Зубавичюс Р.В., Харитонов М.С.</i> Разработка компоновочных решений модульной плавучей электростанции на основе фотоэлектрических панелей	109
<i>Кажекин И.Е.</i> Результаты экспериментальных исследований дуговых и искровых процессов при однофазных замыканиях в низковольтных электросетях с компенсированной нейтралью..	116
<i>Липовцев И.С., Кажекин И.Е.</i> Обзор лабораторного оборудования для испытания обмоточных проводов	122
<i>Молчанов С.В., Яковлев А.С., Чижма С.Н., Савин В.В., Марухин А.О.</i> Способы повышения энергетической эффективности магнитной матрицы измерительных систем	127
<i>Русаков С.М.</i> Современные технологии повышения эффективности электроэнергетических систем рыбопромысловых судов	133
<i>Старостин Е.С.</i> Оценка надежности применения САВС и САПВ на примере участка электрической сети	137
<i>Филиппов Е.А., Сивуха М.Э.</i> Результаты наблюдения за показателями дизель-генераторных агрегатов во время эксплуатации.....	144
<i>Харитонов М.С., Дурманов А.С.</i> Исследование характеристик светодиодных ламп при отклонении частоты питающего напряжения	149
<i>Шабалин Л.Д., Савенко А.Е., Савенко П.С.</i> Исследование параллельной работы дизель-генераторных и валогенераторных установок на морских судах.....	152

СЕКЦИЯ «СТАЦИОНАРНЫЕ И ТРАНСПОРТНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ»

SECTION "STATIONARY AND TRANSPORT POWER PLANTS"

<i>Беркова Е.А., Александров И.С., Иванькова В.А., Теринов С.А.</i> Исследование термодинамических свойств природных холодильных агентов. Циклопентан	162
<i>Бураковская М.В., Ковальчук Л.И.</i> Функциональное диагностирование тракта отработавших газов дизелей с наддувом	169
<i>Ермаков А.Ю., Кункевич С.В.</i> Проектирование профиля рабочей части роторов двухвинтового насоса	174
<i>Кошелев С.В., Ейдеюс А.И.</i> Расчет показателей теплоотдачи трубчато-пластинчатых теплообменников при нагреве и охлаждении воздуха.....	179
<i>Кункевич С.В., Толмачев А.В.</i> Методика расчёта и регулирования гидромурфты для привода мощных вспомогательных механизмов.....	190
<i>Несмачных Н.А., Ковалев Д.А., Юрков С.В.</i> Опыт разработки мультипликатора крутящего момента для выполнения сервисных операций газотурбинной установки LM6000 ..	198
<i>Филиппова В.М., Беркова Е.А.</i> Испытание торцевого уплотнения с регулированием усилия поджатия пружины на стенде СКОУ	209
<i>Филиппова В.М., Юрков С.В.</i> Стендт для испытаний концевых опор и торцевых уплотнений насосного оборудования (СКОУ)	216
<i>Филонов А.Г., Щербаков И.И.</i> Об эффективности осаждения капельной влаги в жалюзийных сепараторах паровых котлов и опреснителей.....	223

СЕКЦИЯ «ПРОМЫШЛЕННОЕ РЫБОЛОВСТВО»

SECTION "COMMERCIAL FISHERY"

<i>Амфилов В.А.</i> Математическое моделирование устойчивого управления рыбными ресурсами	231
<i>Долина В.М.</i> Проблемы Северного морского пути в рыбной отрасли на современном этапе.....	240
<i>Коновалова К.В., Недоступ А.А., Ражев А.О.</i> Создание и функциональные испытания программного продукта для проектирования синтетических шнуров орудий промышленного рыболовства	246
<i>Недоступ А.А., Ражев А.О.</i> Модуль САПР тралов «Моделирование характеристик разноглубинного трала (заданы безразмерные параметры)»	253
<i>Недоступ А.А., Сергеев Е.И., Ражев А.О., Чуреев Е.А.</i> Имитационное моделирование гидродинамики модели лодки «WYATBOAT - 430»	259
<i>Недоступ А.А., Суконнов А.В., Сергеев Е.И., Горобец О.В.</i> Проектирование низкоэнергетических промысловых комплексов для катамаранов	266
<i>Пивоварова Ю.С., Недоступ А.А., Насенков П.В.</i> Современные нитевидные материалы для орудий промышленного рыболовства	270
<i>Соколова Е.В.</i> Анализ состояния закидного неводного лова в Российской Федерации	274
<i>Цыцорина В.А.</i> Анализ промысловой деятельности в куршском заливе и повышение показателей эффективности рыбодобывающих предприятий	278

СЕКЦИЯ «РАДИОФИЗИКА, РАДИОТЕХНИКА И ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ»

SECTION "RADIOPHYSICS, RADIO ENGINEERING AND INFORMATION SECURITY"

<i>Волхонская Е.В., Коротей Е.В.</i> Реализация жесткого декодирования по алгоритму Витерби в среде MathCAD	283
<i>Ефимов А.О.</i> К вопросу оценки уровня защищенности автоматизированных систем применяемых в морских и речных перевозках	289
<i>Пахотин В.А., Бессонов В.А., Власова К.В.</i> Фактор неоднозначности при оптимальной обработке совокупности сигналов	294
<i>Пахотин В.А., Власова К.В., Молостова С.В.</i> Сравнительный анализ методов цифровой обработки сигналов	300
<i>Подтопельный В.В.</i> Особенности работы компонентов системы регистрации событий безопасности	306
<i>Симонов Р.В., Пахотин В.А., Коротей Е.В.</i> Оценка параметров сигналов методом максимального правдоподобия с применением эволюционных алгоритмов оптимизации	311

СЕКЦИЯ «НАВИГАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ И ВЕДЕНИЕ ПРОМЫСЛА»

SECTION "SAFETY OF NAVIGATION AND FISHING"

УДК 316.6

ВЛИЯНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ АКЦЕНТУАЦИЙ ХАРАКТЕРА ЛИЧНОСТИ НА ПРОФЕССИОНАЛЬНУЮ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ СУДОВОДИТЕЛЯ

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

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

³Рагулин Андрей Владимирович, курсант Морского института;

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

^{1,2,3}Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ», Калининград, Россия, e-mail: ¹bondareva.om@bgarf.ru, ²izragulina@mail.ru,

³andrey_ragulin03@mail.ru

⁴Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

Проанализированы особенности акцентуаций характера судоводителей, выявлено влияние морской профессии на развитие акцентуаций характера. Проведены обработка полученных результатов и качественный анализ взаимозависимостей развития акцентуаций черт характера в процессе профессионализации и стажу (возраста). Установлено, что повышение успешности профессиональной деятельности и совершенствование подготовки судоводителей к деятельности обусловлены спецификой особенностей акцентуаций характера личности и их взаимосвязью с мотивационными характеристиками личности и деятельности. Определена специфика взаимосвязи особенностей акцентуаций характера личности судоводителей с мотивационными характеристиками.

Введение

Управление современным морским судном требует от судоводителя не только профессиональных компетенций, но и особой личностной подготовки, так как судоводитель выполняет две значимые роли: во-первых, руководителя-оператора, где работает система «человек-машина», во-вторых, руководителя-управленца судового экипажа, где главенствует система «человек-человек» в условиях напряженной работы и длительной изоляции.

В современном мире с развитием технического прогресса требования к психическим свойствам и качествам характера личности судоводителя повышаются. Кроме профессиональной квалификации человек должен иметь профессионально-психологическую подготовку. Высокая интенсивность труда связана с мощным расширением информационных потоков, деловых и межличностных контактов. Кроме того, на эффективности и безопасности деятельности судоводителя сказываются психологические перегрузки.

Профессиональная деятельность неизбежно сопровождается изменениями в структуре личности судоводителя: с одной стороны, происходит усиление и интенсивное развитие качеств, которые способствуют успешному осуществлению деятельности, а с другой - изменение и даже разрушение структур, участвующих в этом процессе. Профессиональные изменения, нарушающие целостность личности, снижающие адаптивность и продуктивность её деятельности, негативны и рассматриваются как профессиональные акцентуации черт характера. Акцентуированность личности может определяться наличием десяти различных типов акцентуаций. С возрастом акцентуации могут меняться – возрастать или сглаживаться [1].

В процессе профессиональной деятельности в структуре личности и характера судоводителя проявляются акцентуации. Они могут развиваться под влиянием различных факторов, среди которых важную роль играют свойства нервной системы, особенности семейного воспитания, социального окружения, профессиональной деятельности, физического здоровья.

Исследованием акцентуаций занимались П. Б. Ганнушкин, К. Леонгард, А.Е. Личко, Э.Фромм, Э. Шелдон, А. Шострем и др. [2, 3, 4]

Наличие определенных акцентуаций зависит от профессиональной деятельности. Профессиональные деформации граничат с акцентуациями, обуславливая наличие семи выявленных акцентуированных черт характера судоводителей: авторитарности, доминантности, властности, бескомпромиссности, суровости, агрессии, индифферентности [5].

Повышение успешности профессиональной деятельности и совершенствование подготовки судоводителей к деятельности обусловлены спецификой особенностей акцентуаций характера личности и их взаимосвязью с мотивационными характеристиками личности и деятельности.

Понятие «акцентуация»

Термин «акцентуация» появился в медицинской психологии и был тождествен термину «психопатия» без диагностических критериев, то есть представлял собой промежуточное явление между нарушением нормального функционирования организма в этом отношении и нормой поведенческих черт личности.

В инновационных научных исследованиях акцентуацию принято относить к онтогенетическим признакам индивида: она демонстрирует предельное проявление параметров, которые не являются аномальными.

Выдающийся немецкий психиатр Карл Леонгард считает, что акцентуация характера не является аномалией, то есть отклонением от нормы, а привносит в развитие индивидуальных черт некую уникальность. Ученый определяет две категории норм личности: основную и дополнительную. Первая немногочисленная, но определяет развитие личности, ментальное самочувствие. При благоприятных условиях черты этой категории начинают проявляться и добавляют оригинальную неповторимость, а условия дискомфорта ведут к деструкции [3].

Возникновение акцентуаций, по мнению ученых, находится во власти мотиваторов, которые возникли при рождении или были выработаны в течение жизни. Внутренние мотиваторы-факторы – темперамент, характер, гормональный статус человека, особенности перинатального онтогенеза, неблагоприятная наследственность, дисбаланс в развитии самооценки. Окружающая среда, социальные условия жизни, воспитание, профессиональная деятельность, психологические травмы – внешние факторы [3].

Типы акцентуаций характера

Термин акцентуация изначально имел отношение к психопатии, а не к психологии, так как учеными не были четко сформулированы и определены его критерии. Поэтому разные ученые предлагают свои варианты классификаций данного явления.

Карл Леонгард определил десять основных типов акцентуаций личности: демонстративный; педантичный; застревающий; возбудимый; гипертимический; дистимический; циклотимический; аффективно-экзальтированный; эмотивный; тревожно-боязливый [2,3].

Демонстративный тип. Контактные люди, легко вступающие в общение с другими, стремящиеся занять лидерские позиции. Знают себе цену, держатся с достоинством, эгоистичны, самонадеянны, любят восхвалять себя и свои действия, при этом легко втягивают других людей в интриги и конфликты. Когда есть необходимость, могут сыграть роль обходительного, воспитанного человека, покоряя нестандартным мышлением и увлекая за собой.

Среди положительных черт этого типа – энергичность, активность, предприимчивость, изобретательность, целеустремленность, ответственность, умение организовать себя и других, способность к руководству. Следует отметить, что люди, обладающие чертами этого типа, быстро «выгорают», желание действовать пропадает. Кроме того, наличие некоторых черт - эгоистичности, импульсивности, лукавства, двуличия, способности притворяться больным и уходить от ответственности – приводит к конфликтам. Представители этого типа проявляют нетерпимость в случаях лжи, критики, дискриминации, ограничения прав, оскорбления самолюбия.

Благоприятные ситуации возникают, когда человек демонстративного типа, принимая условия «игры» или придумывая для себя исключительный образ, старается соответствовать ему.

Педантичный тип. Хорошие исполнители, добросовестно выполняющие свою работу, держат слово, «не кидаются» обещаниями, предпочитают ровное настроение, в привычках консервативны, в поведении предпочитают стандартность и шаблонность. Тщательность в выполнении работы доходит до формального, а иногда придирчивого, въедливого подхода. Люди с преобладающими чертами этого типа не способны быстро принимать решения, неуверенные в себе, ждут четких указаний и инструкций от руководства.

Благоприятные ситуации могут возникать в случаях, когда человек педантичного типа выбирает свой темп работы, задачи соответствуют его профессионализму и не требуют нововведений, работа проходит в комфортной обстановке.

Застревающий тип. Основная черта - настойчивые состояния, возникшие ввиду сильного переживания, появление сверх идей, желание не столько их реализовать, сколько навязать другим. Это обидчивые люди, мстительные, ревнивые, способные аккумулировать негативные эмоции и переживания, непомерно требовательные к окружающим, отказывающиеся от достижения высоких целей. Благоприятные ситуации возникают только при признании их заслуг, высокой оценки их деятельности.

Возбудимый тип. Легко внушаемые, возбудимые люди, легко поддаются влиянию, не способны держать под контролем свои желания, влечения, страсти, особенно при злоупотреблении алкоголем. Нетерпимы, поддаются гневу, раздражаются при проявлении самостоятельности другими людьми. Могут поднять руку на другого человека, не контролируя себя. Инертны в протекании психических процессов, консервативны во взглядах на жизнь. Проявляют безрассудство в экстремальных ситуациях. К положительным чертам можно отнести исполнительность, аккуратность, внимательность к своему здоровью. К конфликтогенным ситуациям могут привести конкуренция среди коллег, давление со стороны руководства, обвинения, разбирательства, ломка устоявшихся правил.

Гипертимический тип. Сверхактивный. Человек постоянно стремится к новым результатам, проявляет инициативу, ищет для себя новое поле деятельности, что иногда приводит к «разбрасыванию» - нехватке времени довести начатые дела до конца. Однообразие и одиночество, нетерпимость, монотонность человек с трудом выдерживает.

Дистимический тип. Этот тип характеризуется серьезностью, медлительностью, слабостью волевых усилий, подавленностью настроения, низкой контактностью, молчаливостью, склонностью фиксироваться на теневых сторонах жизни, обостренным чувством справедливости. Если появляется новое окружение или новая деятельность, быстрая перестройка, человеку трудно оставаться «в норме».

Тревожно-боязливый тип. Скромность, нерешительность, стыдливость присущи представителям этого типа. Тревоги, страхи появляются по поводу и без повода, поэтому конфликтогенные ситуации могут возникать каждый день. Редко вступают в конфликты, обладают самокритичностью, дружелюбием, исполнительностью. Благоприятное время – равномерное, продуманное, расписанное, когда не надо добиваться целей, не надо брать ответственность, принимать решения.

Циклотимный тип. Это люди, у которых настроение меняется, как маятник, от «невозможно плохого» до «возможно хорошего». Радостные события вызывают жажду деятельности, говорливость; печальные – подавленность, замедленность реакций и мышления; также часто меняется их манера общения с окружающими людьми. Ученые различают подтипы этого типа, к которым относятся любители весело поболтать; почитатели выдержанной иронии; романтические паиньки; беззаботные приверженцы жизни; деловые реалисты.

Аффективно-экзальтированный тип. Представители этого типа очень эмоциональные люди. Они могут испытывать восторг, веселье, радость, затем легко перейти к печали, грусти, отчаянию. Все эмоции они переживают по-настоящему, с волнением, «всем сердцем». Им также свойственна высокая контактность, словоохотливость, они часто спорят, но не доводят дело до открытого конфликта.

Эмотивный тип. Трогательные, сверхчувствительные люди, отличающиеся глубиной переживаний в области тонких эмоций в духовной жизни, гуманностью, отзывчивостью, обостренным чувством долга, исполнительностью. Все жизненные неприятности они переживают намного

дольше, чем представители других типов. Переживания касаются и смысловых впечатлений: нравственных, эстетических, религиозных и так далее. Увязая в переживаниях и эмоциях, они не могут отделить главное от второстепенного, во всем опираясь на субъективное мнение. Благоприятные условия для людей этого типа появляются в случаях, когда не требуется объективного анализа, а важен субъективный подход на уровне чувствования.

Акцентуированность характера личности должна приносить положительный результат, а это возможно при сбалансированном подходе: акцентуации данной личности должны находиться в равновесии с другими психическими свойствами, от которых зависит вид деятельности.

Акцентуированные черты неодинаково влияют на разные личности: одна и та же черта может привести одного человека к успеху, а для другого стать источником проблем [6]. Поэтому ученые-исследователи основательно пытаются разобраться в проблеме влияния акцентуированных черт на профессиональную деятельность [5]. При изучении акцентуированных черт, возможности направлять в нужное русло и корректировать их, учитывая профессиональные особенности личности, можно добиться успеха.

Основные качества характера, необходимые для судоводителей

К профессионально значимым для судоводителя психологическим качествам относятся: обязательность, квалификация, самообладание, организованность, менталитет, нравственность, коммуникативность, решительность, требовательность, заинтересованность [1]. Рассмотрим психологическое содержание каждого качества в таблице 1.

Таблица 1- Психологическое содержание профессиональных качеств судоводителя

№	Профессиональные качества	Содержание понятия
1	Обязательность	Долг, надежность, важность, серьезность, совесть.
2	Квалификация	Мастерство, профессионализм.
3	Самообладание	Терпение, спокойствие, самоконтроль, воля.
4	Организованность	Исполнительность, дисциплинированность
5	Менталитет	Мыслительный процесс, осознание, мировосприятие
6	Нравственность	Честность, благородство, мораль.
7	Коммуникативность	Общительность, понимание, ориентированность.
8	Решительность	Принимать решения, оценивать ситуацию.
9	Требовательность	Характер, напористость, воля.
10	Заинтересованность	Стремление, потребность, интерес.

Таким образом, необходимыми качествами судоводителя являются не только высокая профессиональная квалификация, но и высокая эмоциональная устойчивость, твердая убежденность, надежность, самообладание, самодостаточность, контактность, способность принимать решения в нестандартных ситуациях.

Работа в море сопряжена со статическим напряжением. Любой сбой может дать толчок и возможность эмоциям выйти из равновесия. В условиях интенсивных перемен, связанных, с одной стороны, с судном, грузом или, с другой стороны, поведением членов команды, для судоводителя важно прогнозирование, то есть мгновенная оценка вероятности действий. Здесь необходимы: выдержка, твердость, решимость, смелость, независимость, эмоциональная устойчивость и так далее.

Формирование и проявление акцентуаций личности в профессиональной деятельности судоводителя

Ученые-психиатры дифференцируют характер на три степени: нормальный (на уровне нормы), акцентуированный и /или психопатический. Последний, психопатический, подразумевает черты характера на уровне патологии. Люди с такой выраженностью черт характера не проходят медицинскую комиссию и, как следствие, на борту судна в составе экипажа практически быть не могут.

Специалисты с характером на уровне нормы легко решают профессиональные задачи и, как правило, в море ходят до глубокой старости.

Люди с акцентуированным типом характера даже среди судоводителей встречаются часто. Акцентуированный характер - предельный уровень нормы. Десяти типам акцентуированного характера присущи свои личностные особенности. Может быть диагностирован и смешанный тип.

Отдельные из них придают или усиливают ценные для личности качества. К примеру, лидерство – важная черта для демонстративного типа, активизируясь, она помогает принимать **неформатные** решения. При этом могут усилиться и отрицательные черты лидера – самолюбие, амбициозность. Практика показывает, что отрицательные черты у судоводителей проявляются в основном из-за работы в условиях высоких нагрузок: стрессовые ситуации, возникшие из-за передвижения судна или наличия/отсутствия груза, опасности его смещения во время длительного перехода ввиду штормовых условий и так далее.

Профессиональные акцентуации

Профессиональная среда практически всегда откладывает отпечаток на личность человека, особенно если деятельность осуществляется изолированно на протяжении длительного периода, требует постоянного напряжения и ответственности, в том числе материальной, за происходящие события в различных погодных условиях. Таким образом, **обеспечение устойчивости** приводит к развитию нового механизма взаимодействий, открывающих новые возможности и стимулирующих появление новых социальных ситуаций, в которых человек поступает в соответствии с определенными устойчивыми личностными технологиями выполнения. Это первая фаза *первичной профессионализации*.

Вторая фаза или второй уровень профессионализации наступает в процессе совершенствования человеком профессиональных качеств, выработки индивидуального подхода, профессиональной позиции, при наличии которых повышается качество и возрастает производительность труда. Инициативность и энергичность на той фазе приходит в устойчивое состояние, а уровень проявления подчиняется индивидуально-психологическим особенностям личности человека. Следует отметить, что на этой фазе каждый судоводитель имеет свой стабильный, наиболее благоприятный показатель активности.

Для фазы *профессионального мастерства* характерны показатель компетентности, самореализация и инициативность личности, высокий потенциал, опыт. Человек совершенно по-новому видит способы выполнения работы, отказывается от стереотипов мышления, делегирует полномочия в соответствии со своим видением, при этом быстро добивается эффективности [7].

Если на протяжении многих лет специалист выполняет одну и ту же работу, у него формируются профессионально важные качества. Практика показывает, бывают случаи, когда, появляясь на основе привыкания, качества разрушительно влияют, деформируя личность.

Профессиональное совершенствование начинается с периода взросления человека (с выбора профессии в 14-17 лет) и заканчивается по достижении пенсионного возраста или позже, в зависимости от многих жизненных факторов (65-75 лет для мужчин; в Калининградской области есть примеры работающих судоводителей, которым за 80 лет). Этот процесс можно условно разделить на периоды: образования; приобретения умений, навыков и прохождения профессиональной адаптации; профессионального опыта; высокой квалификации.

Овладение профессиональным мастерством происходит в течение всей жизни. Исследователь Г. Гримм утверждает: «Длительность периода трудоспособности резко колеблется в зависимости от индивидуальных качеств и величины нагрузки». Такой индикатор, как «перелом в работоспособности, может, во всяком случае, не выступать на передний план в виде «перелома». Естественно, что с возрастом у мужчин все в большей степени проявляются симптомы физического регресса, которые, в конечном счете, могут привести к инвалидности. Однако, возрастные границы работоспособности могут колебаться от 50 до 80 с лишним лет» [8]. Автор утверждает, что периоды зрелости и старения удостоены отдельного изучения. Стиль работы меняется с возрастом. Но следует отметить, что профессионализм не приходит автоматически с опытом [9].

Профессиональное совершенствование – это завоевание, освоение, осознание, становление, это и разрушение, деструкция. Это и личностные трансформации, которые возникают при переходе из одного периода становления в другой или при нарушениях организма человека, возрастных изменениях. Иногда деструкции могут возникать от монотонности работы, единообразия, продолжающегося на протяжении нескольких лет, тогда происходит деградация личности, нежелательные качества меняют профессиональное поведение человека, он становится агрессивным, раздражительным, амбициозным.

Даже в период освоения профессии профессиональная деятельность искажает личность. Материализация видов деятельности, зачастую, требует действия некоторых специальных качеств (остальные качества оказываются на время, иногда на годы, ненужными). Специалист, выполняя определенные действия, использует комплекс качеств, от которых зависит результат, и этот комплекс работает на протяжении всей профессиональной деятельности. Когда человек набирает опыт, выполняет заученные операции быстрее, некоторые качества, находясь в составе комплекса, становятся невостребованными, они начинают тормозить процесс профессиональной деятельности. Так появляются профессиональные акцентуации, из-за которых происходит искажение личности специалиста - деформация [1].

Деформации могут появляться от эмоциональной усталости, тяжести труда, длительных переходов, монотонности работы. Депрессивные эмоциональные состояния сначала становятся частыми, потом привычными, впоследствии приводят к развитию профессиональных деструкций.

В психологии есть понятие «эмоционального выгорания». Оно присуще представителям многих профессий, в том числе и судоводителям. Человек достигает определенного уровня в профессии, дальнейший карьерный рост отсутствует, стимулирующие мотивы не интересны, появляется чувство некоторого разочарования. Возникает благодатная почва для проявления профессиональных акцентуаций [5].

Таким образом, возрастные изменения в организме и психологические изменения могут являться источником деформации личности. Поэтому особенно важно, в любой период становления личности, задействовать все качества характера, вести активную деятельность, изучать что-то новое, открывать для себя другие стороны управления, организации и так далее.

Специфические особенности акцентуаций характера судоводителей

Детерминантами, обуславливающими переломный момент профессионального процесса судоводителя, чаще всего являются возрастные психические и физиологические преобразования. К ним можно отнести возникшие проблемы со здоровьем, сбой в психике и так далее.

Для некоторых людей на пике переломного момента может появиться полная сосредоточенность на профессиональной деятельности. В этих случаях судоводители одержимы работой ввиду каких-то причин. «Уход в профессию» может быть из-за семейного разлада, потери членов семьи, ощущения ненужности и так далее. Происходит сублимация, человек на работе требует признания, ожидает достижения успеха, посвящая работе всю жизнь. Иногда, не получая должного внимания или признания, или, считая себя специалистом наивысшей инстанции, судоводитель невольно переходит границы: нарушает профессиональную этику, становится жестким во взаимоотношениях, конфликтным.

Рассмотрим акцентуации характера, которые наиболее часто встречаются у судоводителей.

Авторитарность. Единоличное осуществление судоводителем управленческих функций в виде распоряжений, указаний, рекомендаций; отсутствие критического взгляда на себя со стороны.

Доминантность. Флегматики и холерики больше всего подвержены влиянию этой черты. Преобладание, господство, властность, ощущение превосходства – комфортное состояние для доминантной акцентуации характера, которая с возрастом становится более выраженной и яркой. Обычно после десяти лет стажа судоводители позволяют себе не контролировать эту черту.

Властность. Использование абсолютного господства, нежелание считаться с другими людьми.

Бескомпромиссность. Требовательность, строгость, резкость, беспощадность. Судоводитель опирается только на свое мнение, не позволяет другим высказываться, обсуждать ситуацию, мотивируя это тем, что за все, происходящее на судне, несет ответственность он.

Суровость. Безжалостные словесные оскорбления, публичные унижения, наказания трудом направлены на ослабление воли человека, психологический дискомфорт.

Агрессия. Враждебное отношение к людям, имеющим несоответствующую заявленной квалификации.

Индифферентность. Равнодушное отношение к проблемам людей развивается на фоне эмоциональной усталости, профессиональной неудовлетворенности.

Исследование уровней выраженности акцентуаций черт характера у судоводителей

П. Ганнушкин, К. Leonhard, А. Личко, Э.Шелдон, А. Шострем, Э.Фромм, в своих исследованиях доказывают, что отличительные признаки акцентуаций характера служат причиной модификаций в построении характера и влияют на образ действий и индивидуальное поведение человека в профессиональной деятельности [3, 4]. Наша задача: обратить внимание на преобразование личностных свойств на примере курсантов третьего-четвертого курсов (будущих судоводителей) на первом этапе, судоводителей со стажем работы 2-7 лет на втором этапе, со стажем 7-15 лет и свыше 15 лет – на третьем этапе.

Исследование проводилось во время учебного процесса. Предварительно проводилась беседа в сообществе «Эксперимент», устанавливался контакт с испытуемыми, показывалась значимость исследования.

Реализация методологии для исследования акцентуаций характера производилось с опорой на общетеоретический разбор деятельности и личности судоводителя. Своеобразие разбора профессиональной деятельности состояло в том, что он основывался на изучении современных медицинских, социологических, психологических источников литературы; проведении социологического опроса, изучении влияния профессиональных качеств на профессиональную деятельность.

С декабря 2022года по апрель 2023 года реализована экспериментальная часть исследования на тему «Влияния особенностей акцентуаций характера на профессиональную деятельность судоводителя».

На первом этапе, для проведения сравнительного анализа типов акцентуаций характера судоводителей и людей, не имеющих отношения к работе в море в социальной сети нами создано сообщество «Эксперимент», куда были приглашены судоводители и люди, не имеющие отношения к работе в море. В пилотажном исследовании приняло участие 150 человек от 20 до 40 лет.

Рассматривая показатели акцентуаций характера судоводителей и людей других профессий, можно утверждать, что судоводители характеризуются стабильными стационарными методами действий относительно восприятия мира, отношений к людям, своему делу. Профессия своеобразным образом накладывает отпечаток и не позволяет использовать полный диапазон эмоциональных переживаний. Люди других профессий более подвержены внушаемости, неустойчивости, отсутствию фиксации в оценочных рассуждениях.

На втором этапе исследования (февраль-март 2023 года) отслеживалось действие профессии и личностных особенностей на развитие акцентуаций черт характера судоводителей. На данном этапе в эксперименте участвовало 200 судоводителей, в том числе 50 курсантов 3-4 курсов.

Для проведения поисковой работы в опросник были включены основные типы акцентуаций: авторитарность; доминантность; властность; бескомпромиссность; суровость; профессиональная агрессия; индифферентность.

Каждому из участников эксперимента был отправлен тест, составленный на основе подходов В.П. Симонова. 70 вопросов теста требовали положительного или отрицательного ответа. Полученные данные по каждому типу акцентуаций уравнивались с помощью коэффициентов. 24 – максимальный балл. Показатель, который превышает 12баллов, говорит о признаках акцентуации. Рассчитывается и показатель индивидуальной нормы. Показатели, находящиеся ниже индивидуальной нормы, говорят о скрытой акцентуации.

Рассмотрим результаты эксперимента на диаграмме «Анализ выраженности акцентуаций».

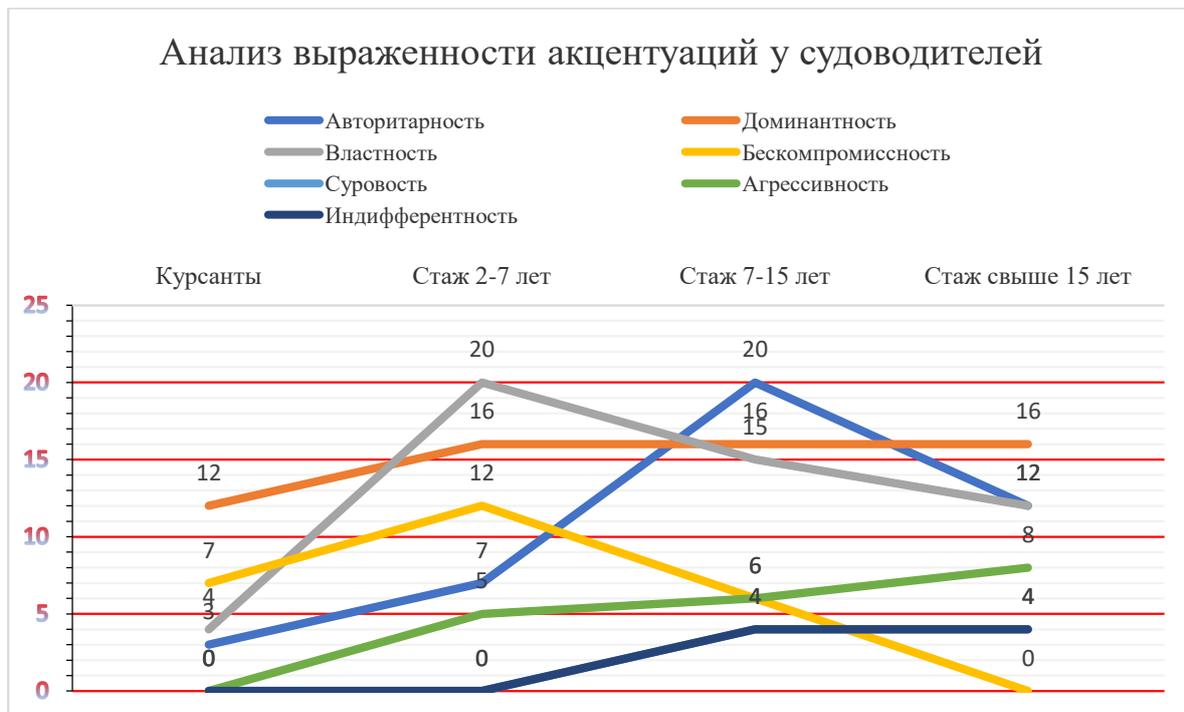


Рис. 1. Анализ выраженности акцентуаций у судоводителей в зависимости от стажа работы в море

Властность на уровне нормы у курсантов и судоводителей со стажем более 15 лет. Завышенный показатель властности у судоводителей со стажем 7-15 лет. Самый высокий показатель (двадцать при N=12) у судоводителей со стажем работы от 2 до 7 лет. Можно предположить, что молодые судоводители, набирающие свой профессиональный опыт, имеют склонность или привычку повелевать. При стаже свыше 15 лет подобная склонность исчезает, акцентуация властности снижается до уровня нормы (N=12). Это является патологией.

Бескомпромиссность возрастает у курсантов и судоводителей со стажем 2-7 лет, затем резко снижается (со стажем 7-15 лет) и приближается к нулевой отметке у судоводителей со стажем свыше 15 лет. Среднее значение по выборке показывает, что эта акцентуация находится ниже нормы и является скрытой для всех категорий судоводителей.

Показатель суровости ниже нормы у курсантов и молодых судоводителей со стажем от 2 до 7 лет. Возрастает у представителей других категорий, но находится ниже общей нормы, является скрытой акцентуацией. Это тоже является патологией.

Агрессивность у курсантов отсутствует (показатель равен нулю), возрастает на всех стадиях профессионализации. Эта акцентуация находится ниже нормы и является скрытой.

Индифферентность возрастает у судоводителей со стажем от семи и выше лет, но показатель значительно ниже нормы (4 при N=12).

На рисунке видно, что у представителей категорий ярко выражены акцентуации авторитарности, доминантности, властности. Авторитарность помогает судоводителю организовать рабочий процесс. Доминантность чаще всего связана с индивидуальным стилем работы. Властность ярко выражена у всех судоводителей, у курсантов она проявляется в скрытой форме. Акцентуация властности позволяет судоводителю строить отношения с экипажем, ориентируясь на достижение цели. Для судоводителя, отвечающего за все, что происходит на судне, такие качества, как требовательность, жесткость, властность, вполне уместны.

Акцентуация бескомпромиссности с приобретением опыта обезличивается. Суровость, агрессивность и индифферентность не находят своего подтверждения на всех стадиях профессионализации. Кроме того, между доминантностью, властностью, и авторитарностью существует некоторая взаимосвязь. Акцентуации черт характера личности можно корректировать. Для этого необходимо знать, в какой степени выражены черты, организовать рабочий процесс, наладить индивидуальную работу с экипажем, постоянно контролировать данные качества личности.

На третьем, заключительном, этапе (март-апрель 2023 года) проведено исследование взаимосвязи особенностей акцентуаций с мотивационными характеристиками личности и деятельности. В эксперименте участвовало 100 судоводителей.

На первом месте у судоводителей обеспеченность и уверенность, наличие верных друзей, то есть ценности прагматического характера.

К субдоминантным ценностям относят возможность посмотреть мир и сделать счастливыми близких людей.

Среди ценностей инструментального характера преобладают независимость и самодостаточность.

Заключение

Цель настоящего исследования - выявление и анализ особенностей акцентуаций характера личности судоводителя, как важных качеств, и определение их влияния на успешность профессиональной деятельности. В ходе работы установлено:

- акцентуации черт характера в процессе выполнения профессиональной деятельности приобретают профессионально обусловленный характер;
- профессиональные акцентуации поливалентно влияют на продуктивность профессиональной деятельности;
- проявление профессионально обусловленных акцентуаций зависит от стажа работы и возраста судоводителя;
- акцентуации, негативно влияющие на продуктивность деятельности, могут быть скорректированы путем использования специально разработанных психологических тренингов.

В зависимости от акцентуаций характера у судоводителей определены ведущие мотивы деятельности. Повышение успешности профессиональной деятельности и совершенствования подготовки судоводителей обусловлены спецификой особенностей акцентуаций характера личности и их взаимосвязью с мотивационными характеристиками личности и деятельности.

Список используемых источников

1. Клишевская, М.В. Профессионально-важные качества как необходимые и достаточные условия прогнозирования успешности деятельности / М.В. Клишевская, Г.Н. Солнцева // Вестник МГУ. - 1999. - № 4.-С. 61-67.
2. Ганнушкин, П.Б. Постановка вопроса о границах душевного здоровья: избранные труды / П.Б. Ганнушкин; под ред. О.В. Кребникова. -Ростов-на-Дону: Феникс, 1998. - 416 с.
3. Леонгард, К. Акцентуированные личности / К. Леонгард. – Киев: Вища школа, 1981. - 387 с.
4. Личко, А.Е. Психопатии и акцентуации характера у подростков / Андрей Евгеньевич Личко. - 2-е изд., доп. и перераб. - Л.: Медицина. Ленингр. отд-ние, 1983. - 255 с.
5. Марищук, В.Л. Психологические основы формирования профессионально значимых качеств: автореф. дис. ... д-ра психол. наук / Марищук В.Л. - Л., 1982. - 32с.
6. Колябин, СВ. Особенности мотивационно-смысловой сферы личности подростков с акцентуацией характера: автореф. ... дис. канд. психол. наук / Колябин СВ. - М., 2004. - 43 с.
7. Виноградов, В.И. Психодиагностическое обеспечение формирования психологической готовности личности к профессиональной деятельности: автореф. дис. ... канд. психол. наук / Виноградов В.И. - М.,1996.-25 с.
8. Мухина, В.С. Возрастная психология / В.С. Мухина. - М: Академия, 2002. - 456 с.
9. Зеер, Э.Ф. Психология профессий: учебное пособие / Э.Ф. Зеер. - Екатеринбург: Академический проект: Деловая книга, 2003. - 303 с.

INFLUENCE OF THE FEATURES OF ACCENTUATIONS OF THE CHARACTER OF THE PERSON ON THE PROFESSIONAL ACTIVITY OF THE SHIPMASTER

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

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

³Ragulin Andrey Vladimirovich, kadet;

⁴Bondareva Ekaterina Vitalievna, student

^{1,2,3}Baltic Fishing Fleet State Academy FSBEI HE «KSTU», Kaliningrad, Russia;

⁴FSBAI HE Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

The paper analyzes the features of character accentuations of navigators, reveals the influence of the maritime profession on the development of character accentuations. The obtained results were processed and a qualitative analysis of the interdependencies in the development of character trait accentuations in the process of professionalization and length of service (age) was carried out. It has been established that the increase in the success of professional activity and the improvement of the preparation of navigators for activity are due to the specific features of the accentuations of the character of the individual and their relationship with the motivational characteristics of the individual and activity. The specificity of the relationship between the features of accentuations of the nature of the personality of navigators with motivational characteristics is determined.

УДК 656.61.052

АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ МЕТОД ИМИТАЦИИ МАНЕВРА НА СУДАХ, НЕ ОБОРУДОВАННЫХ САРП

¹Гаврильченко Галина Николаевна, старший преподаватель кафедры судовождения и безопасности мореплавания БГАРФ

¹Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ», Калининград, Россия, e-mail: galina.gavrilchenko@mail.ru

Применение данной методики позволит быстро определить маневр безопасного расхождения с судами при отсутствии возможности имитации маневра в САРП, поскольку суда менее 10000 могут быть оснащены такими устройствами как СЭП или САС. Применение палетки предполагает принцип относительного движения, наличия регулируемых векторов скоростей относительного движения при взятии судов на сопровождение и выступит альтернативой возможностям САРП.

Для повседневной работы мирового флота необходима качественная подготовка морских специалистов, включающая в себя требования к компетенции согласно международного кодекса ПДНВ. Для судоводительского состава в таблицах стандартов компетентности на уровнях эксплуатации и управления имеют место сферы компетенции «Несение безопасной ходовой навигационной вахты», «Использование радиолокатора и САРП для обеспечения безопасности плавания» и «Организация и процедуры несения вахты», «Обеспечение безопасного плавания путем использования информации от навигационного оборудования и систем, облегчающих процесс принятия решений» [1]. Несмотря на высокий уровень подготовки судоводительского состава, аварийность остается на достаточно устойчивом уровне, особенно это касается столкновений судов. Проблема продолжает существовать и для того, чтобы подтвердить актуальность проблемы столкновений судов, можно рассмотреть статистику аварийности Японии. На сайте департамента транспорта Японии дается очень подробная статистическая информация об аварийности судов за

многие годы. Эта информация отражается в виде таблиц, включая сведения от начала текущего года с запаздыванием всего на два ÷ три месяца от настоящего времени, в виде диаграмм - по типам аварий и по типам судов, участвующих в авариях.

За пять месяцев этого года, что следует из диаграммы на рисунке 1, видно, что количество столкновений судов является максимальным – 61случай, посадок на мель – 60 случаев [2].



Рис. 1 Количество аварий за 2023 год на 31мая

На рисунке 2показан график, где отражено количество столкновений судов, согласно таблицы статистических данных департамента транспорта Японии. За период с 2008 по 2022годы наблюдается относительная стабильность столкновений судов с годами, при этом следует отметить, что столкновения и посадки судов на мель имели лидирующие позиции на фоне остальных видов аварий [2].



Рис. 2 График количества столкновений с 2008 по 2022годы

На диаграмме аварийности судов по типам (рисунок 3), за пять месяцев этого года отражена следующая статистика: в авариях участвовали в большей части рыболовные суда – 93 случая, личные плавсредства – 63 и грузовые суда – 52случая [2]. Как правило, эти суда незначительных размеров. Для судов размером менее 10 тысяч регистровых тонн, не имеющих в комплектации навигационного оборудования САРП - средство автоматической радиолокационной прокладки, кроме РЛС (радиолокационной станции) должны быть установлены СЭП (средство электронной прокладки) или САС (средство автосопровождения), которые позволяют получать полную оценку ситуации сближения судов при взятии их на сопровождение. Для судоводителей на таких судах в районах с интенсивным судоходством возникает проблема с решением задач на принятие решения по выбору маневра безопасного расхождения, т.к. оборудование СЭП и САС не имеет функции имитации маневра, которая есть у САРП [3].

Number of Vessels Involved in Marine Accidents in 2023

as of May 31, 2023

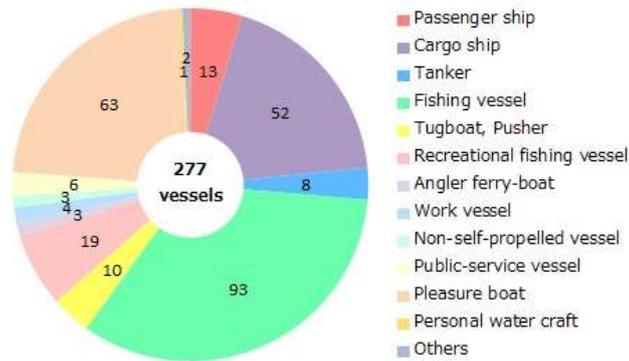


Рисунок. 3. Количество аварий по типам судов за 2023 год с января по май

Зачастую, на судне нет маневренных планшетов, об этом говорят судоводители, которые работают на самых различных судах по типам и размерам и под разными флагами. На судах, где имеются планшеты, требуется время для нанесения на них информации при ведении радиолокационной прокладки, выбора и выполнения выбранного маневра (от шести до двенадцати минут). Предложенный вариант использования палетки позволит без нанесения информации на планшет принять решение на безопасное расхождение непосредственно на экране РЛС. Для этого способа требуется наличие СЭП или САС, с помощью которых, суда будут взяты на сопровождение и на экране дисплея РЛС появятся вектора относительных скоростей судов в принятом масштабе в режиме РЛС «RM» - относительного движения. Палетку можно создать на любом прозрачном материале (обложка папки для файлов или файл) на котором транспортиром наносят перманентным маркером градуировку по периметру.

Для решения задачи на РЛС необходимо сделать предварительную настройку:

- стабилизация движения по норду, режим - относительное движение (RM), красным подвижным визиром дальности VRM отмечаем дистанцию безопасного расхождения, берем на сопровождение интересующие нас объекты, учитывая закономерности относительного движения;
- выбираем временной масштаб скоростей, исходя из времени развития ситуации;
- наносим на палетку свой вектор скорости в принятом масштабе. Для этого можно использовать электронные визиреры дальности и направления или маркер;
- выбранный временной масштаб скоростей предполагаем как время упреждения (на данный момент времени необходимо сделать расчет, выбор маневра и выполнить его).

Для наглядного примера решения задачи по выбору безопасного маневра альтернативно имитации маневра с использованием САПП рассмотрим задачу. На рисунке 4 показан монитор пульта управления танкером – судном на котором находится оператор РЛС.



Рис. 4. Монитор пульта управления судном

На судне ведется радиолокационное наблюдение. На экране РЛС с помощью подвижного круга дальности зададим дистанцию безопасного расхождения. Одновременно к судну приближаются три цели, которые необходимо взять на сопровождение (рис.5)



Рис. 5. Монитор РЛС с взятыми на сопровождение целями

СЭП или САС позволят оценить ситуацию встречи и через три минуты сопровождения этой информации можно будет доверять. В зависимости от времени подхода судов на дистанцию кратчайшего сближения нужно выбрать время упреждения (это выполняется использованием функции «Delay» на САРП в опции проигрывания маневра «Trial») и задать длину векторов на данный момент времени. На рисунке 6 показано нанесение на палетку своего вектора скорости и КМВ-круга маневренных возможностей по отметке подвижного круга дальности на экране РЛС и линии курса.



Рис. 6. Нанесение вектора нашей скорости и КМВ в принятом масштабе

Далее, после трех минут устойчивого сопровождения целей получаем позиции целей и из вектора относительных скоростей [4]. Отметим их водяным маркером, рис. 7. Точки концов векторов относительных скоростей будут точками упреждения, а точки позиционирования целей будут выполнять роль первых точек в треугольнике скоростей относительного движения.



Рис. 7. Нанесение точек «1» и «3» для треугольника скоростей

Следующим шагом является прикладывание линейки касательно от дистанции безопасного расхождения к точке упреждения и далее, как границу СООК – сектора относительных опасных курсов – рисунок 8.

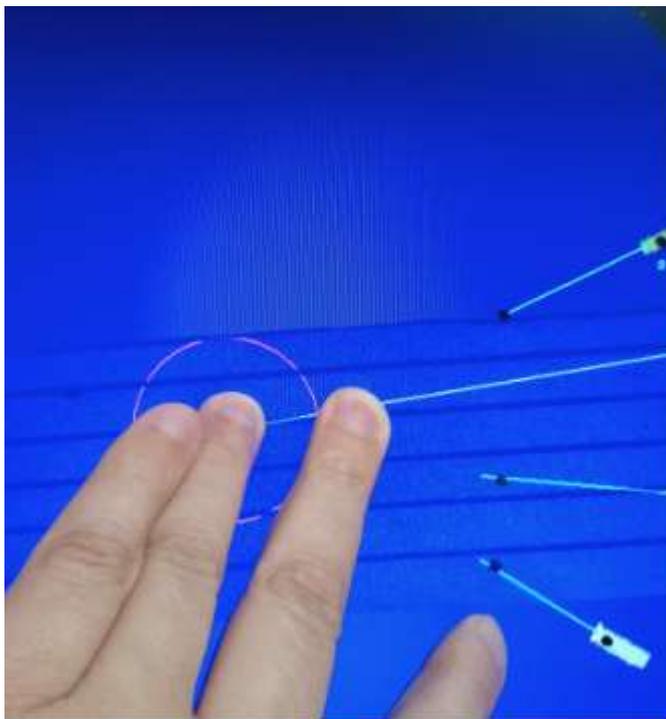


Рис. 8. Линейка, приложенная к упреждающей точке и дистанции безопасного расхождения

Прикладываем палетку таким образом, чтобы вектор нашей скорости на палетке упирался концом в точку «1» (рис. 9а) той цели, к которой приложена линейка. Пересечение линейки и КМВ на палетке отражает нужное изменение скорости, которое можно зафиксировать водяным маркером, рис. 9б.

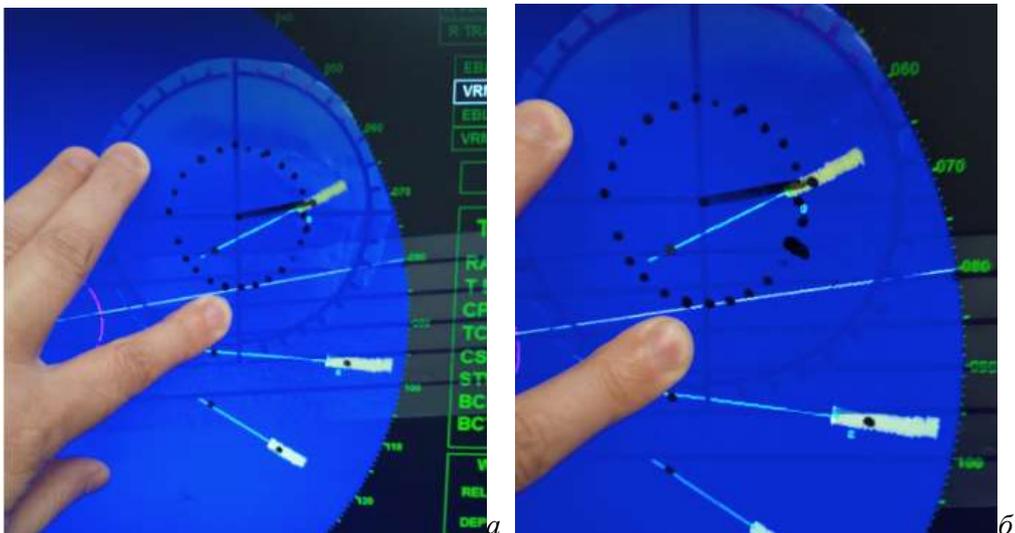


Рис. 9(а, б). Последовательные действия прикладывания палетки с линейкой и выбора маневра для одной цели

Аналогичное действие осуществляем с другой целью (рис.10 (а,б)).Если маневр с очередным судном значительнее, чем с первым, меняем засечку на КМВ.

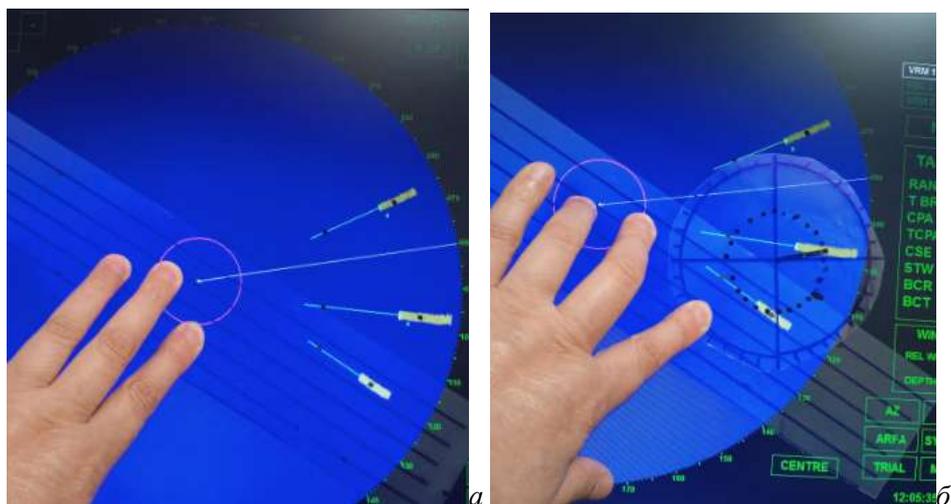


Рис. 10. Выбор маневра на КМВ для очередного судна

С очередной целью осуществляем эту операцию по такой же схеме (рис.11 а, б).

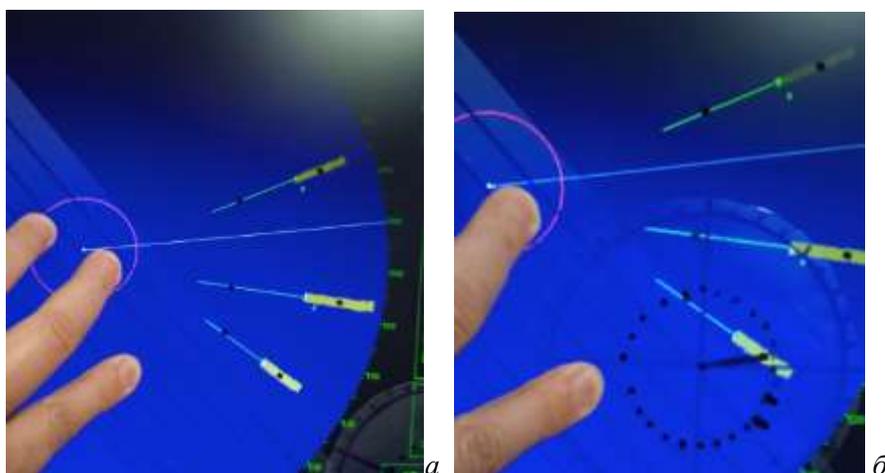


Рис. 11. Выбор маневра прикладыванием линейки с палеткой для новой цели

Зафиксированный максимальный отворот снимаем с КМВ и выполняем маневр, рис.12а, б.

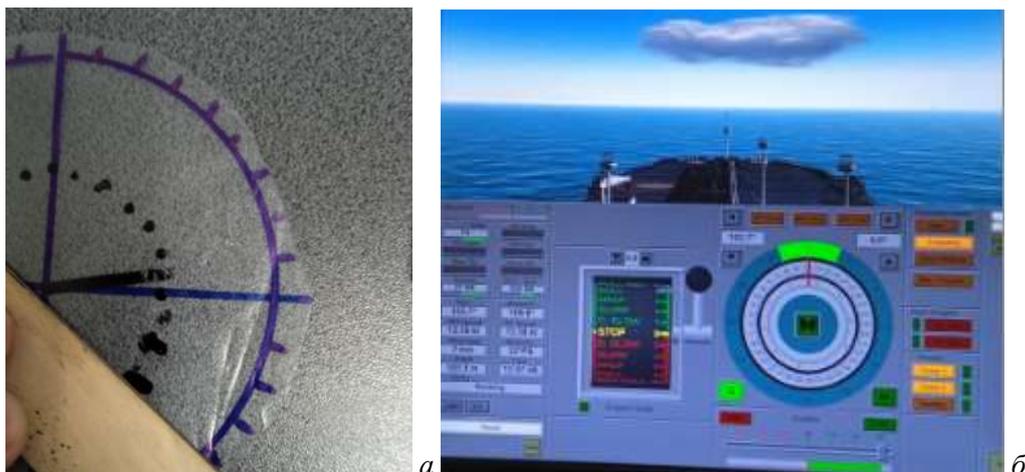


Рис. 12. Снятие маневра и выполнение изменения курса

На рисунке 13 показано, что судно выполнило изменение курса к моменту упреждения.



Рис. 13. Установка руля на автомат после выполнения отворота

Далее осуществляем контроль эффективности выполненного действия, безопасность которого подтверждают последовательные отображения следов и векторов относительных скоростей объектов расхождения (рис. 14 а, б, в).



Рис. 14. Контроль эффективности выполненного маневра

Было произведено несколько экспериментов на лабораторном оборудовании NTpro-5000, которые показали реальность применения данного приспособления на судах, не имеющих САРП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ПДНВ. Международная конвенция о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты. Включает Манильские поправки 2010 года: юридический документ/ Международная морская организация. – Сводное издание Конвенции ПДНВ 2017 года. – Лондон: Издательство ИМО, 2017. – 418 с.: табл.
2. Япония. Статистика морских аварий на 31 мая 2023 года [Электронный ресурс]. Режим доступа: Statistics of Marine Accident/ https://www.mlit.go.jp/jtsb/statistics_mar.html
3. СОЛАС. Сводное издание 2014 года: сводный текст Международной конвенции по охране человеческой жизни на море 1974 года и Протокола 1988 года к ней: статьи, приложения и свидетельства/ Международная морская организация – 6-е изд. – Лондон: Издательство ИМО, 2014. – 526 с.
4. Подготовка по использованию радиолокационной станции (РЛС) лекционные материалы, МУТЦ, 2018 электронный ресурс, БГА, 40 с.

ALTERNATIVE METHOD OF SIMULATING MANOEUVRE ON VESSELS NOT EQUIPPED WITH ARPA

¹Gavrilchenko Galina Nikolaevna, Senior Lecturer of the Department of Navigation and Safety of Navigation

¹Baltic Fishing Fleet State Academy FSBEI HE «KSTU»,
Kaliningrad, Russia, e-mail: galina.gavrilchenko@mail.ru

The use of this method will make it possible to quickly determine the maneuver of safe movement with ships in the absence of the possibility of simulating the maneuver in the ARPA (automatic radar plotting aid), since ships less than 10,000 can be equipped with such devices as EPA (electronic plotting aid) or ATA (automatic tracking aid). The use of the pallet implies the principle of relative movement, the presence of adjustable vectors of relative movement velocities when taking ships for escort and will act as an alternative to the ARPA capabilities

УДК 656.61.052

ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ АЛГОРИТМИЗАЦИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОРСКИМИ АВТОНОМНЫМИ НАДВОДНЫМИ СУДАМИ ТРАЕКТОРИИ СВОЕГО ДВИЖЕНИЯ

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

²Мулина Елена Вадимовна, аспирант Морского института

^{1,2}Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ»,
Калининград, Россия, e-mail: sv.ermakov@bgarf.ru; mulina409@gmail.com

Приведены результаты обоснования открытого перечня общих принципов, на которых должен базироваться процесс разработки алгоритма определения траектории (оптимальной траектории) движения морскими автономными надводными судами (навигационного алгоритма). Обоснованные принципы затрагивают различные значимые аспекты алгоритмизации решения задачи выбора судном траектории и являются фундаментом для построения навигационного алгоритма.

Введение

Ключевой тенденцией развития большинства отраслей экономики является автоматизация производственных процессов с конечной целью исключить из этих процессов участие человека с передачей его функций автоматическим алгоритмам и реализующим их техническим и программным средствам. Можно указать как минимум три взаимосвязанные причины появления и существования этой тенденции. Первая – экономическая – связана со стремлением уменьшить расходы на содержание персонала, а также издержки, появляющиеся вследствие негативного влияния исполнителей на качество производимой продукции и оказываемых услуг. Вторая причина определяется желанием минимизировать угрозу жизни и здоровью человека вследствие воздействия опасных производственных факторов, особенно в рискованных и экстремальных отраслях, производствах и профессиях. Иными словами, цель автоматизации – исключить человеческий фактор из числа факторов, негативно влияющих как на ход и результат производственных операций, так и на самого человека.

Перспективное развитие морского транспорта как отрасли, во многом определяющей эффективность современной мировой экономики, рассматривается в настоящее время исключительно в контексте автоматизации, связанной с разработкой и внедрением морских автономных надводных судов (МАНС) [1]. Автономные суда являются сейчас одним из самых популярных объектов исследования для многих учёных и организаций из различных стран мира. Более того – текущее десятилетие характеризуется усилением конкуренции между отдельными проектами, где инициаторами выступают компании и учреждения из России, Великобритании, Норвегии, Финляндии, Дании, Нидерландов, Швеции. В работу вовлечены не только известные частные бизнес-структуры, но и Международная морская организация (ИМО), университеты, грузовладельцы, судовладельцы и эксперты [2].

Философия судоходства и, в частности, судовождения, состоящая из множества методов, правил и положений, которые в настоящее время воспринимаются как догмы, для успешного развития и внедрения МАНС должна претерпеть и претерпит революционные изменения. Вместе с тем, для достижения конечной цели необходимо решить множество задач, связанных с правовым регулированием, организационными и техническими аспектами функционирования автономного флота. Одной из таких задач является создание алгоритма траектории движения МАНС как при одиночном плавании, так при плавании совместном, требующим решения задачи безопасного судоходства. Естественно, что исследования в этом направлении ведутся довольно интенсивно, но результата, удовлетворяющего требованиям надёжности и универсальности и опробованного как минимум на концептах и пилотных проектах МАНС, ещё не получено [3].

Алгоритм – это четкая, строго определённая последовательность действий, реализация которой приведёт к решению конкретной задачи. В контексте настоящего исследования задачей является определение оптимальной траектории движения морского автономного надводного судна, а алгоритм, приводящий к её решению, далее будет определяться термином «навигационный алгоритм».

В основе же грамотного и успешного в отношении конечного результата проектирования любого алгоритма лежит строгое следование базовым принципам, сформулированным при анализе проблемы и постановки задачи, для решения которой алгоритм создается. Таким образом, одним из первых этапов обоснования навигационного алгоритма является формирование кодекса принципов, т.е. совокупности законов и правил, содержащих требования к процедуре оценки и ее результату.

Обоснование кодекса принципов алгоритмизации

Судоводитель, принимая решения по выбору траектории движения судна как при планировании рейса и при его выполнении, руководствуется некоторым комплексом правил, изложенных в нормативных правовых актах, профессиональными академическими знаниями, как своим, так заимствованным опытом (хорошей морской практикой), характеристиками судна, а также собственной субъективной оценкой навигационной ситуации. Итоговая цель процесса принятия решения – получения решения оптимального. Однако пробелы в знаниях, отсутствие опыта, субъективизм оценки ситуации, когнитивные и физиологические особенности, как правило, приводит к тому, что судоводитель принимает решение, отличное от оптимального. В таком контексте чело-

веческий фактор можно определить как некоторое абстрактное отстояние принятого решения от оптимального. В навигационном алгоритме, предназначенном для функционирования в МАНС и работающим автономно, человеческий фактор отсутствует по определению, следовательно, любые генерируемые им решения и действия не могут быть не оптимальными.

Здесь следует заметить, что человеческий фактор в любом навигационном алгоритме всё-таки присутствует, так как автором алгоритма всё-таки является человек. К тому же, как априорно, так и апостериорно оценить – является ли траектория, выбранная МАНС при помощи навигационного алгоритма, оптимальной – невозможно. В этом случае, можно говорить о некотором множестве решений (множестве траекторий), которые близки к оптимальным, или о множестве квази-оптимальных решений. В любом случае, результат выполнения алгоритма должен быть, т.е. сам алгоритм должен быть конечным.

Изложенное позволяет сформулировать первые два принципа определения траектории движения морским автономным надводным судном: *принцип квазиоптимальности и принцип результативности (конечности)*.

Задача выбора траектории движения судна усложняется тем, что она является задачей многокритериальной. Выбранная траектория, являясь оптимальной по одному (частному) критерию, не является таковой по другим. Наиболее распространенный способ решения этой проблемы заключается в использовании некоторого обобщённого (агрегированного, интегрального) критерия, являющегося осуществленной по каким-либо определённым правилам свёрткой частных критериев [4].

Следует заметить, что перечень критериев (условий и обстоятельств), которые необходимо принимать во внимание при выборе траектории, можно считать только условно определённым, а значимость критериев величиной переменной. Конечно же, нельзя сказать, что множество критериев бесконечно, но частью из них можно пренебречь при определённых начальных условиях решения задачи. При этом изменение начальных условий может привести к изменению подмножества критериев, пренебрежение которыми допустимо.

Отсюда следует ещё один принцип – *принцип учёта многокритериальности и динамики множества критериев*.

С последним принципом тесно связан другой – *принцип дифференциации условий плавания (адаптации к условиям плавания)*. В соответствии с этим принципом алгоритмы выбора траектории для открытого моря, стеснённых условий плавания и пр. будет различным или, что точнее, алгоритм будет единым, но разветвляющимся после шага, предусматривающего определения характера акватории и условий плавания. Тем самым будет соблюден ещё один обязательный при построении принцип – *принцип массовости (универсальности)*, согласно которому при изменении начальных условий структура алгоритма не должна меняться.

Наличие ветвей алгоритма (внутренних алгоритмов) и особенностей навигации МАНС в открытом море, в прибрежном плавании, в узкости и пр. является предпосылкой к использованию при построении алгоритмов выбора траектории различных методов исследования и, следовательно, основанием для включения *принципа многообразия методов* в общий перечень принципов, признавая одновременно его несколько факультативный характер.

Очевидно и тривиально, что морское автономное надводное судно осуществляет навигацию отнюдь не в нейтральной, а в достаточно агрессивной среде, включающей в себя не только природную составляющую, но и суда, находящиеся в пределах той же акватории. Таким образом, при построении навигационного алгоритма необходимо рассматривать МАНС в системе с внешней средой, т.е. следовать *принципу системности*.

Движение судна – процесс непрерывный так же, как и процесс принятия решений, связанный с выбором траектории движения. Таким образом, выполнение навигационного алгоритма не может останавливаться – момент окончания очередного цикла (или момент генерации решения) должен совпадать на временной оси с моментом начала следующего цикла. Причём длительность цикла следует подбирать таковой, чтобы изменение условий, принимаемые в навигационном алгоритме за начальные, за время цикла было незначимым. В результате навигационный алгоритм будет генерировать решения, которые формально будут дискретными, а по сути – практически непрерывными. Однако не каждое сгенерированное решение должно привести к корректировке траектории движения, несмотря на то, что траектория, принимаемая по окончании каждого цикла за оптимальную, так или иначе будет отличаться от текущей траектории движения судна. Чтобы ис-

ключить хаотичные управляющие воздействия со стороны органов управления на МАНС как объект управления необходимо ввести в навигационный алгоритм некоторое ограничение его способности инициировать эти воздействия при незначительных расхождениях определённой за цикл и текущей (фактической) траекторий. Иными словами, в навигационном алгоритме необходимо принудительно сделать отличной от нуля (и возможно переменной, зависящий от некоторых условий) его «исполнительную» чувствительность. В случаях, когда расхождение траекторий будет в пределах чувствительности, алгоритм будет работать в усечённом режиме и «забывать» по окончании цикла определённую траекторию.

Приведенные умозаключения делают необходимым включение в формируемый кодекс *принципа практической непрерывности* и *принципа ненулевой чувствительности*.

Очевидно, что для эффективной реализации и получения на выходе адекватного решения алгоритм должен быть обеспечен на своем входе (в начале цикла) всей необходимой актуальной и достоверной информацией. Конечно, при разработке алгоритма можно предусмотреть возникновение информационных пробелов, которые могут случиться, например, вследствие отказа технического средства, являющегося источником той или иной информации. Однако надёжность современной техники, информационно обеспечивающей навигацию судов, достаточна для того, чтобы алгоритм выбора траектории воспринимал отсутствие необходимых для своей работы данных как невозможное событие. Более того, сама идея автономного судовождения стала бы ничтожной при появлении проблемы информационной обеспеченности. В итоге, ещё одним принципом построения алгоритма выбора траектории морским автономным надводным судном будем считать *принцип презумпции максимума информированности*.

Может случиться так, что полученная по результатам выполнения навигационного алгоритма траектория, выдаваемая им за оптимальную, в силу определённых правовых, технических или иных причин, не может быть «занята» судном. По этой причине алгоритм должен содержать некоторые правила и определяемые ими ограничения, не связанные с внешней средой как таковой и с особенностями (размерами, манёвренными характеристиками и т.п.) судна. Иными словами, при построении алгоритма должен быть реализован *принцип нормированных ограничений*.

В любой алгоритм можно включать только понятные шаги (действия), каждый из которых должен однозначно восприниматься и интерпретироваться исполнителем (компьютером). В этом заключается сущность *принципа практической применимости*.

Заключение

Таким образом, при алгоритмизации определения траектории движения морскими автономными надводными судами необходимо принимать во внимание следующие принципы:

- принцип дифференциации условий плавания (адаптации к условиям плавания),
- принцип массовости (универсальности),
- принцип многообразия методов,
- принцип системности,
- принцип практической непрерывности,
- принципа ненулевой чувствительности,
- принцип презумпции максимума информированности,
- принцип нормированных ограничений,
- принципа практической применимости.

Представленный перечень не является исчерпывающим, однако он содержит основные правила составления навигационного алгоритма, следование которым должно максимально способствовать получению эффективного инструментария для определения морским автономным надводным судном траектории своего движения. Кроме того, обоснованный в работе кодекс принципов будет способствовать более глубокому пониманию процессов судовождения и управления судна как автономного, так и пилотируемого экипажем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермаков С.В. Морские автономные надводные суда: проблемы терминологии, классификации и нормативно-правового регулирования / С.В. Ермаков, Н.Ж. Малинин, Е.В. Мулина // Новые стратегии и технологии морского судоходства и промысла. Материалы Первой национальной научно-технической конференции на базе ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет. 25 февраля 2022года. – Калининград: Изд-во БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ», 2022. – С. 81-85.

2. Коротков В.Ю. Развитие технологии морских автономных надводных судов [Электронный ресурс]. – Режим доступа URL: <https://kmu.itmo.ru/file/download/application/4149> (дата обращения: 16.09.2023).

3. Ермаков С.В. Базовая терминология теории навигационного поля / С.В. Ермаков, Е.В. Мулина // Теория и практика обеспечения навигационной безопасности на морских путях и в районах промысла: материалы II национальной научно-практической конференции (Керчь, 24-25 марта 2023 г.) / Федеральное агентство по рыболовству; Керченский государственный морской технологический университет; Калининградский государственный технический университет [и др.]. – Керчь: КГМТУ, 2023. – 82с.

4. Нелюбин А.П. Разработка методов анализа многокритериальных задач с использованием информации о важности критериев: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 05.13.18 / Нелюбин Андрей Павлович; С.-Петербур. гос. ун-т. – М., 2019. – 14 с.

GENERAL PRINCIPLES OF ALGORITHMIZATION FOR DETERMINING THE TRAJECTORY OF MARITIME AUTONOMOUS SURFACE SHIPS

¹Ermakov Sergey Vladimirovich, PhD, Nautical Institute Director;

²Mulina Elena Vadimovna, graduate student

^{1,2}Baltic Fishing Fleet State Academy FSBEI HE «KSTU»,

Kaliningrad, Russia, e-mail: sv.ermakov@bgarf.ru; mulina409@gmail.com

The paper presents the results of substantiating an open list of general principles on which the process of developing an algorithm for determining the trajectory (optimal trajectory) of movement of maritime autonomous surface vessels (navigation algorithm) should be based. Well-founded principles touch on various significant aspects of the algorithmization of solving the problem of choosing a ship's trajectory. These principles are the foundation for building a navigation algorithm.

КОНЦЕПЦИЯ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ ТЕКУЩЕГО И ПРОГНОСТИЧЕСКИХ ЗНАЧЕНИЙ СКОРОСТНОГО ПРОСЕДАНИЯ СУДНА

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

²Шевчук Данила Владимирович, аспирант Морского института

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

Обоснована концепция адаптивной системы вычисления и прогнозирования скоростного проседания судна, представляющего собой программно-аппаратный комплекс, где программная часть основана на нейронной сети, а аппаратная (техническая) состоит из спутникового компаса, предназначенного для определения осадки и её изменения, эхолота и ЭКНИС.

Основная задача системы – автоматически определять скоростное проседание судна при заданном скоростном режиме на любой момент времени – как на текущий, так и на будущий для конкретной акватории.

Введение

Вся мировая торговля связана напрямую с транспортной инфраструктурой. Перевозки грузов между континентами в большей части осуществляются мировым морским флотом. Для того, чтобы мгновенно увидеть обстановку мощного интенсивного потока судов по основным рекомендуемым путям, достаточно посмотреть на карту из программы Marinetraffic. При этом практически все заходы в порты для погрузки-выгрузки сопряжены с трудностями плавания судов в стесненных водах и на мелководье.

Одним из аспектов плавания на мелководье является скоростное проседание судов, т.е. увеличение осадки, уменьшению запаса глубины под килем, зависящие от скорости судна. Очевидно, что неправильный выбор скоростного режима при плавании на мелководье, в узкостях, каналах, фарватерах (т.е. превышение некоторого критического значения скорости) может привести к касанию грунта или посадке на мель. С другой стороны, теория даёт нам много способов и формул для определения скоростного проседания, по которым можно определить оптимальный скоростной режим, обеспечивающий необходимый запас глубины под килем. Однако в этом разнообразии способов и формул скрыта латентная опасность. Во-первых, все формулы без исключения имеют эмпирический характер. Во-вторых, каждая из них содержит методическую погрешность. В-третьих, ни одна из формул не обладает свойством универсализма (несмотря на то, что для некоторых декларируется обратное). В-четвёртых, некоторые формулы дают возможность определить проседание только одной оконечности судна.

В силу сказанного достоверность результатов любых расчётов по существующим формулам можно признать сомнительной. Причиной этого является то, что с точки зрения аналитического описания движение судна на мелководье и появление скоростного проседания являются довольно сложными физическими процессами и установление простой (а тем более эмпирической) функциональной зависимости нельзя считать эффективным решением.

Современная математика содержит более подходящие инструменты для решения подобных задач – такие, например, как нечёткая логика и нейронные сети. Нечёткая логика и нейронные сети – это математическое направление, которое является обобщённым представлением классической логики и базируется на определении нечётких множеств [1]. Эти инструменты, ко всему прочему, способствуют автоматизации решения задач, а для случая определения скоростного проседания в том числе на будущий момент времени (т.е. прогнозирования) могут лечь в основу автоматической адаптивной системы. Эта система будет предоставлять судоводителю практически достоверную информацию о скоростном проседании на любой момент времени, а судоводитель в свою очередь, оперативно принимая грамотные решения на основе этой информации, предотвратит появление критически малого запаса глубины под килем.

Обоснование концепции

Для создания автоматической системы расчёта скоростного проседания в первую очередь необходимо иметь методику автоматического определения осадки судна на ходу.

В зависимости от используемого оборудования существует пять основных способов определения осадки [2]:

- 1) визуально без использования вспомогательных средств;
- 2) по гидростатическому давлению (датчик-гидростат);
- 3) с использованием оборудования GLONASS /GPS;
- 4) с помощью ультразвуковых датчиков;
- 5) с помощью цифровой камеры и системы технического зрения.

Единственно возможно здесь видится третий способ, причём основанный на трёхантенном спутниковом компасе, способным определять не только высоту антенны над уровнем моря, но и дифферент, или иными словами способным определять осадку как носом, так и кормой (а также их изменение).

В целях обоснования концепции введём следующие обозначения и сделаем следующие допущения:

– антенна спутникового компаса расположена в диаметральной плоскости судна ($x = 0$) и имеет аппликату z ; тогда осадка на миделе, которую мы будем принимать также средней осадкой будет равна $T_{cp} = z - h$ где h – высота, измеренная спутниковым компасом;

– центр тяжести ватерлинии будем считать находящимся в диаметральной плоскости ($x_f = 0$), тогда при измеренном спутниковым компасом дифференте ψ осадки носом и кормой будут определяться следующим образом: $T_k = T_{cp} + 0,5\psi$ и $T_n = T_{cp} - 0,5\psi$.

В состав системы входит:

– блок получения, хранения, обработки, интерпретации и предоставления информации (далее – основной блок), в котором по умолчанию введена информация о длине судна и аппликате антенны;

- спутниковый компас;
- эхолот;
- ЭКНИС.

Упрощённая схема системы вычисления и прогнозирования скоростного проседания судна представлена на рисунке.

Предполагается, что система будет работать по следующему алгоритму:

– при движении судна спутниковый компас с заданной дискретностью измеряет высоту h и дифферент ψ (что равнозначно измерению осадок) и передаёт эти данные в основной блок, который «запоминает» их;

– если результаты каждого последующего измерения этих величин с учётом сглаживания не отличается от предыдущих, т.е. осадки не меняются и проседание отсутствует система (её основной блок) находится в режиме ожидания;

– если результаты измерений высоты и/или дифферента начинают меняться, т.е. начинают меняться осадки и проявляется скоростное проседание, то каждый результаты измерений слотами записываются в основной блок, при этом в каждый информационный слот входит: изменение осадок по миделю, носом и кормой (т.е. непосредственно величина скоростного проседания), скорость судна (источник – спутниковый компас), глубина (источник – эхолот), ширина канала (источник – РЛС или ЭКНИС);

– каждый информационный слот попадает на вход обучаемой нейросети и инициирует очередной цикл обучения; выходом нейросети является значения скоростного проседания по миделю, носу и корме при имеющейся скорости движения.



Рис. Упрощённая схема системы вычисления и прогнозирования скоростного проседания судна

Система может работать как в онлайн режиме, когда на дисплее будут отображаться величина скоростного проседания по миделю, носу и корме (или на выбор – запас глубины под килем), а также глубина, с которой для конкретного судна начинает проявляться скоростное проседание (т.е. глубина, с которой для него начинается мелководье), так в режиме прогнозирования. Для этого режима необходим слой электронной карты. Тогда наведя курсор на определённую часть акватории и установив скорость движения можно получить заблаговременную информацию о величине скоростного проседания или о запасе глубины под килем при конкретном режиме движения. При этом особенность обучаемой нейросети такова, что она может сгенерировать необходимую информацию даже в том случае, если судно будет осуществлять навигацию в этом районе впервые и в сходных условиях оно никогда не было.

Заключение

Вызывает некоторое удивление, что при современном развитии техники и технологий, математического инструментария, определение скоростного проседания судов базируется на приближённых эмпирических формулах и методах, большинство из которых были обоснованы ещё в прошлом веке. Действительно, теория движения судна на мелководье является настоящей классической навигационной наукой, однако никакая классика, какой бы это сферы деятельности не касалась, никогда не тормозило развитие этой сферы.

Можно было бы понять некоторый научный застой в исследованиях скоростного проседания, если бы это явление было малозначимо для судовождения. Однако здесь всё с точностью наоборот – ошибка в расчётах скоростного проседания или пренебрежение им может привести к исчезновению запаса глубины под килем и, как следствие, к навигационной аварии (в лучшем случае – к касанию грунта, в худшем – к посадке на мель).

В настоящей работе обоснована концепция метода и адаптивной системы вычисления и прогнозирования скоростного проседания судна. Эта система по сути является программно-аппаратным комплексом, т.е. набором технических и программных средств, работающих совместно для выполнения задачи вычисления и предвычисления величины скоростного проседания. В число технических средств системы входит спутниковый компас, посредством которого определяется осадка и её изменение, эхолот и электронная картографическая навигационно-информационная система, выполняющая две функции – предоставление информации о размерах акватории и отображение прогнозируемых значений скоростного проседания (запаса глубины под килем). Основой программной части является обучаемая нейронная сеть.

Как уже было сказано, метод и система в работе обоснованы на концептуальном уровне, т.е. на уровне идеи, что предопределяет наличие большого объёма исследований для её реализации. В частности, необходимо выбрать (обосновать) тип и архитектуру нейронной сети, момент окончания обучения и пр.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нечётка логика и нейронные сети [Электронные ресурс]. Режим доступа URL: https://spravochnick.ru/informatika/nechetkaya_logika_i_neyronnye_seti/ (дата обращения: 16.09.2023).

3. Ивановский А.Н. Разработка способа автоматизированного определения осадки судна с использованием технологий машинного обучения / А.Н. Ивановский, Е.Г. Зинченко, С.Г. Чёрный // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2021– Специальный выпуск 2. – С. 33–39.

CONCEPT OF AN ADAPTIVE SYSTEM FOR ASSESSING CURRENT AND PROGNOSTIC VALUES OF SQUAT

¹Ermakov Sergey Vladimirovich, PhD, Nautical Institute Director;

²Shevchuk Danila Vladimirovich, graduate student

^{1,2}Baltic Fishing Fleet State Academy FSBEI HE «KSTU»,

Kaliningrad, Russia, e-mail: ¹sv.ermakov@bgarf.ru; ²schevchuk.dan@yandex.ru

The concept of an adaptive system for calculating and predicting the squat, which is a software and hardware complex, is substantiated, where the software part is based on a neural network, and the hardware (technical) consists of a satellite compass designed to determine the draft and its changes, an echo sounder and ECDIS.

The main task of the system is to automatically determine the squat at a given speed limit at any time – both current and future for a specific water area.

УДК 551.515.2; 551.515.2

ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА ПОВТОРЯЕМОСТЬ И ИНТЕНСИВНОСТЬ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА

¹Лазарева Наталья Николаевна, канд. географических наук, доцент

¹Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ»,
Россия, e-mail: lazareva.rgu@mail.ru

Повторяемость и интенсивность наиболее опасных для мореплавания природных явлений – тропических циклонов, в северо-западной части Тихого океана, в три раза больше, чем в других районах Мирового океана. В то же время это район интенсивного судоходства. Причины возникновения ТЦ обусловлены сложной системой физических процессов, происходящих в тропической зоне при взаимодействии атмосферы и океана. Развитие науки, техники и современных технологий не позволяют до конца объяснить природу ТЦ. В этой связи была рассмотрена взаимосвязь между тропическими циклонами северо-западной части Тихого океана и циклами солнечной активности.

Введение

В последние десятилетия в северо-западной части Тихого океана наблюдаются, особенно интенсивные и мощные тропические циклоны. Для них характерны ураганные ветры, сильное волнение, ливневые осадки, плохая видимость (иногда менее 50 м), что представляет реальную опасность даже для больших морских судов. Скорость ветра в циклоне может достигать свыше 70 м/с, а высота волн превышать 20 м. Всем судам предписывается уклоняться от встречи с тропи-

ческими циклонами, а прогнозирование их повторяемости представляет практический интерес для обеспечения безопасного мореплавания в этой части Тихого океана. Причины возникновения ТЦ обусловлены сложной системой физических процессов, происходящих в тропической зоне при взаимодействии атмосферы с океаном, в том числе под влиянием космических факторов. Этой проблеме посвящено немало работ отечественных и зарубежных ученых (Барабашкина А.П., Вертельник У.В., Сутырин Г.Г, Хаин А.П., Тунеголовец В.П., Павлов Н.И., Риль Г., Грей В. И др.). В последние годы появились работы, связанные с космическим мониторингом тропических циклонов [1]. Было выявлено, что за последние 30 лет количество и интенсивность ТЦ значительно увеличились. Однако развитие науки, техники и современных технологий не позволяют до конца объяснить природу ТЦ. В этой связи была предпринята попытка проследить взаимосвязь между тропическими циклонами северо-западной части Тихого океана и циклами солнечной активности, как одного из факторов влияющего на формирование ТЦ.

I Природные условия северо-западной части Тихого океана

1.1 Рельеф

Район северо-западной части Тихого океана включает в себя западную часть Берингова моря, Охотское, Японское, Желтое, Восточно-Китайское моря и прилегающие районы открытой части Тихого океана. Акватория района составляет 20,5 млн км² и имеет меридиональное простираение примерно от 10⁰ с.ш. до 60⁰ с.ш., что существенным образом оказывает влияние на неоднородность природных условий. Рельеф дна характеризуется довольно сложным строением. Ширина шельфов колеблется от нескольких десятков километров до 700–800 км (в Беринговом, Восточно-Китайском и Южно-Китайском морях), а их глубина – от 150 до 500 м. Материковые склоны крутые, часто ступенчатые, осложненные каньонами. Для этой территории характерен контрастный рельеф дна, чередование глубоководных желобов вдоль островных дуг, интенсивная сейсмическая активность. Наибольшие котловины указанных морей колеблются в пределах 3500–7500 м. Многие из котловин осложнены поднятиями (Рис.2) [2].



Рис. 1. Северо-Западная часть Тихого океана [3].

1.2 Гидрометеорологические условия

Большая протяженность северо-западной части Тихого океана с севера на юг обуславливает неоднородность климатических и гидрологических условий. Преобладающим типом климата является муссонный. Северная часть района – Охотское море и западная часть Берингового характеризуется наиболее холодным климатом и формированием здесь устойчивого ледяного

покрова с октября по апрель. Средняя температура колеблется от -14°C до -24°C . Южнее становится теплее – средняя зимняя температура составляет от -5°C до -7°C . Самое теплое время – июль и август. На протяжении лета температура воды повышается от $+10^{\circ}\text{C}$ до $+18^{\circ}\text{C}$. Количество осадков неравномерное. На севере в среднем фиксируется 400-500 мм в год; на юге – возрастает до 1000 мм в год. Большую часть года погода зависит от влияния Сибирского антициклона. Сухие, холодные ветры с материка, в холодное время, достигают штормовой силы и не опускается ниже 10-11 м/с. Ненастная погода в зимний период обусловлена влиянием Алеутского минимума. Ближе к лету барические поля перестраиваются. На смену Сибирскому антициклону приходит Гавайский максимум, приносящий слабые юго-восточные ветры со скоростью 6-7 м/с. Вместе с потеплением летом в эти района приходят и тайфуны. Сопровождаются они выпадением тумана, повышенной облачностью, дождями и продолжаются 7-9 дней. Эти условия осложняют мореплавание, затрудняют морскую деятельность и создают аварийные ситуации. Под влиянием ветров и притока вод через Курильские проливы циркулируют течения – холодные и теплые. Район Охотского моря и западной части Берингова моря находятся в зоне приливных течений, которые далеко от берега имеют вращательный характер, а ближе к суше – реверсивный. Скорости течений различны в зависимости от близости к берегу. На открытых участках моря вода циркулирует медленно – 5-10 см/с, а в заливах и проливах разгоняется до 2-4 м/с. Особенность течений сказывается на величине суточных приливов [4].

Более южные районы северо-западной части Тихого океана (Японское, Желтое и Восточно-Китайское моря) условно можно разделить на две климатические зоны – северо-западную и юго-восточную. Более северная находится под влиянием Охотского моря и выделяется более низкими температурами. Юго-восточная характеризуется движением теплых тихоокеанских воздушных масс, которые обеспечивают мягкую погоду с более высоким температурным режимом. В целом климат в районе умеренный с выраженным муссонным характером. Средняя температура воздуха колеблется: $+25^{\circ}\text{C}$ на юге и около $+15^{\circ}\text{C}$ в северных районах. В зимнее время муссоны с материка приносят сухую ясную погоду, температура опускается до $+5^{\circ}\text{C}$ на юге и до -20°C в северной части. Летом над морем повышенная влажность, обуславливает формирование облачности и выпадение большого количества осадков.

Температура воды в разных районах зависит от времени года и глубины моря. Поверхностные течения определяются циклонами, формируют круговороты, состоящие из холодных и теплых течений. Зимой в поверхностных слоях северной части температура от -1°C до 0°C , южной от $+10^{\circ}\text{C}$ до $+14^{\circ}\text{C}$; летом до $+20^{\circ}\text{C}$ на севере, до $+27^{\circ}\text{C}$ на юге. Самым крупным среди холодных в Японском море является течение Шренка, скорость которого составляет около 9 км/ч. Среди теплых течений отмечают: Куроисио; Цусимское; Соя.

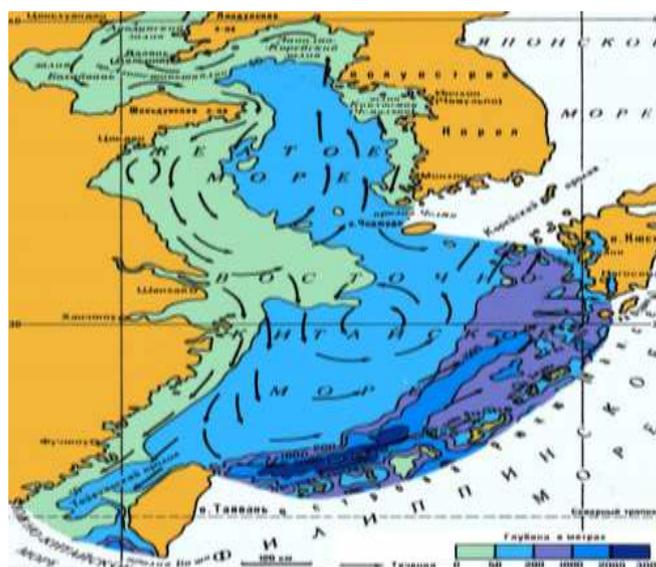


Рис. 2. Рельеф дна и течения Желтого и Восточно-Китайского морей [5]

В целом, влияние Японского, Желтого и Восточно-Китайского морей на климат различается по сезонам. Зимой водоем обогревает побережье и обеспечивает более высокие температуры, чем на тех же широтах в глубине материка. Летом наблюдается обратная картина, ветер дует с моря на сушу и образуется летний муссон. Немало важную роль на циркуляцию атмосферы и направление течений оказывает влияние Северо-Тихоокеанский максимум. Характерной особенностью района являются периодические тайфуны, которые бывают везде, кроме северной части акватории. Скорость тайфунов может достигать 175 км/ч[6].

II Образование тайфунов

Главный район зарождения тропических циклонов в Тихом океане находится южнее Северного тропика, к востоку от Филиппинских островов. Как известно тропики являются областью основных источников тепла во всей атмосфере. Температура поверхностного слоя воды превышает здесь 26 °С и является главным условием сильного испарения с поверхности океана и насыщение вихря водяным паром.

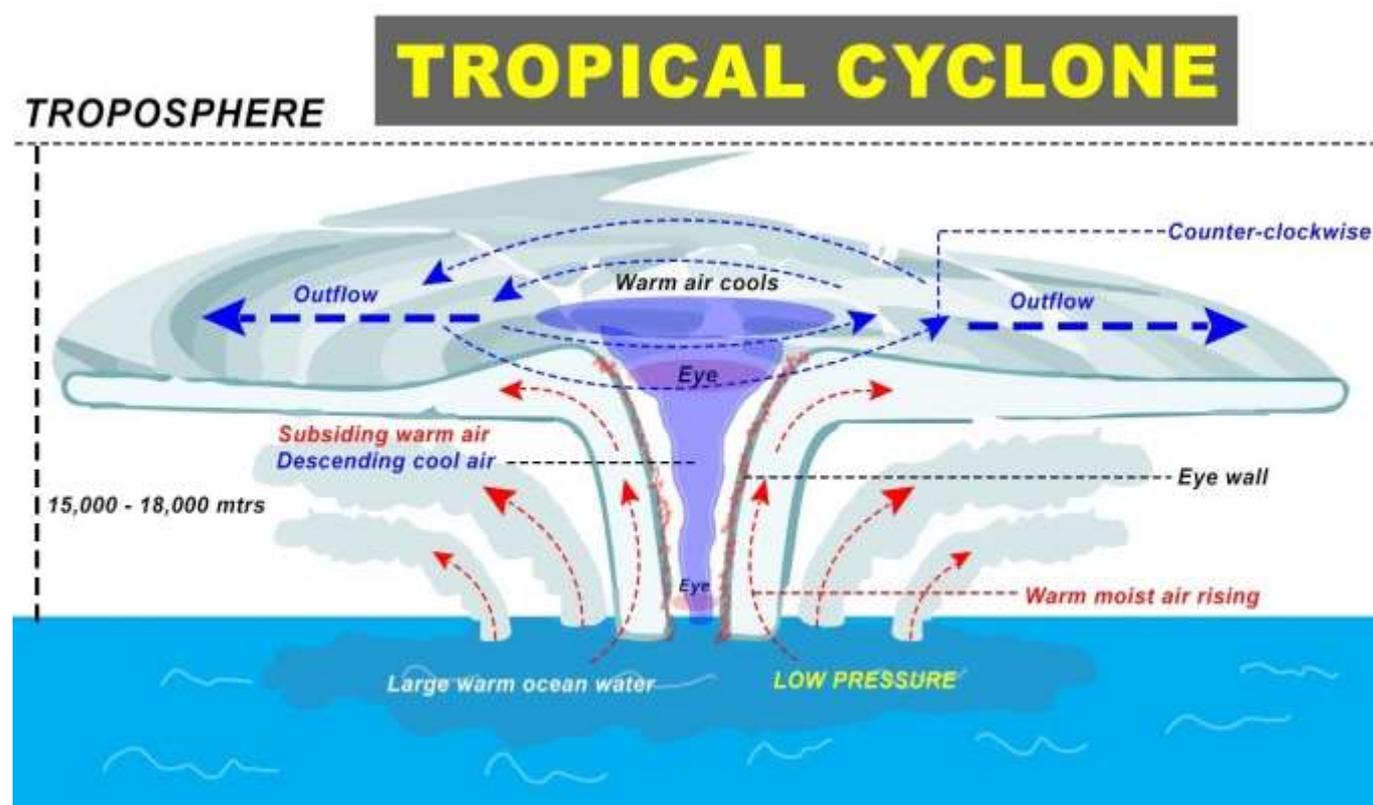


Рис. 3 Формирование тропического циклона [7]

Перемещаясь первоначально к западу и северо-западу, они достигают берегов Юго-Восточного Китая и перемещаются вдоль континента, отклоняясь к Японским и Курильским островам. Прохождение тропических циклонов сопровождается: ветрами разрушительной силы; сильным волнением в открытом море; сильнейшими ливнями; затоплением равнин на прилегающей суше; наводнениями и разрушениями.

Для образования тропических циклонов необходимо наличие мощного слоя влажного неустойчивого экваториального воздуха; наличие пассатов или муссонов. Пассаты – постоянные ветры глобальной циркуляции Земли, дующие от тропиков к экватору: в северном полушарии имеют северо-восточное направление, в южном полушарии – юго-восточное. Муссоны – сезонные ветры, возникающие на границе материка и океана, меняющие свое направление по сезонам года из-за неравномерного нагрева суши и моря. Важно также наличие уже установившейся зоны низкого давления или нестабильной погоды, незначительной изменчивости ветра с высотой в нижней тропосфере в районе формирования ТЦ (рис.3).

Накопление тепловой энергии за счет испарения и увеличения запасов влаги в воздухе способствует его вертикальному подъему, а сила Кориолиса придает вихревое движение (против часовой стрелки в северном полушарии, и по часовой в южном) в результате образуется воронка с “глазом бури ” в центре. После зарождения они движутся по параболе – с востока на запад по экваториальной ветви, после точки поворота направление меняется в северном полушарии на северо-восток, в южном на юго-восток по полярной ветви параболы (Рис.4) [2].



Рис.4. Траектория тропического циклона [7]

Поскольку ТЦ достаточно непредсказуемые и преимущественно океанические, они заслуживают особого внимания судоводителей. Тропический шторм может иметь обманчиво малый размер и в пределах нескольких сотен миль может наблюдаться хорошая погода. Быстроту, с которой погода может ухудшиться при приближении циклона и силу полностью развившегося циклона достаточно тяжело представить, если никогда с ним не сталкиваться. В этой связи прогнозирование повторяемости тайфунов имеет большое значение для практики мореплавания. Формирование циклона сложный физический процесс, зависящий от многих природных факторов, одним из которых является солнечная активность.

III Особенности циклональной деятельности С-З части Тихого океана и ее связь с солнечной активностью

3.1. Особенности циклональной деятельности С-З части Тихого океана

Статистические данные показывают, что самое большое количество тропических циклонов, наблюдаемых в Мировом океане, приходится на С-З часть Тихого океана. Каждый год, как минимум 5 из них, достигает силы ветра более 130 узлов. Большинство этих циклонов формируется на востоке от Филиппин и движутся по Тихому океану навстречу Японии, Филиппинам и Китаю, также некоторые тропические циклоны формируются в южной части Китайского моря. Сезон тропических циклонов длится с апреля по декабрь. Но самое пиковое время – с июля по октябрь, где случаются около 70% всех тропических циклонов [6].

На протяжении ряда лет учеными предпринимались попытки объяснить природу более интенсивного проявления ТЦ северо-западной части Тихого океана.

Повторяемость тропических циклонов с 1977-2022 гг.

Район	Среднее число тропических циклонов за год	В процентах от общего числа тропических циклонов
Северо-западная часть Тихого океана	25	31
Северо-восточная часть Тихого океана	16	21
Северо-западная часть Атлантического океана, включая Карибское море и Мексиканский залив	10	13
Южная часть Тихого океана	8	10
Южная часть Индийского океана	8	10
Бенгальский залив	7	9
К северо-западу от Австралии	3	3
Аравийское море	3	3

Повторяемость тропических циклонов в Мировом океане по статистическим данным приведена в таблице.1.

3.2. Солнечная активность и числа Вольфа

Влияние Солнца на земные процессы отмечалось давно. Солнечная активность – это совокупность физических явлений, сопровождаемых изменением различных параметров деятельности Солнца и фиксируемых с помощью всевозможных средств наблюдения. Самые первые замеченные человеком проявления солнечной активности – солнечные пятна. Они явились первыми элементами инструментальных наблюдений солнечной активности (числа Вольфа). Солнечные пятна связаны с интенсивными магнитными полями, которые могут быть в десятки тысяч раз сильнее, чем магнитное поле Земли. Эти магнитные поля генерируются движением плазмы в конвективной зоне Солнца. Число солнечных пятен меняется со временем и средний период этого изменения равен 11,1года, но может варьировать от 7 до 17 лет по максимумам, а по минимумам от 9 до 14 лет. Они появляются в среднем в начале цикла на широте $\pm 30^{\circ}$ от экватора Солнца, а в конце (в среднем на широте $\pm 8^{\circ}$). Отсюда, и появился термин солнечный цикл. [8] Числа Вольфа являются мерой солнечной активности и используются для отслеживания ее изменения со временем. Они рассчитываются по формуле

$$W=10q+f, \quad (1)$$

где, W числа Вольфа; q – число групп солнечных пятен; f – общее число пятен.

Влиянию солнечной активности на повторяемость и интенсивность ТЦ посвящена значительная часть исследований. Тематики, на которые были сосредоточены основные усилия ученых, могут быть сгруппированы в 3 категории: прямое воздействие солнечных лучей на температуру поверхности Земли характеризующейся общим солнечным облучением – TSI (Total Solar Irradiance); косвенное воздействие солнечных лучей путем поглощения ультрафиолетового излучения в верхней стратосфере, связанной с озоновой химией; косвенное воздействие солнечных лучей в совокупности с заряженными частицами путем проникновения космического луча в тропосферу [9]. В исследованиях с 1977 по 2022года, использовались различные математические модели, симуляции интенсивности Солнца, корреляции с другими катаклизмами и прочее. Кратко резюмируя все исследования, составлена таблица наиболее важных открытий (табл.2) [10].

3.3 Связь повторяемости ТЦ северо-западной части Тихого океан с проявлением солнечной активности.

На основании сводной таблицы (Табл.2) отмечаем, что солнечные циклы являются определяющими для метода оценки взаимосвязи повторяемости тропических циклонов и солнечной ак-

тивности. Исследования Мацареллы и Палумбо, основанные на сборе данных с 1950 по 2005 года, присутствует небольшое увеличение количества тропических циклонов в года наибольшей солнечной активности [11]. В то же время отчетливо прослеживается взаимосвязь между солнечными пятнами и интенсивностью тропических циклонов.

Для собственных исследований влияния солнечной активности на повторяемость и интенсивность тропических циклонов в С-З части Тихого океана использованы данные с сайта японского метеорологического агентства - RSMC Токуо, и рассматривались тропические циклоны в период с 1977 по 2022года, охватывающие с 21по 25 солнечные циклы. RSMC Токуо состоит из 12метеорологических центров и каждый дает информацию по циклону каждые 6 часов с указанием координат центра циклона, максимальной скорости ветра и давления ветра.

Годовые значения количества тропических циклонов по всему земному шару, рассчитанные в период с 1977 по 2022года, для удобства были переведены на график (Рис.5). Также выделены максимальные стадии развития тропических циклонов в северо-западной части Тихого океана за этот же период времени (Рис.6).

Таблица 2

Обзор исследований, характеризующих зависимость тропических циклонов от солнечной активности

Ученые	Года	Выводы
Mazzarella, Palumbo [10].	1989	Образование тропических циклонов тесно связаны с 11-летними солнечными циклами
Tinsley, Heelis	1993	Давление зависит от межпланетного магнитного поля
Lander, Saunders, Wang & Chan	1994, 2000, 2022	Активность тропических циклонов в Северо-западной части Тихого океана связана с явлениями Эль-Ниньо и Ла-Нинья
Veretenenko, Thejll	2004	Температура поверхности моря связана с солнечными энергетическими частицами
Trenberth	2005	Существует связь между глобальным потеплением и тропическими циклонами
Choi & Moon [12].	2012	Длительность тропического циклона увеличивается из-за эффекта Эль-Ниньо
Kossin	2014	Установлено изменение расположения средней широты в которой тропический циклон достигает своей максимальной интенсивности
Zhou	2016	Температура поверхности моря имеет связь с солнечной скоростью ветра

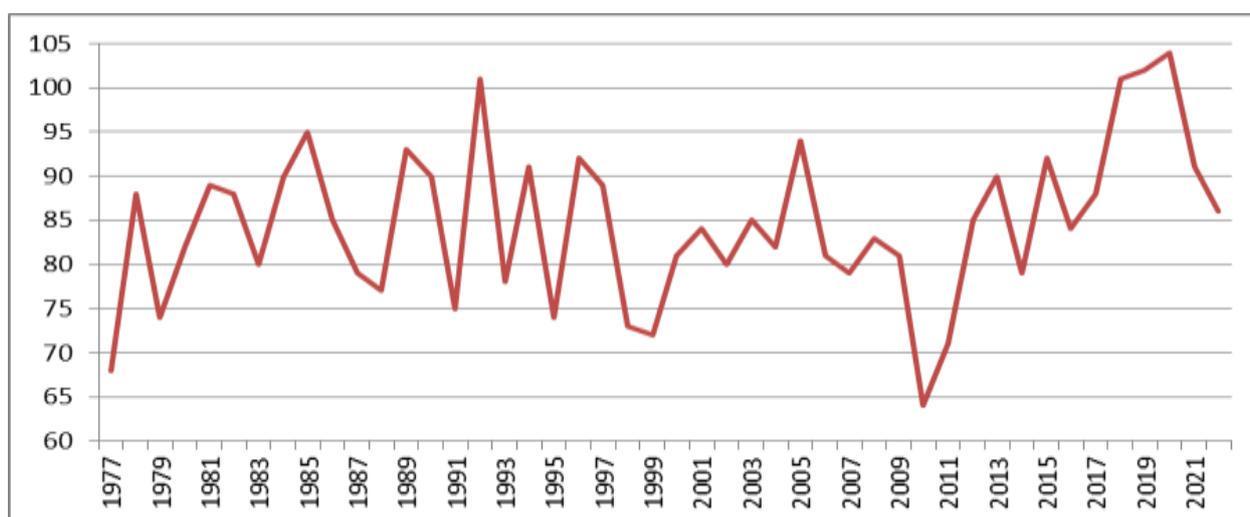


Рис. 5. График тропических циклонов с 1977 по 2022года по всему Земному шару

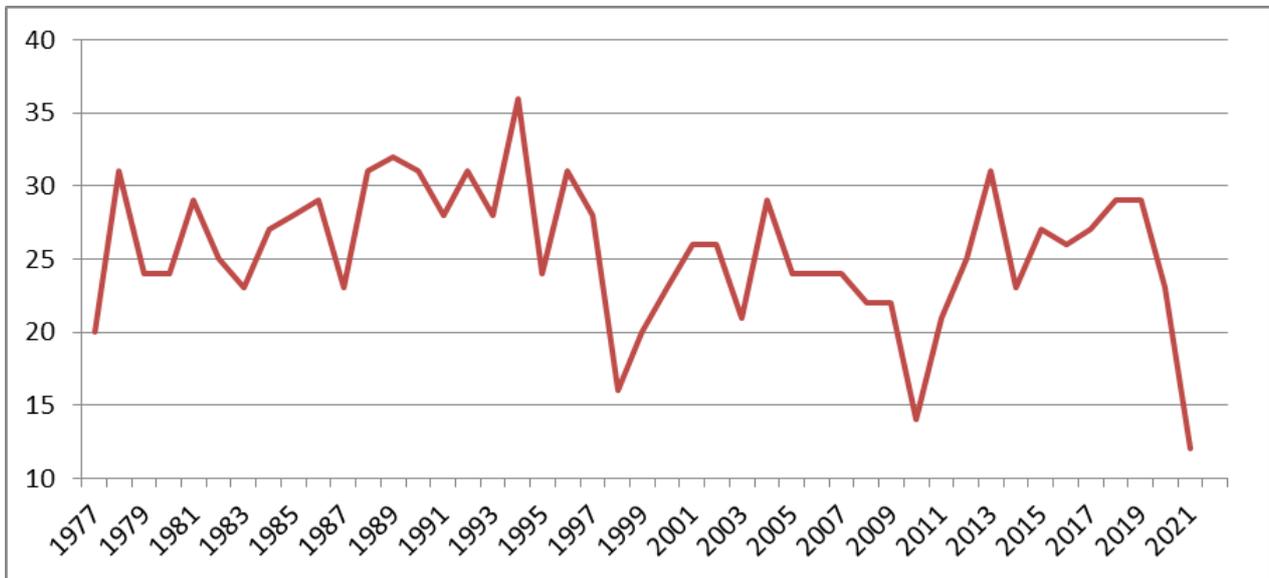


Рис.6. Количество тропических циклонов в северо-западной части Тихого океана с 1977 по 2022года

На графике (Рис. 6) можно увидеть три волны активности тропических циклонов, границы которых приходятся на их минимальные значения в 1977, 1998, 2010, 2021года. На основании графика (Рис.6) была составлена таблица (Табл.3) с наибольшими и наименьшими значениями солнечной активности в северо-западной части Тихого океана.

Таблица 3

**Наибольшие и наименьшие значения солнечной активности
в Северо-Западной части Тихого океана**

№ п/п	Года с максимальной солнечной активностью	Года с минимальной солнечной активностью
1	1970	1976
2	1981	1987
3	1989	1997
4	2001	2010
5	2013	2020

Сравнение данных (Рис.6) и таблицы (Табл.3) показало, что наименьшее количество тропических циклонов случилось в годы с минимальной солнечной активностью. Тогда как в годы с максимальной солнечной активностью наблюдалось наибольшее количество тропических циклонов.

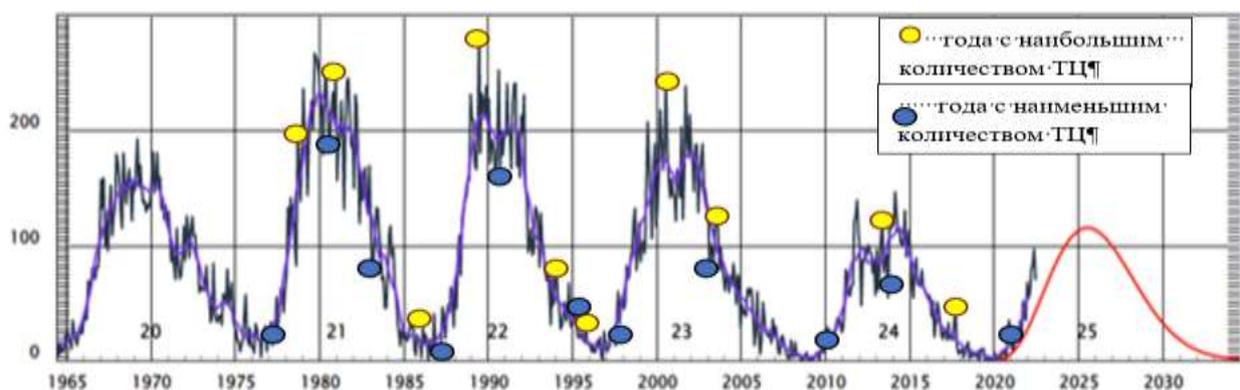


Рис. 7 График зависимости образования тропических циклонов в С-З части Тихого океана под влиянием солнечной активности (20,21,22,23,24,25 -циклы солнечной активности по среднемесячным числам Вольфа)

На основе статистических данных Северо-Западной части Тихого океана (Рис.6) составлена таблица наибольших и наименьших значений солнечной активности за указанный период. Для взаимосвязи между тропическими циклонами и солнечной активностью, составлена таблица всех экстремумов – наибольших и наименьших значений тропических циклонов (Табл. 4).

Таблица 4

Наибольшие и наименьшие значения тропических циклонов С-З части Тихого океана за 21, 22, 23, 24 и 25 циклы солнечной активности

Циклы солнечной активности	Наибольшие значения		Циклы солнечной активности	Наименьшие значения	
	Год	Количество тропических циклонов		Год	Количество тропических циклонов
21	1978	31	21	1977	20
21	1981	29	21	1980	24
22	1986	29	21	1983	23
22	1989	32	22	1987	23
22	1994	36	22	1995	24
23	1996	31	23	1998	16
23	2001	26	23	2003	21
23	2004	29	24	2010	14
24	2013	31	24	2014	23
24 24	2018	29	25	2021	12

Сопоставление графика солнечной активности (Рис.7) наименьших и наибольших значений тропических циклонов северо-запада Тихого океана (Табл. 4) позволило выявить определенную цикличность в поведении тропических циклонов в соответствии с изменениями и солнечной активности. Наибольшие и наименьшие значения повторяемости тропических циклонов в основном, прослеживаются в максимальных значениях солнечной активности (максимумах и минимумах). Необходимо отметить, что в минимумах солнечной активности наблюдается меньшее количество тропических циклонов. Таким образом можно предположить, что на повторяемость тропических циклонов влияет ход солнечной активности.

Влияние интенсивности солнечной активности на интенсивность тропических циклонов было рассмотрено на примере развития тропического циклона «Mawar» (с 18.05.2023г. по 31.05.2023г.). Стадии его формирования совпадают со временем и динамикой вспышки солнечной активности, происходившей в этот же отрезок времени.

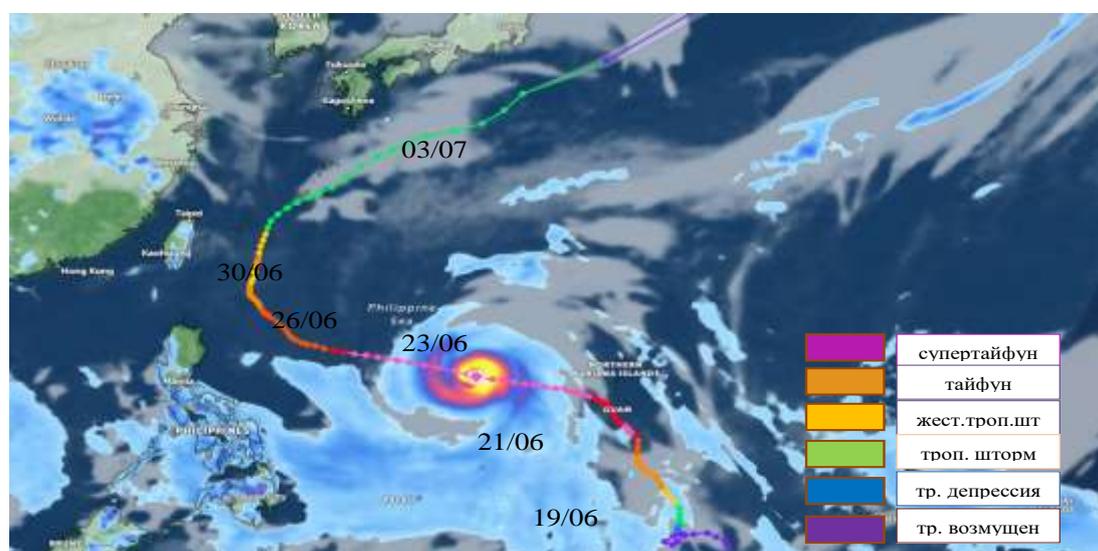


Рис. 8. Стадии развития тайфуна «Mawar»



Рис. 9. Количество солнечных пятен в период солнечной активности с 18 по 31 мая 2023 года

Причем, наибольшая интенсивность циклона «Mawar» и превращение его в супертайфун 23 мая (Рис.8), также приходится на момент наибольшей вспышки солнечной активности 23 мая в соответствии с составленным графиком (Рис. 9). Угасание тайфуна совпадает с ослаблением солнечной активности.

Таким образом, были изучены природные условия и гидрометеорологические особенности северо-западной части Тихого океана, даны характеристики цикличности солнечной активности, рассмотрена повторяемость тропических циклонов. Для собственных исследований влияния солнечной активности на повторяемость и интенсивность тропических циклонов в С-З части Тихого океана были использованы данные с сайта японского метеорологического агентства - RSMC Токуо, и рассматривались тропические циклоны в период с 1977 по 2022 года, охватывающие с 21 по 25 солнечных циклы. Сравнение вспышки на солнце и динамики супертайфуна «Mawar» в один и тот же отрезок времени подтвердило прямую зависимость интенсивности тропических циклонов северо-западной части Тихого океана от влияния на них солнечной активности. На основании проделанной работы была выявлена корреляция между циклами солнечной активности, повторяемостью и интенсивностью тропических циклонов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Верятин В.Ю. Комплексный мониторинг тропических циклонов, оказывающих влияние на Дальневосточные регионы России: автореф. дис. канд. геогр. наук – Москва 2019 г.
2. Морской энциклопедический справочник: в т. 2, Исанин Н.Н. 1987.
3. Северо-Западная часть Тихого океана. //Электрон. дан. Режим доступа URL <https://ozeraireki.ru/images/images/images992/techeniya1.jpg> (дата обращения 12.08.2023).
4. Климат Охотского моря, господствующие ветры, теплые и холодные течения //Электрон. дан. Режим доступа URL <https://global-ocean.ru/geografiya/klimat-oxotskogo-morya-gospodstvuyushhie-ventry-tyoplye-i-xolodnye-techeniya/> (дата обращения 12.08.2023)
5. Восточно-Китайское море //Географический атлас. – М.: ГУГК, 1982–238 с.
6. Пермяков М.С. Тропические циклоны: формирование и развитие, взаимодействие с океаном. – Владивосток, 2007. – 259 с.
7. Track of typhoon “AMBO” [VONGFONG] //Электрон. дан. Режим доступа URL i1/wp.com
8. Витинский Ю.И. Цикличность и прогнозы солнечной активности. – Л.: Наука, 1973 – 258с.
9. Friis-Christensen & Lassen. Solar magnetic activity to various climatic phenomena – Odense, 1991.
10. Jung-Hee-Kim, Ki-Beom Kim, Neon-Young Chang. Solar Influence on Tropical Cyclone in Western North Pacific Ocean – Kyungpook, 2017.
11. A. Mazzarella and A. Palumbo. Earth’s rotation and solar activity. / Dipartimento di Geofisica e Vulcanologia, Uniuersith di Napoli, Largo S. Marcellino 10, 80138 Napoli, Italy – Geophysical Journal (1988) 97, p.169-171.

INFLUENCE OF SOLAR ACTIVITY ON THE FREQUENCY AND INTENSITY OF TROPICAL CYCLONES IN THE NORTHWESTERN PART OF THE PACIFIC OCEAN

¹Lazareva Natalya Nikolaevna, Associate Professor

¹Baltic Fishing Fleet State Academy FSBEI HE «KSTU»,
Kaliningrad, Russia, e-mail: lazareva.rgu@mail.ru

The frequency and intensity of the most dangerous natural phenomena for navigation—tropical cyclones—in the northwestern part of the Pacific Ocean is three times greater than in other areas of the World Ocean. At the same time, this is an area of intense shipping. The reasons for the occurrence of TCs are due to a complex system of physical processes occurring in the tropical zone during the interaction of the atmosphere and the ocean. The development of science, technology and modern technologies do not allow us to fully explain the nature of TCs. In this regard, the relationship between tropical cyclones of the northwest Pacific Ocean and solar activity cycles was examined.

УДК 656.085

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ РИСКА ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ И АВАРИЙ В МОРСКИХ ПОРТАХ

¹Лобкова Катрин Эдуардовна, старший преподаватель кафедры организации перевозок БГАРФ, аспирант КГТУ;

²Мойсеенко Сергей Сергеевич, д-р пед. наук, канд. техн. наук, профессор, профессор кафедры организации перевозок БГАРФ

^{1,2}Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ», Калининград, Россия, e-mail: ¹lobkova.ke@bgarf.ru; ²moyseenko.ss@bgarf.ru

Среди первостепенных факторов, оказывающих влияние на морские порты, следует назвать их безопасность, которая должна быть обеспечена в необходимой степени. В морских портах происходят различные операции, связанные с перевозкой грузов и пассажиров, производством погрузо-разгрузочных операций, обслуживанием судов и другими видами деятельности, которые могут быть связаны с рисками возникновения чрезвычайных ситуаций. Эти риски могут быть вызваны различными причинами, к примеру, погодные условия, природные катаклизмы, технические сбои оборудования, человеческий фактор, террористические акты и другие. Задача предотвращения или снижения негативного их воздействия является весьма важной, а факторы риска возникновения чрезвычайных ситуаций и аварий нуждаются в анализе, и даже прогнозе той или иной ситуации в каждом морском порту.

Морские порты представляют собой важные прибрежные транспортные узлы, где происходит сопряжение морского транспорта с внутренним (железнодорожным, автомобильным). Вопросы обеспечения безопасности всегда были и остаются важнейшими вопросами в развитии транспорта, в частности морского. Морские перевозки являются одними из наиболее рискованных видов транспорта, а поэтому обеспечение безопасности в морских портах имеет ключевое значение. Под инцидентами, чрезвычайными ситуациями и авариями понимают различные происшествия, несущие за собой негативные последствия для судна, груза, техники, рабочих, порта и окружающей среды в целом.

Современные технологии и системы, такие как спутниковая навигация, радиолокационные и гидроакустические системы, а также средства спасения человека на море, играют важную роль в обеспечении безопасности на морском транспорте. Эти системы позволяют оперативно отслежи-

вать положение судов и реагировать на угрозы, связанные с погодными условиями, столкновениями судов и другими факторами риска не только в процессе мореплавания, но и при нахождении судов в акваториях портов [1].

Международной морской организацией (ИМО) разработан комплекс различных документов и рекомендаций в области обеспечения безопасности в морских портах и на транспорте. Основными документами являются Международный кодекс управления безопасностью (МКУБ) и Формальная оценка безопасности (FSA). МКУБ определяет основные требования к управлению безопасностью на судах и в морских портах, а FSA позволяет проводить оценку рисков и принимать меры по снижению этих рисков.

Кроме того, ИМО регулярно проводит обучающие программы и семинары для морских специалистов по вопросам обеспечения безопасности. Все эти меры помогают поддерживать высокий уровень безопасности и минимизировать риски возникновения чрезвычайных ситуаций на морском транспорте [2].

Каждая из групп рисков может включать несколько видов рисков, связанных с определенными причинами их возникновения. Например, природные риски могут включать риски, связанные с погодными условиями, изменением уровня моря, природными катастрофами (такими как землетрясения, цунами, тропические циклоны, сход лавин и прочие) и другими природными факторами. Морские порты и вся прибрежная транспортная инфраструктура, которая обеспечивает непрерывное функционирование разных портовых терминалов, особенно подвержены влиянию природных и климатических факторов. Окромя ущерба портовой инфраструктуре и перегрузочному оборудованию, последствия негативного природного воздействия могут также вызвать серьезные сбои в работе порта и привести к значительным потерям [3].

Техногенный риск выражает вероятность аварии или катастрофы при эксплуатации перегрузочных машин и механизмов, реализации основных и вспомогательных технологических процессов. К данной группе рисков относят такие, как возникновения пожаров (на терминала, складе, в транспортном средстве); загрязнения окружающей среды; выход из строя основной перегрузочной единицы, а так же главного двигателя на судне, судовых систем и механизмов; аварии кранов, транспортных средств и технологических линий в портах; аварии на подъездных путях, экологические (разлив топлива, ядохимикатов, взрывы опасных грузов и др.).

Эксплуатационные риски представляют собой такие риски, которые непосредственно связаны с ненадлежащей эксплуатацией перегрузочных средств, транспорта, складов, как производственно-технологических объектов. К группе таких рисков относят: потеря/порча груза; потеря орудий лова; отказ технических средств; простой транспортных средств и технологических линий в порту и прочее.

Экономические риски, в свою очередь, составляют группу, которая включает в себя инвестиционные риски, риски потери груза/фрахта, потери транспортных средств, риски убытков вследствие изменения ситуации на рынках, экономических кризисов, ошибок планирования и управления и прочее. [4]

Рассматривая факторы риска возникновения чрезвычайных ситуаций и аварий при заходе судна в порт, при стоянке на рейде, швартовке, при выполнении погрузо-разгрузочных операций и при отходе судна из порта следует отметить следующее [5]:

1. среди основных причин возникновения чрезвычайных ситуаций и аварий в морских портах выделяют: природно-климатические, техногенные, эксплуатационные, профессиональные (человеческий фактор), экономические, социальные.

2. среди основных рисков возникновения чрезвычайных ситуаций и аварий в морских портах выделяют:

- потери судна, груза, фрахта, а также гибель людей при природно-климатических причинах возникновения;

- повреждения корпуса судна, навал судна на причал, отказ технических средств механизации, возникновения пожара, разлива топлива и др. при техногенных причинах возникновения;

- снижение эффективности работы перегрузочного оборудования вследствие нарушения правил их технической эксплуатации при эксплуатационных причинах возникновения;

- принятие неэффективных или ошибочных управленческих решений, неквалифицированный подход к вопросам организации и выполнения погрузо-разгрузочных работ, решению различных технических вопросов и др. при профессиональных причинах возникновения (человеческий фактор);

- неэффективное вложение или потеря инвестиций, потеря груза, транспортных средств, перегрузочных устройств и механизмов, риск несения убытков вследствие экономических кризисов, изменения ситуации на мировых рынках, ошибок планирования и управления и прочее, при экономических причинах возникновения;

- получение травм, увечий, а также гибель людей при социальных причинах возникновения чрезвычайных ситуаций и аварий в морских портах.

3. среди основных последствий возникновения чрезвычайных ситуаций и аварий в морских портах целесообразно отметить следующие:

- конструктивные повреждения судна, гибель судна, потеря груза, гибель членов экипажа в результате природно-климатических причин возникновения;

- разрушение транспортных средств, перегрузочной техники, складов огнем, а также их конструктивное разрушение, потеря или порча груза, разрушение причалов и повреждение технических средств механизации в результате техногенных причин возникновения;

- невыполнение сроков доставки груза, производства погрузо-разгрузочных работ, потери/порчи груза, простои транспортных средств, технологических линий и перегрузочного оборудования при эксплуатационных причинах возникновения;

- снижение уровня эффективности работы технологических линий, возникновение аварийных ситуаций, потеря перегрузочной техники, транспортных средств, складов, грузов, и др. при профессиональных причинах возникновения чрезвычайных ситуаций и аварий в морских портах (человеческий фактор);

- потеря экономической целесообразности и финансовые потери при экономических причинах;

- социальный и индивидуальный ущерб.

Ко всем объектам портового хозяйства, в части их безопасной эксплуатации, законодательство предъявляет жесткие требования. В частности, в каждом порту разрабатываются собственные отраслевые документы, регулирующие порядок:

- создания, реконструкции и ремонта, эксплуатации и поддержания в должном состоянии материально-технической базы морского порта;

- безопасного ведения погрузо-разгрузочных и вспомогательных работ;

- порядок поддержания необходимой готовности персонала и технических средств, к реагированию на возможные негативные ситуации или уже случившиеся ЧС и аварии.

С точки зрения экологической безопасности, что ввиду мировых тенденций сейчас является весьма актуальным вопросом, порт обязан принимать различные меры, которые направлены на предотвращение аварий, и ликвидацию или ограничение последствий; меры по защите людей, окружающей среды и экономики, в целом, от влияния негативных факторов и возможных последствий; а также разрабатывать и применять системы раннего выявления и оповещения людей в случае возникновения чрезвычайной ситуации. На ряду с этим, руководство морского порта обязано сообщать органам исполнительной власти и местного самоуправления об аварии, которая произошла на предприятии, и о мерах, принятых для ликвидации её последствий. В процессе своей деятельности, порту необходимо обеспечивать эксплуатацию объектов повышенной опасности, из совокупности которых в принципе состоит портовая инфраструктура и складывается вся его деятельность, с соблюдением минимально возможного риска.

Функциональные подразделения портов традиционно формируются из числа гражданских лиц с соответствующей специализацией. Для решения вопросов повышения качества подготовки специалистов для выполнения задач портового контроля безопасности в состав береговой охраны можно привлекать инспекторский персонал СКМП, который в большинстве состоит из офицеров запаса Военно-морского флота России (ВМФ), а следовательно, в дальнейшем это исключит проблемы с необходимостью соответствующей переаттестации. В перспективном развитии, в виду того, что многие порты располагаются в приграничной зоне, для выполнения задач обеспечения безопасного функционирования всей портовой системы, можно рассматривать привлечение выпускников Института береговой охраны ФСБ России, прошедших необходимую профессиональную подготовку по направлению деятельности порта. Такие меры позволят создать своеобразную «закольцованную» службу безопасности морского порта, функционирование которой будет оправдано даже на уровне небольших морских портов [4].

Система, так называемая «человек – судно – окружающая среда» находится под воздействием трёх главных факторов: воздействие внешней среды, внутренние отказы и профессиональный фактор, т.е. ошибки человека [5]. Все эти факторы характеризуются своими особенностями в тех или иных конкретных ситуациях и могут проявляться как в сочетании, так и каждый по отдельности. К примеру, риски судна, заходящего в порт, включают в себя такие факторы, как погодные условия, глубина и состояние дна в районе порта, течения, наличие препятствий на пути следования судна, техническое состояние судна, действия членов экипажа и диспетчеров морского порта.

Погодные условия могут включать в себя сильный ветер, волнение, температура воды и воздуха, морские течения, ограниченная видимость (густой туман, сумерки/ тёмное время суток, низкая облачность, осадки и прочее), атмосферное электричество (гроза в вероятностью удара молнии) и т.д. Перечисленные факторы могут затруднить маневрирование судна и увеличить риск навала судна на причал или столкновения с другими судами и препятствиями в акватории морского порта.

Глубина и состояние дна в районе порта могут также представлять риск для судна. Недостаточная глубина может привести к сцеплению судна с дном (посадка на мель), что может привести к повреждению корпуса судна, потери груза, блокировке движения судов на входе/выходе из порта. Неровное или слишком мягкое дно также может затруднить маневрирование судна.

Течения могут повлиять на скорость и направление движения судна, что, в свою очередь, может привести к нежелательным последствиям. Наличие препятствий на пути следования судна, таких как мосты, причалы, затонувшие суда или мусор, также может привести к непредвиденным ситуациям.

Швартовка/ отшвартовка судна - это процесс подхода/ отхода судна к/от берега и привязывание/ отсоединение его к/от причала. Во время этого процесса тоже есть риски, которые могут возникнуть. Вот некоторые из них:

1. Риск столкновения: если судно не будет правильно направлено и установлено при швартовых операциях, может произойти столкновение с другими судами, навал на причал порта и повреждение объектов, расположенных непосредственно на причалах (средства механизации погрузо-разгрузочных работ, склады и т.д), что может привести к повреждениям самого судна, груза, объектов портовой инфраструктуры и другим имущественным ущербам.

2. Риск поражения экипажа: во время швартовки/отшвартовки, экипаж может быть поражен канатами или другим оборудованием, что может привести к серьезным травмам или даже смерти.

3. Риск несоответствия оборудования: если швартовое оборудование не соответствует требованиям безопасности или неисправно, это может привести к травмам персонала или повреждению судна и причала.

4. Риск погодных условий: неблагоприятные погодные условия, такие как сильный ветер, обледенение, плохая видимость или прилив/отлив, могут затруднить процесс швартовки/отшвартовки и, опять же, увеличить риск столкновения или повреждения судна и портовой инфраструктуры.

5. Риск организационных ошибок: ошибочные решения экипажа, такие как неправильная коммуникация или неправильное использование оборудования, нарушение инструкций, нештатные решения, принимаемые береговыми службами и судоводителями, некачественная профессиональная подготовка экипажа, а также ухудшение психофизиологического состояния персонала – всё это может привести к опасным аварийным ситуациям при выполнении судна манёвров, а частности при швартовых операциях.

Таким образом, швартовка/отшвартовка судна является рискованным процессом, и поэтому требует высокой степени внимания, осторожности и профессионализма со стороны экипажа. Так называемый риск отсутствия контроля (процесс маневрирования не контролируется должным образом) может привести к массе нежелательных последствий, таких как ущерб порту, судну, порча груза и травмы экипажа.

В результате выполненного анализа факторов риска возникновения чрезвычайных ситуаций и аварий, можно выделить факторы, оказывающие наибольшее негативное влияние на безопасность в морских портах: гидрометеорологический, фактор времени, конструктивный и профессиональный (человеческий фактор) [5].

Для снижения рисков возникновения ЧС в морских портах необходимо регулярно проводить анализ и определять возможные риски, которые могут привести к авариям и другим негатив-

ным последствиям, рассчитывать их количественные оценки. В рамках такого анализа следует учитывать все возможные факторы, включая технические, экологические, социальные и другие аспекты. На основе этого анализа необходимо разрабатывать планы мероприятий по предотвращению возникновения ЧС и минимизации их последствий. Такие планы могут включать в себя меры по обучению персонала, разработке процедур безопасности, техническому обслуживанию оборудования, проведению регулярных инспекций и т.д.

Кроме того, важно установить систему мониторинга и контроля за ситуацией в морском порту, которая позволит оперативно реагировать на возможные угрозы и предотвращать возникновение ЧС. Сочетание всех этих мер - законодательных, организационных, технологических и нормативно-правовых мероприятий, позволит обеспечить безопасность в морских портах и защитить жизнь и здоровье людей, а также окружающую среду.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сигаев Д.Б., Шатыло А.П. Пути реализации потенциала профессии судоводителя как фактор повышения безопасности мореплавания // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. 2019. №4.

2. Дмитриев С.Н. Совершенствование системы реализации функций органов государственного управления и контроля в сфере обеспечения безопасности объектов морского транспорта // Общество и право. 2019. №3 (69).

3. Европейская экономическая комиссия, 2019 год, доклад Группы экспертов по последствиям изменения климата для транспортных сетей и узлов и адаптации к ним, ECE/TRANS/WP.5/GE.3/36, Женева, 27 июня;

4. Недоцуг В.Е. Виды рисков возникновения чрезвычайных ситуаций // Мировая наука. 2019. №12(33).

5. Мойсеенко С.С., Мейлер Л.Е. Управление рисками в мореплавании и промышленном рыболовстве: учебное пособие для студентов, курсантов и аспирантов образовательных организаций высшего и среднего специального образования/ С. С. Мойсеенко, Л. Е. Мейлер. - М. : Моркнига, 2017. - 385 с.

ANALYSIS OF RISK FACTORS FOR EMERGENCIES AND ACCIDENTS IN SEAPORTS

¹Lobkova Katrin Eduardovna, senior lecturer department of transportation organization BFFSA, graduate student of KSTU;

²Moiseenko Sergey Sergeevich, Dr. Sci. (Edu), Ph.D. (Eng), professor, professor department of transportation organization BFFSA

^{1,2}Baltic Fishing Fleet State Academy FSBEI HE «KSTU», Kaliningrad, Russia,
e-mail: ¹lobkova.ke@bgarf.ru; ²moyseenko.ss@bgarf.ru

Among the primary factors affecting seaports is their security, which must be ensured to the necessary extent. There are a lot of various operations in seaports related to cargo and passenger transportation, loading and unloading operations, ship maintenance and other activities that may be associated with the risks of emergency situations. These risks may be caused by various reasons, for example, weather conditions, natural disasters, technical failures of equipment, human factor, terrorist acts and others. The task of preventing or reducing their negative impact is very important, and the risk factors of emergencies and accidents need to be analyzed and even forecasted for each seaport.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРУТЯЩИХ МОМЕНТОВ БАЛКЕРА ПРИ ПЛАВАНИИ НА НЕРЕГУЛЯРНОМ ВОЛНЕНИИ

¹Якута Ирина Владимировна, канд. техн. наук, доцент кафедры судовождения и безопасности мореплавания;

²Шкитин Даниил Александрович, курсант морского института

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

Произведена оценка крутящих моментов, возникающих в корпусе балкера с помощью современного программного обеспечения. В процессе проведения анализа гидродинамических характеристик балкера было выявлено, что существующие обводы приводят к повышенному сопротивлению движения судна, а также негативно влияют на его маневренность. Рассматривается возможность установки на судно программного обеспечения, с помощью которого можно проводить анализ мореходных качеств судна при различных условиях. Разработаны эксплуатационные ограничения, которые направлены на обеспечение сохранности мореходных качеств балкера при воздействии волновых нагрузок на нерегулярном волнении.

1. Кручение корпуса судна на тихой воде и на волнении

Определение крутящих моментов является важной задачей и представляет собой один из ключевых аспектов безопасности и стабильности плавания судов. Крутящий момент возникает в результате действия внешних сил на судно, таких как сильный ветер, штормовые условия, приливы и отливы, а также волнение.

Особенно важно обращать внимание на крутящие моменты при плавании на нерегулярном волнении. Нерегулярное волнение характеризуется формированием неоднородных и непредсказуемых волн, которые могут быть высокими, крутыми и иметь сложную структуру. Такие условия могут серьезно влиять на маневренность и стабильность судна, создавая опасность как для самого судна, так и для экипажа и груза на борту.

Кроме того, одним из аспектов, который требует особого внимания в контексте безопасности плавания судна, является проблема больших палубных вырезов. Большие палубные вырезы способны усиливать воздействие крутящих моментов и оказывать негативное влияние на структурную целостность и мореходные характеристики судна. Большие люковые вырезы в палубах значительно уменьшают крутильную жесткость корпуса судна, превращая его в тонкостенную балку открытого профиля. Кручение такой балки возникает не только от внешнего крутящего момента, но и от вертикальных и горизонтальных поперечных сил, изгибающих корпус судна соответственно в вертикальной и горизонтальной продольных плоскостях.

Для уменьшения опасности, связанной с большими палубными вырезами и возникновением крутящих моментов, были предприняты соответствующие меры. Они включают разработку и применение стандартов и рекомендаций, определяющих требования к конструкции судов и обеспечивающих эффективную защиту палубы от воздействия крутящих моментов. Некоторые из таких мер могут включать установку дополнительных барьеров, защитных ограждений или использование специализированных материалов, способных выдерживать высокие нагрузки.

С точки зрения физики, крутящий момент судна является моментом сил, возникающим на корпусе судна при движении в воде. Корпус судна представляет собой твердое тело, которое движется в воде. При этом на корпус судна действуют различные силы, такие как сила ветра, течения, воды, а также силы, вызванные маневрированием судна.

Крутящий момент возникает, когда на вертикальный рычаг, образованный водой, действует некоторая сила. Этот рычаг образуется за счет разницы в гидродинамическом давлении воды на бортах и корме судна. При движении судна в воде, эта разница в давлении создает вертикальный рычаг, который действует на корпус судна и вызывает его вращение вокруг продольной оси.

Таким образом, крутящий момент судна является результатом сложных гидродинамических процессов, происходящих вокруг корпуса судна при движении в воде. Он зависит от множества факторов, таких как форма корпуса, скорость движения, глубина погружения и т.д.

Крутящий момент может быть как положительным, так и отрицательным. Положительный крутящий момент вызывает вращение судна в одном направлении, в то время как отрицательный крутящий момент вызывает вращение в противоположном направлении. Крутящий момент может также изменяться в зависимости от того, как сильно и как быстро меняются условия движения судна [1].

Во время движения судна по воде тяговая сила гребных винтов не всегда равномерно распределяется по их поверхности. Это может произойти из-за неравномерности течения воды вокруг судна, особенно в области кормы, а также из-за несовершенства конструкции гребных винтов. В результате этого на судно может возникать крутящий момент.

Неправильное управление судном при маневрировании также может приводить к возникновению крутящего момента. Например, если угол перекладки руля слишком большой, это может вызвать неравномерность распределения тяговой силы гребных винтов и, как следствие, крутящий момент. Неправильное управление маневрами может привести к неравномерному распределению веса на судне, что может также вызвать крутящий момент.

При крене и волнении корпус судна подвергается неравномерному воздействию сил. Когда судно наклоняется в одну сторону, на этой стороне корпуса под водой уменьшается объем воды, который занимает корпус судна, в результате чего на этой стороне возникает меньшая сила поддержания. На другой стороне корпуса, которая выступает из воды, объем воды, который занимает корпус, увеличивается, в результате чего на этой стороне возникает большая сила поддержания. Этот эффект приводит к появлению крутящего момента, направленного в сторону, противоположную крену [2].

Правильное определение и учет крутящих моментов при плавании на нерегулярном волнении является важным шагом для обеспечения безопасности и эффективности плавания судов. Это позволяет судоводителям принимать информированные решения, предотвращать аварийные ситуации и обеспечивать сохранность судна и его грузов. Таким образом, учет крутящих моментов и применение соответствующих мер и ограничений на нерегулярном волнении являются неотъемлемой частью безопасности в морской индустрии.

2. Определение крутящих моментов на нерегулярном волнении

2.1. Характеристики судна

В работе выполнено определение крутящих моментов балкера «Oslo Bulk 7». Балкеры, как грузовые суда, специализируются на перевозке сыпучих грузов, таких как уголь, руда, зерно и другие грузы большого объема. Именно на балкерах крутящие моменты могут представлять особую опасность. Это связано с такими факторами, как неравномерное распределение груза, асимметрия конструкции и воздействие внешних сил. Неудачное распределение груза может приводить к неправильному центру тяжести судна и увеличению крутящих моментов, особенно при воздействии нерегулярного волнения.

Важно отметить, что в настоящее время наблюдается увеличение количества аварий балкеров. Это подчеркивает необходимость проведения анализа крутящих моментов и принятия мер для обеспечения безопасности и стабильности плавания таких судов.

Балкер «Oslo Bulk 7» имеет следующие характеристики [3]: длина судна – 108,2м; ширина – 18,2м; осадка – 7,057 м; водоизмещение – 11069 т; классификация – DNV GL; крейсерская скорость – 12уз. (6,17 м/с).

2.2. Выбор программ для определения крутящих моментов

В ходе исследования были проведен анализ и рассмотрены различные современные программы для гидродинамического анализа. Важной проблемой, которую требовалось решить, было отсутствие построенной модели корпуса судна для проведения гидродинамического анализа. Для этой цели была необходима специальная программа, способная создать трехмерную модель кор-

пуса судна. Было просмотрено множество программ, и выбор был сделан в пользу двух основных программ – «Rhino 7» и «ANSYS AQWA».

«Rhino 7» является мощным инструментом для трехмерного моделирования, позволяющим создавать сложные геометрические модели корпуса судна с высокой точностью и гибкостью. Он обладает широким спектром функций и интуитивно понятным пользовательским интерфейсом, что делает его эффективным инструментом для создания модели корпуса судна.

«ANSYS AQWA», в свою очередь, является программным комплексом, специализирующимся на гидродинамическом анализе морских и океанских систем. Он предоставляет возможности для моделирования различных волновых нагрузок и расчета крутящих моментов на судне. «ANSYS AQWA» позволяет учитывать сложные физические явления, включая волновые воздействия, гидростатические и гидродинамические силы, а также дает возможность проводить надежные и точные анализы безопасности и стабильности судна на нерегулярном волнении.

Таким образом, использование программ «Rhino 7» и «ANSYS AQWA» предоставило возможность создания модели корпуса судна и проведения гидродинамического анализа, включая определение крутящих моментов. Эти программы позволили получить надежные и релевантные результаты, которые были использованы для сравнения с требованиями классификационного общества и для разработки рекомендаций.

2.3. Создание модели для гидродинамического анализа

После выбора программ начался процесс создания макета корпуса. В «Rhino 7» осуществляется формирование основной структуры корпуса судна с учетом заданных требований и дизайна. Процесс включает создание 3D модели корпуса судна, учитывая его общие формы и размеры.

Первым действием является создание профиля макета с использованием характеристики, таких, как длина судна (рис.1).

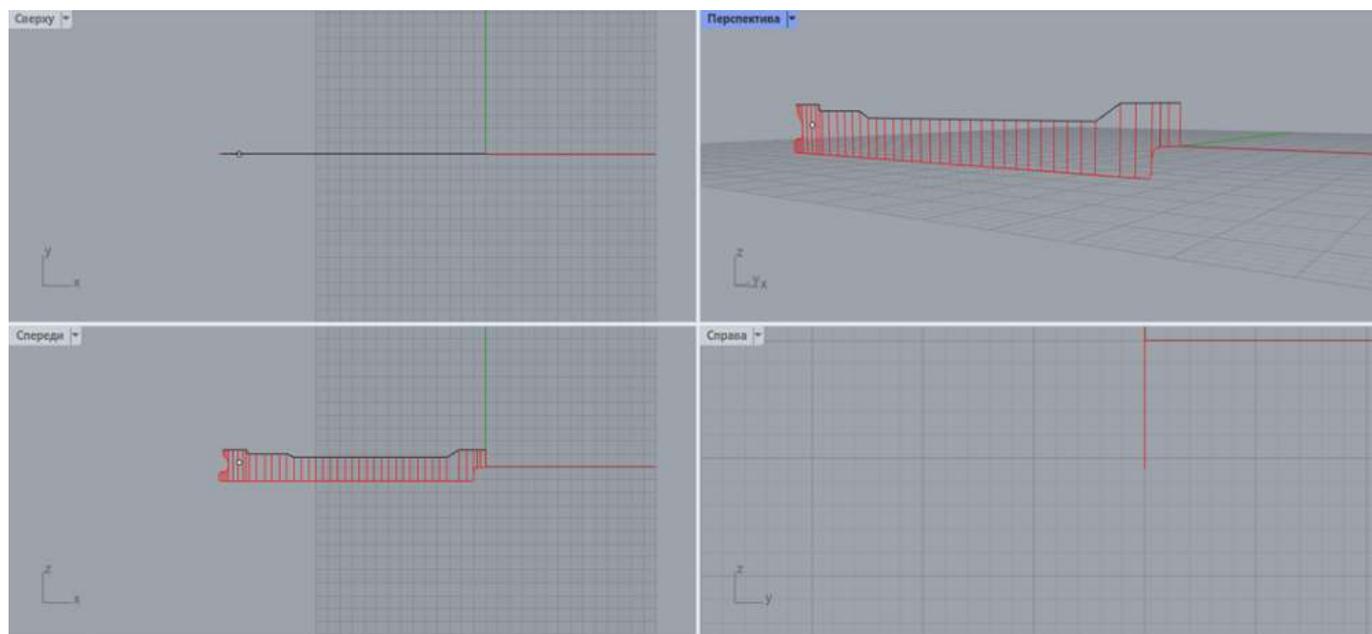


Рис. 1. Создание профиля модели

После того, как был построен основной профиль судна, включающий в себя все формы и индивидуальные черты судна, необходимо задать ширину судна и создать дополнительные прямые, которые необходимы для построения модели (рис.2).

Использование дополнительных прямых или кривых является удобством для создания различных фигур, а также есть функция для того, чтобы добавить чертеж объекта прямо в программу. Данное решение в разы уменьшает время, затраченное для создания модели.

Выставив ширину судна, можно приступить к построению параллельных профилю линий и формированию ребер поверхности, соблюдая все индивидуальные черты судна (рис.3).

Далее, когда будут готовы все ребра поверхности и проверены все соединения на наличие ошибок, приступим к построению поверхностей и формированию единого тела корпуса судна (рис.4).

Данный этап создания модели является самым трудоемким и требует внимания со стороны проектировщика, так как возникает множество проблем с созданием поверхности и для этого требуется проверка всех соединений ребер поверхности и других кривых, использованных для создания поверхности. Ошибка в расстоянии между ребрами или же отсутствие соединения с кривыми может привести к тому, что поверхность не будет иметь закрытый контур.

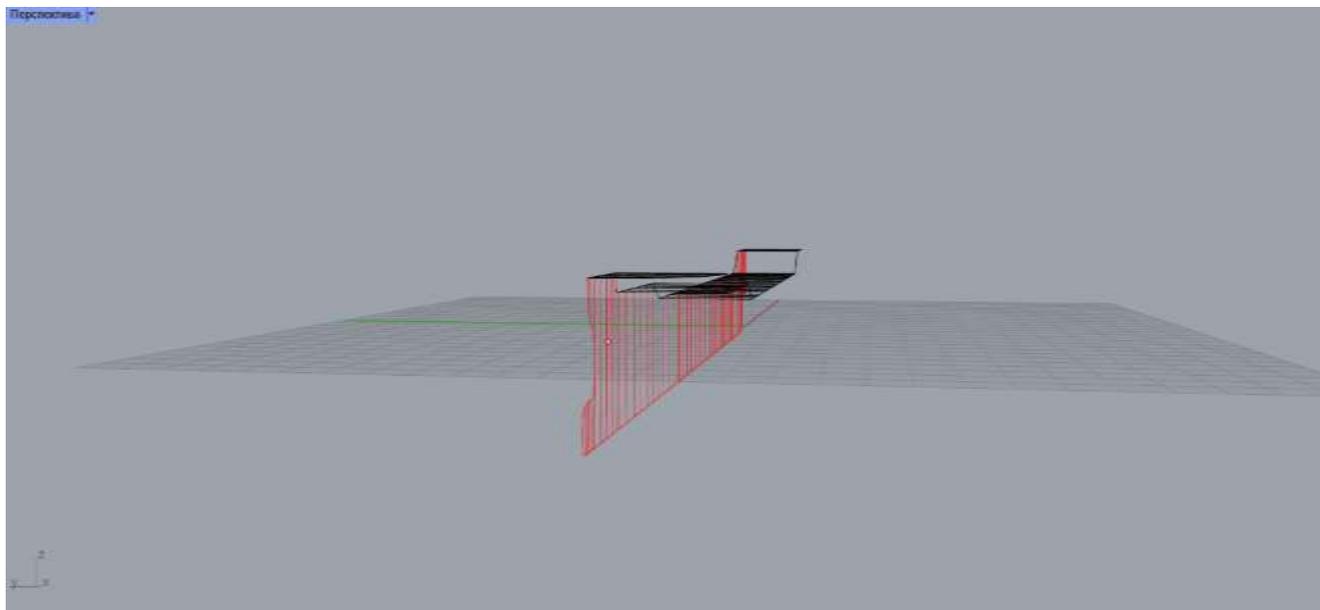


Рис. 2. Выставление ширины судна

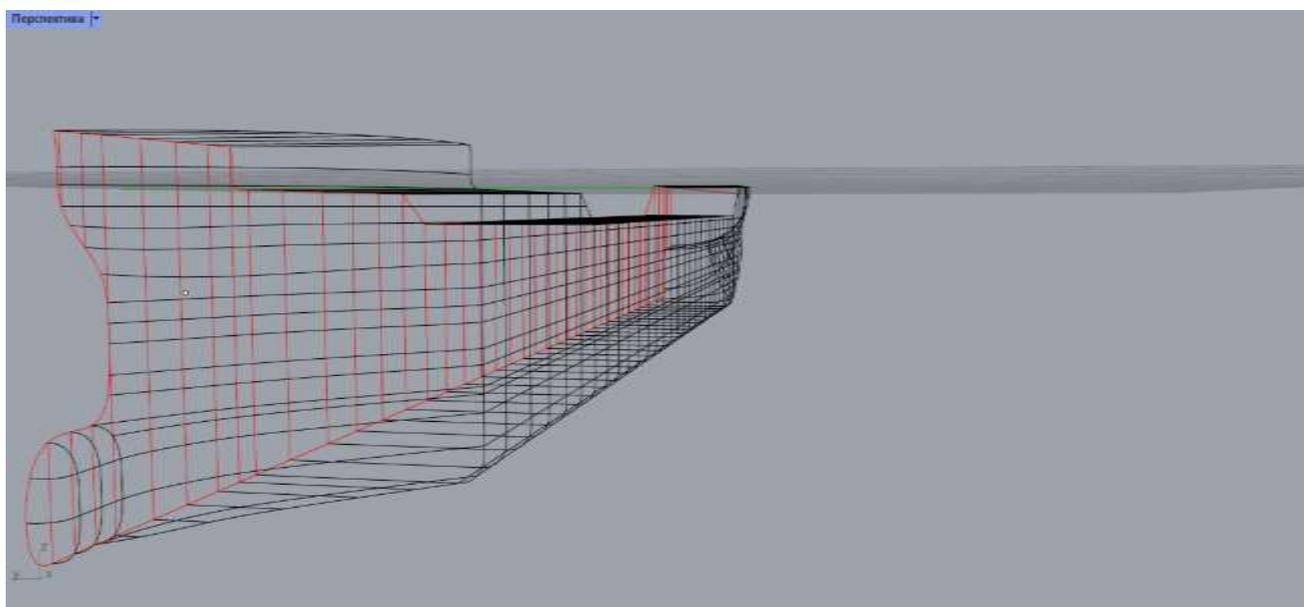


Рис. 3. Создание ребер поверхности

Также создание поверхности требует разделения модели на отдельные части. В данном случае разделение поверхностей было осуществлено на три части: носовую часть; бортовую часть, имеющие прямые линии; кормовая часть. После разделения модели на части, можно приступать к созданию поверхностей и дальнейшего скрепления всех частей воедино.

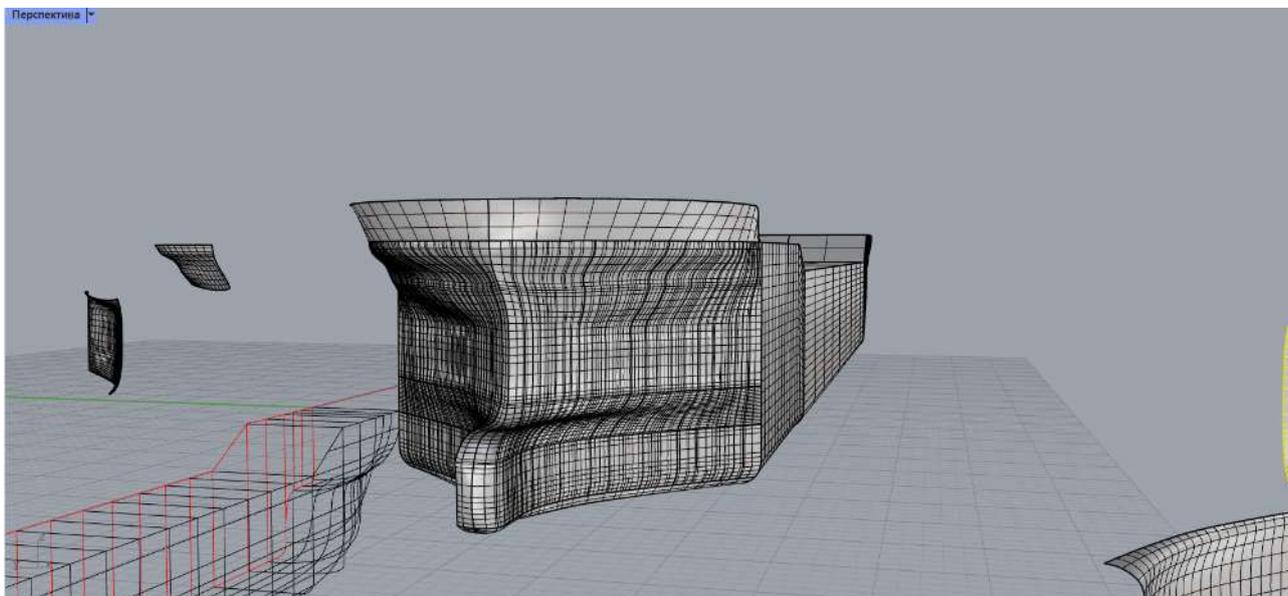


Рис. 4. Формирование поверхности модели

После создания модели можно перейти к гидродинамическому анализу, включающего в себя определение крутящих моментов.

2.4. Гидродинамический анализ

Далее проведем гидродинамический анализ с учетом требований и стандартов классификационного общества DNV GL. DNV GL (Det Norske Veritas Germanischer Lloyd) – это ведущее классификационное общество, специализирующееся на оценке и сертификации морской техники, включая суда. Они разрабатывают стандарты и руководства, основанные на передовых технологиях и международных нормах, чтобы обеспечить безопасность и эффективность судовых операций. Создано в 2013 году в результате слияния двух организаций – Det Norske Veritas и Germanischer Lloyd.

Для гидродинамического анализа был использован метод конечных элементов. Этот метод является широко применяемым численным методом, позволяющим моделировать и анализировать сложные физические явления, связанные с воздействием воды на корпус судна. Использование метода конечных элементов в гидродинамическом анализе позволяет получить детальные и точные результаты, учитывающие сложные физические процессы, такие как волновое воздействие на судно. Это позволяет проводить сравнение результатов с требованиями DNV GL и определять соответствие судна данным требованиям.

Построенную модель необходимо перенести в «ANSYS AQWA» и выставить необходимые настройки для гидродинамического анализа. Данные настройки, рассчитаны и указаны в требованиях классификационного общества DNV GL.

Для тестирования модели корпуса судна будет использовано нерегулярное волнение по спектру Пирсона–Московица, глубина участка моря будет составлять 500 м, скорость судна будет равна 6,17 м/с. Тестирование позволяет использовать любое направление волн, как упомянуто выше, но для данного тестирования и наглядного представления работы этой функции, направление волны будет иметь значение противоположное курсу судна. Курс судна составляет $0,0^\circ$ [4].

Согласно рис. 5 необходимо провести ряд мер для того, чтобы успешно был выполнен анализ. В эти меры входит: разделение единой поверхности корпуса судна на две части по осадке судна, равной 7,057 м, выставить упрощенные настройки для того, чтобы исключить ошибки в анализе.

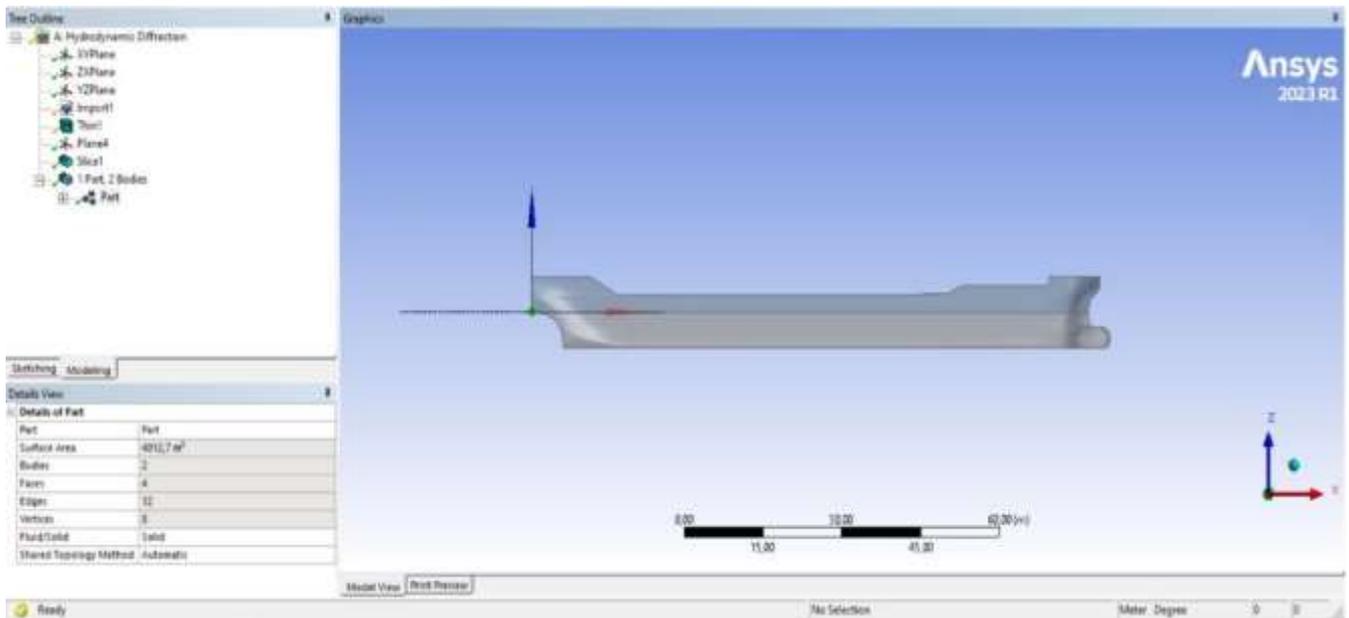


Рис. 5. Настройка модели и создание подготовительных условий для анализа

Далее необходимо выставить сеть для гидродинамического анализа. Данная сеть является частью метода конечных элементов. Она делит судно на множество элементов, для которых строится решение (рис. 6).

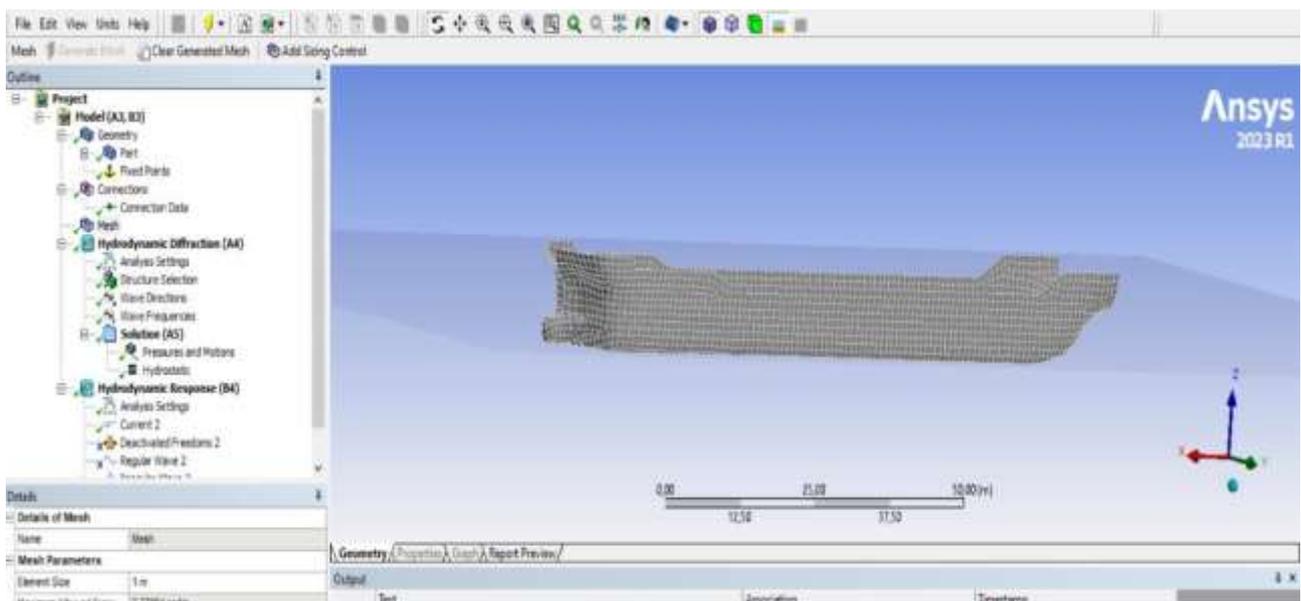


Рис. 6. Создание сети

Модель корпуса имеет все заданные значения и готово к анализу. После прохождения анализа будут доступны результаты давления воды, крутящих моментов, а также других гидродинамических свойств, необходимые для дальнейшей разработки рекомендаций.

Как видно из рис. 7, давление воды имеет наибольшее значение в зоне бульба модели корпуса судна и это говорит о том, что данная зона полностью выполняет свою задачу по улучшению гидродинамических свойств судна, принимая основной удар волны о корпус судна, а также сохраняя и улучшая скорость движения судна. Остальные значения давления распределяются равномерно по корпусу и находятся в допустимых значениях. Представленный рисунок показывает давление воды только с одной стороны направления волны, программа позволяет проиграть движение волны посекундно и в любом из направлений, начиная от $0,0^\circ$ до $360,0^\circ$.

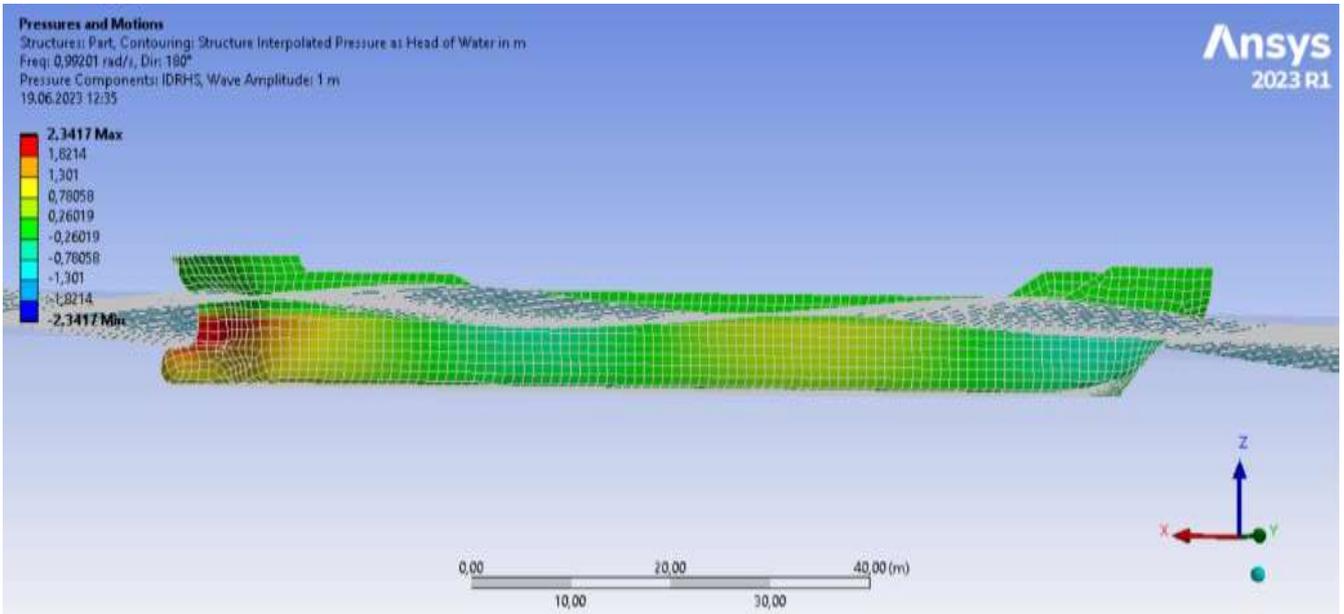


Рис. 7. Влияние воды на корпус судна

В графиках (рис. 8-10) представлены результаты расчетов крутящих моментов, связанных с движениями судна. Графики отображают изменение крутящего момента в зависимости от времени. Каждый из них представляет крутящий момент, возникающий вокруг каждой оси судна: X, Y, Z. Определение данных крутящих моментов является первостепенной задачей для того, чтобы попытаться минимизировать или исключить нежелательное воздействие.

Данные графики строятся на основе RAO (Response Amplitude Operators) – движения, рассчитываются исключительно на основе RAO, игнорируя влияние соединений (за исключением случаев, когда эти соединения включены в анализ дифракции как дополнительные матрицы), используя заданную волну. RAO представляют собой амплитудно-частотные характеристики, которые определяют отношение амплитуды движения структуры к амплитуде внешней воздействующей силы (в данном случае, волны) при заданной частоте. Они позволяют оценить, как структура реагирует на воздействие волны в зависимости от ее частоты.

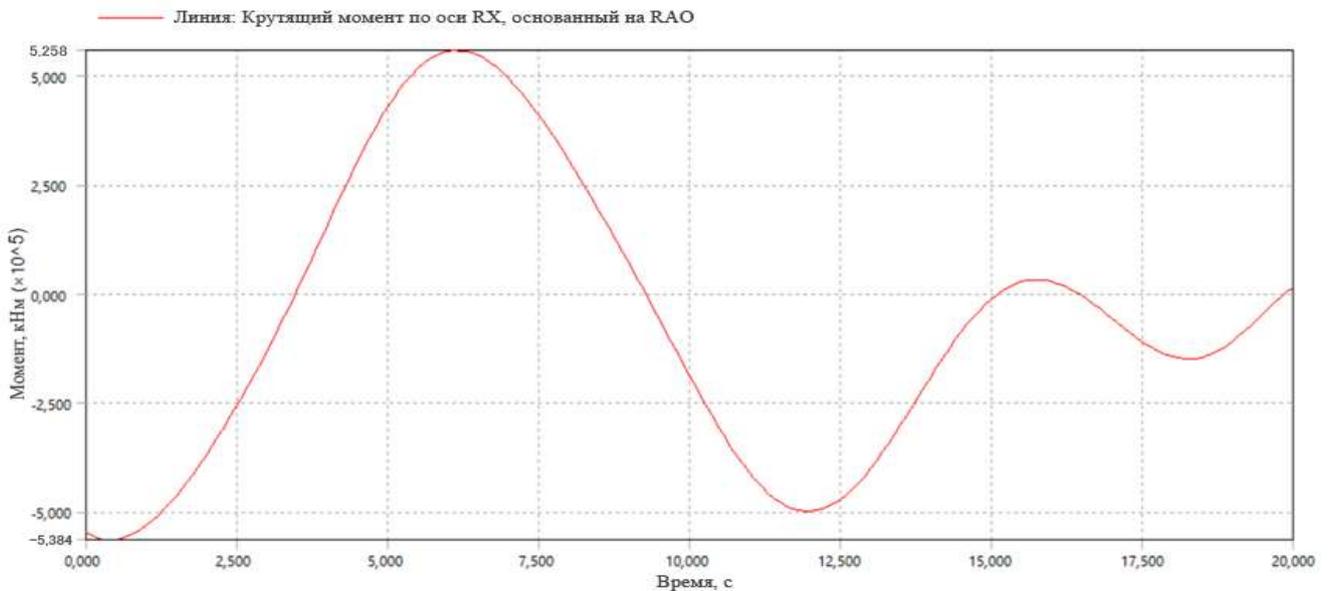


Рис. 8. График зависимости момента от времени по оси RX (roll)

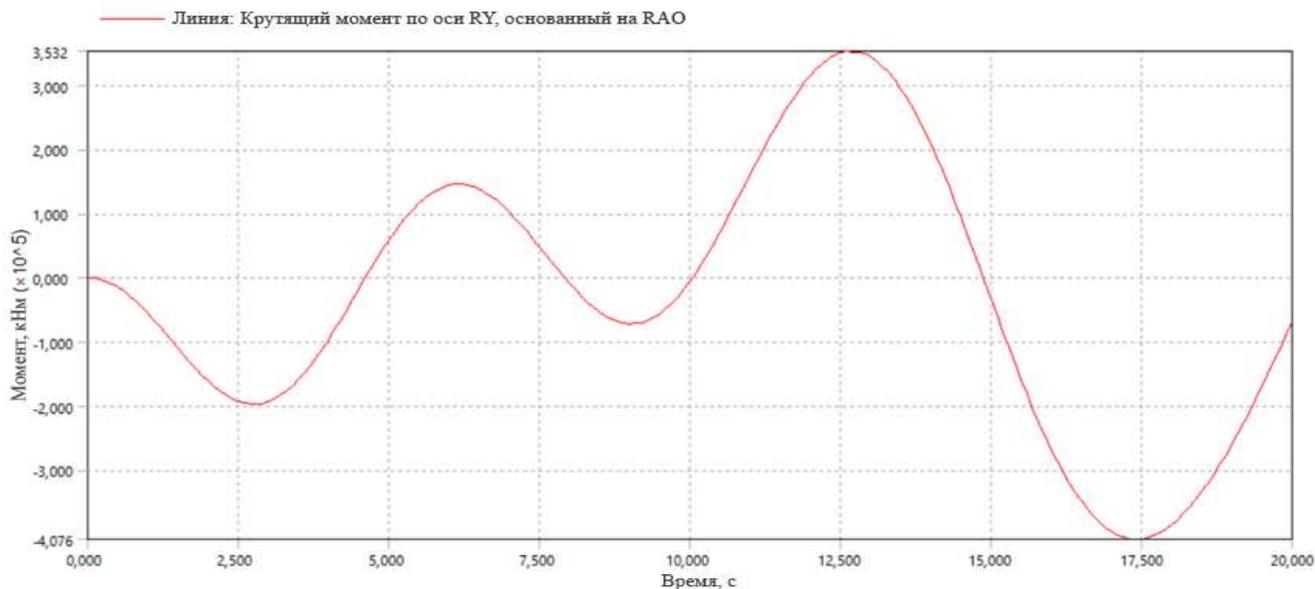


Рис. 9. График зависимости момента от времени по оси RY (pitch)

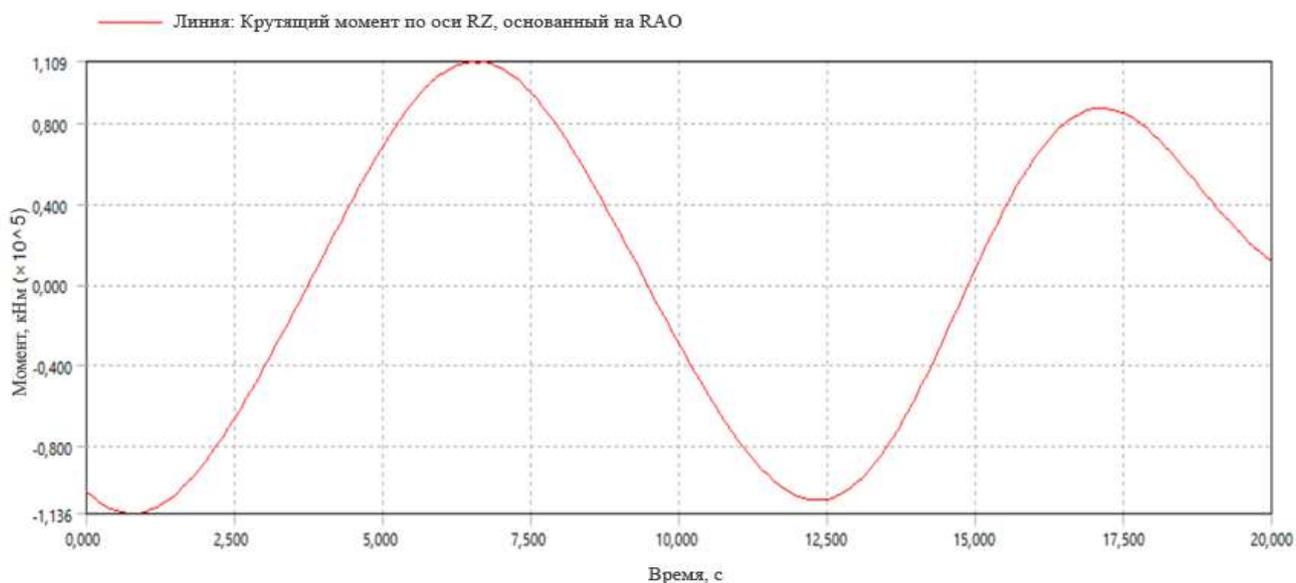


Рис. 10. График зависимости момента от времени по оси RZ (yaw)

Использование данной программы позволяет значительно экономить время и ресурсы. Анализ составляет около 15 минут. Судоводителю достаточно вводить только имеющиеся данные из формуляров на мостике судна, что делает процесс простым и удобным. Кроме того, анализ можно проводить при различных вариантах загрузки и других условиях, обеспечивая гибкость и адаптацию к различным ситуациям. Также хочется отметить то, что полученные результаты крутящих моментов сравниваются с требованиями классификационного общества

2.5. Сравнение с требованиями DNV GL

Согласно требованиям классификационного общества DNV GL, анализ, проведенный на нерегулярном волнении и графики крутящих моментов, построенные по осям RX, RY, RZ должны быть плавными и не иметь обрывов или резких скачков значений. Соответственно, обращаясь к рис. 8-10 видно, что графики не имеют обрывов и резких скачков. Время анализа, согласно требованиям, составляет 20 секунд. Данное требование также соблюдено. Для сравнения с допустимыми значениями выбираются самые большие из представленных на графике. Допустимые значения

для балкеров длиной $L \geq 100$ м и шириной $15 \leq B \leq 24$ м для осей: $R_X = 55850$ кНм; $R_Y = 44245$ кНм; $R_Z = 26735$ кНм. Соответственно $|MR_X| < |M_{доп}|$, $|MR_Y| < |M_{доп}|$, $|MR_Z| < |M_{доп}|$. Касательно требований к давлениям и движениям (рис. 7), то в требованиях тракуются такие правила: проведение анализа с выставленной сеткой, соответствующей 1м, зоны распределения давления должны быть равномерными и цвет должен переходить мягко, что на рисунке заметно и говорит о том, что требования соблюдаются [4].

Рекомендации

Анализ данных показал, что текущие обводы корпуса балкера не оптимальны и могут приводить к повышенному сопротивлению движения судна, а также негативно влиять на его маневренность и устойчивость. В зоне бульба и чуть выше к скуловой зоне наблюдается высокое давление от воды при ударе волны. Эти данные соответствуют допустимым, но для улучшения мореходных качеств балкера рекомендуется внести изменения в обводы корпуса судна. Необходимо провести дополнительные исследования и моделирование с целью определения оптимальной формы и контуров носа, которые максимально снизят сопротивление воды и улучшат гидродинамическую эффективность судна.

Изменение обводов корпуса судна в носовой части позволит улучшить его производительность, снизить энергетические затраты и повысить безопасность при эксплуатации.

Обеспечение сохранности мореходных качеств судна включает несколько аспектов, помимо изменения обводов корпуса. Вот несколько способов, которые могут быть применены:

- проведение анализа прочности и жесткости корпуса судна и внесение соответствующих усовершенствований в конструкцию для повышения ее надежности и стойкости к нагрузкам, включая крутящие моменты и воздействие волн;

- разработка и внедрение улучшенных систем управления рулевого устройства, которые позволят судну более эффективно справляться с изменчивыми условиями морской среды и обеспечивать стабильность и маневренность;

- тщательное планирование распределения грузов на борту судна, чтобы достичь оптимального баланса и минимизировать негативное влияние на мореходные характеристики. Это включает учет крутящих моментов, вертикальных моментов и других нагрузок.

- проведение регулярных технических осмотров, тестирования и обслуживания судна для обнаружения и устранения потенциальных проблем или повреждений, которые могут негативно сказаться на его мореходных качествах;

- обеспечение должного обучения и подготовки экипажа судна по мореходным характеристикам, безопасности и управлению судном в различных условиях. Это поможет экипажу эффективно управлять судном и принимать правильные решения в случае возникновения неблагоприятных ситуаций.

Рекомендуется рассмотреть возможность установки программного обеспечения «ANSYS AQWA» на компьютер мостика судна или на личный компьютер для судоводителей. Программное обеспечение предоставляет ценный инструмент для оценки гидродинамических свойств и обеспечения безопасности мореплавания. Путем использования «ANSYS AQWA» можно проводить анализ мореходных качеств судна под различными условиями загрузки и морских воздействий. Позволяется моделировать гидродинамическое взаимодействие судна с волнами и рассчитывать важные параметры, такие как силы и моменты, действующие на судно.

Такой подход позволяет оценить стабильность, управляемость и общую производительность судна в различных условиях мореплавания. Можно изучить влияние загрузки, формы корпуса, расположения оборудования и других факторов на его гидродинамические свойства. Полученные результаты и данные «ANSYS AQWA» будут полезны для принятия информированных решений при эксплуатации судна. Внедрение программного обеспечения «ANSYS AQWA» в морскую практику потребует соответствующей подготовки и обучения судоводителей, а также поддержки со стороны компетентных специалистов. Однако, это дополнительное средство исследования и анализа, которое может значительно улучшить качество и надежность принимаемых решений во время эксплуатации судна в реальных морских условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lars Larsson, Hoyte C. Raven. Principles of Naval Architecture Series – Ship Resistance and Flow – The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Jersey City, NJ, 2010. – 225 p.
2. Edward V. Lewis. Principles of Naval Architecture – Volume I Stability and Strength – The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Jersey City, NJ, 1988. – 305 p.
3. Oslo bulk 7 General information // Электрон. дан. Режим доступа URL: <https://bulkship.no/wp-content/uploads/2023/03/ob7-specs.pdf> (дата обращения 27.05.2023)
4. DNVGL-CG-0127 Finite element analysis // Электрон. дан. Режим доступа URL: <https://standards.dnv.com/explorer/> (дата обращения 19.06.2023)

DETERMINATION OF BULKER TORQUES WHEN SAILING IN IRREGULAR WAVES

¹Yakuta Irina Vladimirovna, candidate of technical sciences,
associate professor department of navigation and safety of navigation;

²Shkitin Daniil Aleksandrovich, maritime institute cadet

^{1,2}Baltic Fishing Fleet State Academy FSBEI HE «KSTU», Kaliningrad, Russia,
e-mail: yakuta@bgarf.ru

The article evaluates the torques arising in the bulk carrier body using modern software. In the process of analyzing the hydrodynamic characteristics of the bulk carrier, it was revealed that the existing contours lead to increased resistance to the movement of the vessel, as well as negatively affect its maneuverability. The possibility of installing software on the ship, with the help of which it is possible to analyze the seaworthiness of the vessel under various conditions, is being considered. Operational restrictions have been developed, which are aimed at ensuring the safety of the seaworthiness of the bulk carrier under the influence of wave loads on irregular waves.

УДК 629.5.024.3

ВЫЯВЛЕНИЕ ПРИЧИН ПОВРЕЖДЕНИЙ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В НОСОВОЙ ОКОНЕЧНОСТИ СУДОВ

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

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

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

^{1,3}ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия им. адмирала Н.Г. Кузнецова»

(филиал в г. Калининграде), Калининград, Россия,

e-mail: ¹e_burakovsky@mail.ru; ³v-y48@yandex.ru

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

Рассматриваются случаи разрушения носовых оконечностей судов в штормовых условиях. С использованием технологии SPH осуществлено моделирование процесса обтекания носовой оконечности судна потоком жидкости. Показано, что при зарывании носовой оконечности в волну и её взаимодействии с потоком жидкости образуются области с резким понижением давления, в которых может развиваться кавитация. Величина нагрузок, действующих на конструкции корпусов судов в носовой оконечности в таких условиях, может достигать нескольких сотен тонн на квадратный метр.

1. Постановка задачи

Опыт эксплуатации судов, особенно крупнотоннажных, свидетельствует о получении ими серьёзных повреждений корпусных конструкций в носовой оконечности. В большинстве источников эти повреждения объясняются ударами волн. Однако расчётные методы взаимодействия волн с инженерными сооружениями не выявляют нагрузок, способных привести к подобным разрушениям. По полученным в последние годы оценкам при ударе волны давление на корпус судна может достигать 980 кПа [1], что составляет порядка 100 тонн на 1метр квадратный. По другим оценкам, эта величина может быть в разы больше.

2. Анализ повреждений

В работе [2] представлены многочисленные случаи гибели балкеров в результате повреждения носовой оконечности. Так, в августе 1991в условиях шторма в Индийском океане года затонул греческий балкер «Melete» (длина 228 м) с грузом железной руды. С борта судна поступило сообщение, что оно направляется на ремонт трещины в районе первого грузового трюма. Как показало проведенное расследование, повреждения не могли быть получены в процессе погрузки в порту. Отмечается, что судно попало в сложные погодные условия южнее Мадагаскара.

Рудовоз «California Maru» (длина 218 м) в условиях шторма потерпел крушение у берегов Японии 9 февраля 1970 г. С судна было передано сообщение о поступлении воды через внезапно возникшую пробоину в носовой оконечности. В течение 21часа команда боролась с поступлением воды, однако судно затонуло.

Серьёзные повреждения в неблагоприятных погодных условиях в районе Южной Африки в 1991году получило судно «Atlas Pride» [3] (длина 326 м, ширина 52м) (рис. 1).



Рис. 1. Повреждённая носовая оконечность «Atlas Pride» [3]

Также в результате попадания в шторм и воздействия волн [2] пробоины в носовой оконечности получил танкер «Energy Endurance» (рис. 2).

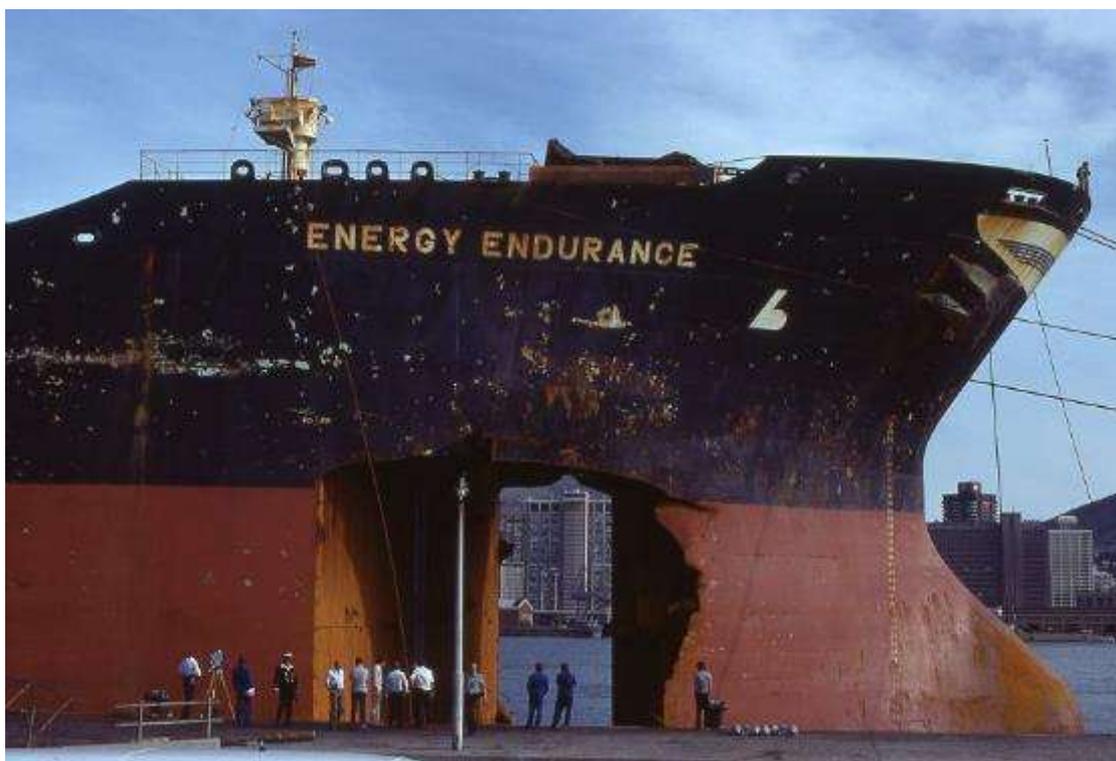


Рис. 2. Повреждённая носовая оконечность танкера «Energy Endurance» [2]

Большие объёмы разрушений бортовой и днищевой обшивки наблюдались на судне «Marcona Trader», попавшем в шторм в марте 1981г. в 300 милях к западу от островов Мидуэй в Тихом океане [4] при перевозе груза из Сан-Франциско в Японию (рис. 3). В результате воздействия волн в носовой оконечности образовалась пробоина размером 2,4×8,5 метров.

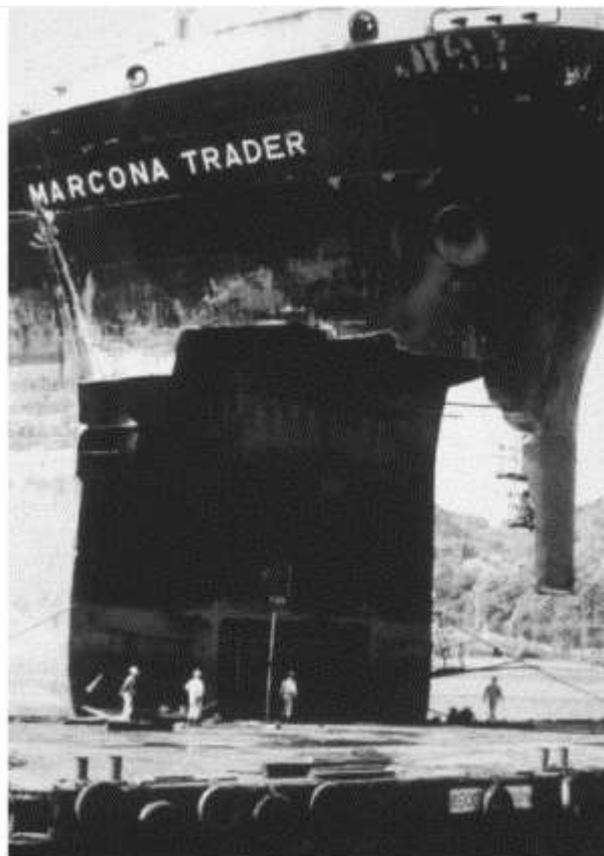


Рис. 3. Устранение повреждений носовой оконечности корпуса «Marcona Trader» [4]

В том же районе Тихого океана подобные повреждения в штормовых условиях получило судно «Chi Star» [5]. 8 августа 1980 года в носовой оконечности судна была обнаружена серьезная пробоина (рис. 4). В то время судно находилось к северу от острова Мидуэй по пути из Лос-Анджелеса, Калифорния, в Сакаи, Япония, с грузом угля. Отмечается, что первопричина подобных повреждений неизвестна и вряд ли когда-нибудь будет установлена.

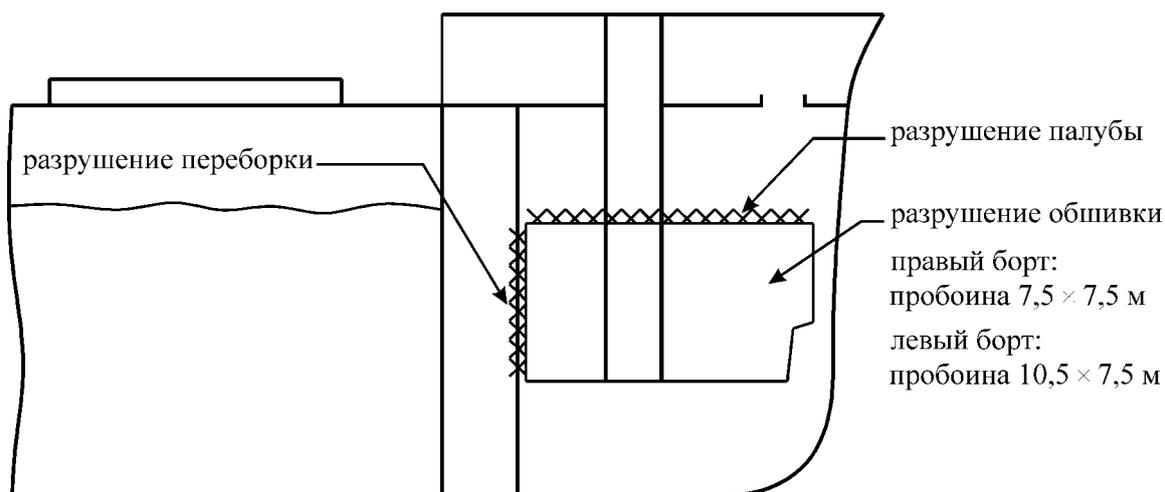


Рис. 4. Повреждения носовой оконечности «Chi Star» [5]

Причина повреждений, по мнению авторов, – зарывание носовой оконечности в волну при последующем обтекании корпусных конструкций в процессе выхода носовой оконечности из воды в результате качки судна. В этом случае при больших скоростях обтекания корпусных конструкций и наличии конструктивных кавитаторов резко падает давление и образуются кавитационные полости, которые при захлопывании на корпус создают чрезвычайно высокое давление на бортовые перекрытия в носовой оконечности судов, что и приводит к разрушению последних.

3. Результаты исследования

Для оценки степени падения давления был проведён вычислительный эксперимент с использованием программы DualSPHysics, реализующей метод SPH. При этом носовая оконечность корпуса судна помещалась в поток жидкости, скорость которого варьировалась. Давление определялось в ряде точек, расположенных в районе форштевня. Схема установки модели носовой оконечности представлена на рис. 5.

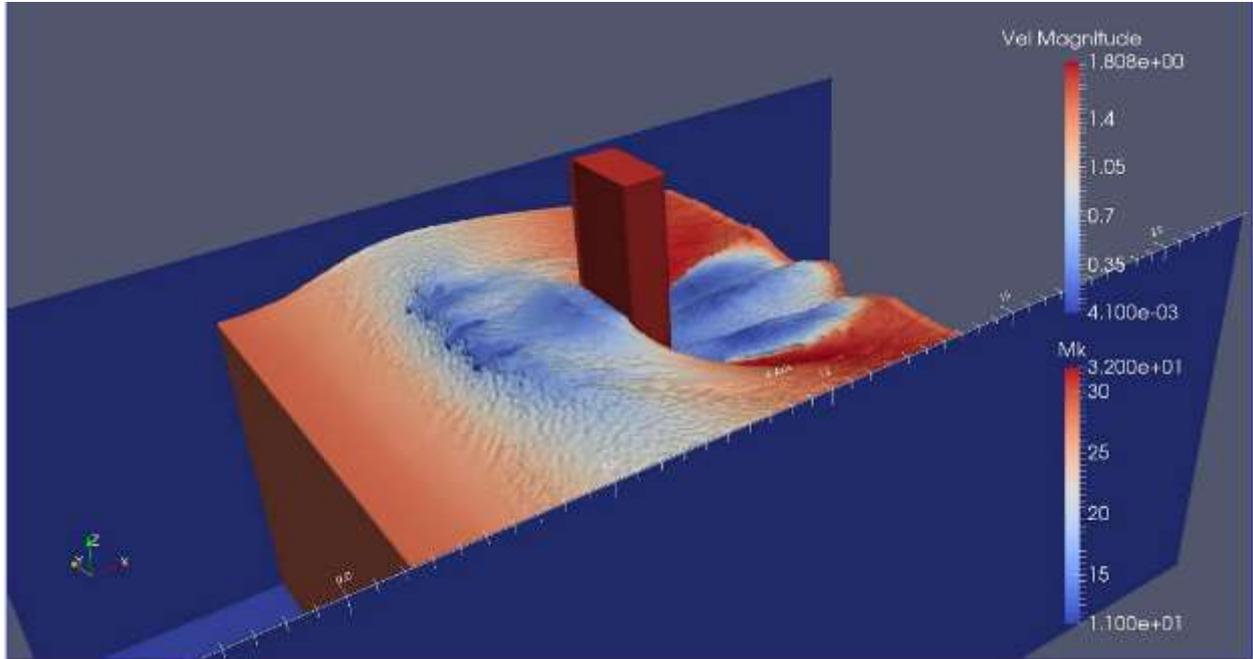


Рис. 5. Испытание модели в потоке жидкости

Результаты численного моделирования даны на рис. 6. Здесь по оси ординат отложены относительные значения давления $\bar{p} = p/p_\infty$ по высоте корпуса в районе форштевня. Отсчёт координаты z осуществляется от ОП судна. Данная графическая зависимость свидетельствует о том, что в условиях зарываемости носа судна в волну и его обтекании потоком могут возникать участки, в которых наблюдается существенное понижение давления [6]. Рисунок построен для скорости обтекания 1,5 м/с, что соответствует скорости 15 м/с для натуры.

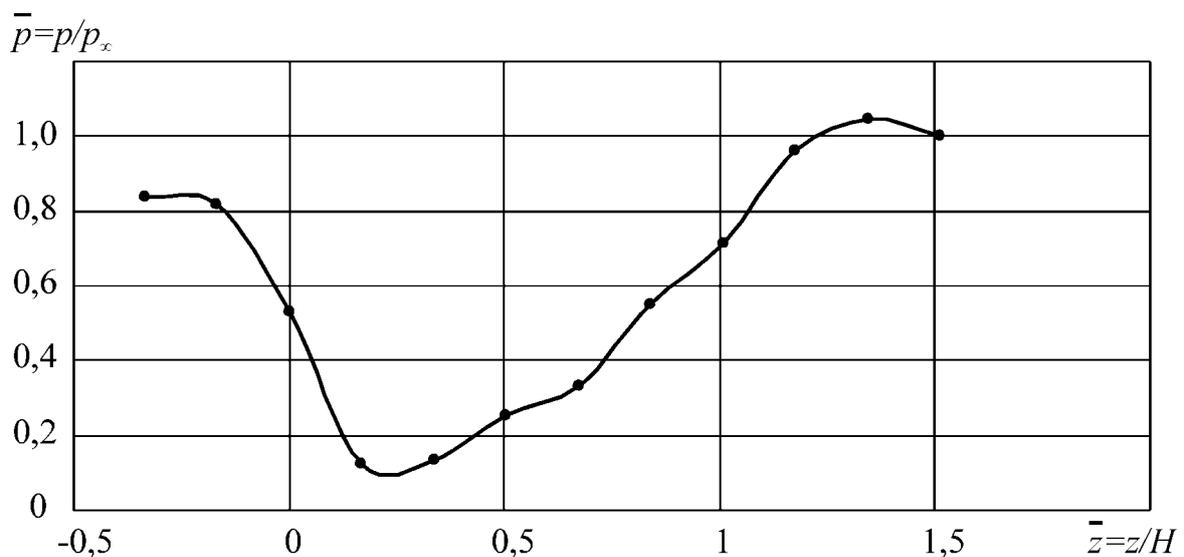


Рис. 6. Падение давления в различных точках носовой оконечности при её обтекании

4. Заключение

Проведённое авторами исследование показало, что величина нагрузок, действующих на конструкции корпусов судов в носовой оконечности, может достигать нескольких сотен тонн на квадратный метр. Восприятие таких нагрузок приводит к разрушению конструкций, что подтверждают представленные выше аварийные случаи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Доценко, С.Ф. Волны-убийцы / С.Ф. Доценко, В.А. Иванов. – Севастополь, 2006. – 43 с.– (Современные проблемы океанологии; вып. 1).
2. Report of FSA Study on Bulk Carrier Safety (MSC75/5/2) / IMO Maritime Safety Committee. – 2002.– 41p.
3. AtlasPride. – Текст, изображение : электронные // ShipsNostalgia : [сайт]. – 2015. – URL: <https://www.shipsnostalgia.com/media/atlas-pride.381548/> (дата обращения: 20.08.2023).
4. Okumoto, Y. Design of ship hull structures / Y. Okumoto, Y. Takeda, M. Mano, T. Okada.– Berlin : Springer, 2009.– 578 p.
5. Ross, S.G. So who says its Pacific Ocean / S.G. Ross // Mariners Weather Log. – 1982. – Vol. 26, № 4. – P. 196-198.
6. Патент № 2787422Российская Федерация, МПК В63В 1/32(2006.01), МПК В63В 43/00 (2006.01). Носовая оконечность корпуса судна : №2022114149 : заявл. 25.05.2022: опубл. 09.01.2023 / Бураковский Е.П., Бураковский П.Е., Юсып В.М. ; заявитель ФГБОУ ВО «КГТУ». – 14 с. : ил. – Текст : непосредственный.

IDENTIFYING THE CAUSES OF DAMAGE TO HULL STRUCTURES AT THE BOW OF VESSELS

¹Burakovskiy Evgeny Petrovich, Dr. hab., professor;

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

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

^{1,3}Admiral N.G.Kuznetsov Naval Academy (Branch Kaliningrad), Kaliningrad, Russia,
e-mail: ¹e_burakovsky@mail.ru; ³v-y48@yandex.ru

²Baltic Fishing FleetState Academy, Kaliningrad, Russia, e-mail: ²paul_b@mail.ru

This article discusses cases of destruction of the bows of ships in storm conditions. Using the SPH technology, the process of fluid flow around the bow of the vessel was simulated. It is shown that when the nasal tip is buried in a wave and its interaction with the fluid flow, areas are formed with a sharp decrease in pressure, in which cavitation can develop. The magnitude of the loads acting on the structures of the ship's hulls in the bow under such conditions can reach several hundred tons per square meter.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТОЙЧИВОСТИ СУДОВ НА РАЗРУШАЮЩЕМСЯ ВОЛНЕНИИ

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

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

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

^{1,3}ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия им. адмирала Н.Г. Кузнецова»

(филиал в г. Калининграде), Калининград, Россия,

e-mail: ¹e_burakovsky@mail.ru; ³v-y48@yandex.ru

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

Работа посвящена исследованию динамики судна на разрушающемся волнении. Показано, что традиционные методы расчёта не позволяют в полной мере охарактеризовать поведение судна под ударом разрушающейся волны. Проведенный анализ показал, что учёт трансформации ватерлинии судна в данной ситуации позволяет более объективно судить о его остойчивости в подобной ситуации и избежать ошибки в опасную сторону, свойственной традиционным методам расчёта.

1. Постановка задачи

При эксплуатации морских судов возникают различные аварийные ситуации, при этом наиболее опасные связаны с потерей остойчивости, т.к. они, как правило, развиваются стремительно и сопровождаются гибелью значительной части или всего экипажа. Анализ аварийных ситуаций свидетельствует о том, что суда могут опрокидываться по ряду причин: вследствие захвата судна попутной волной, при зарывании носовой оконечности во встречную волну, под воздействием ударов разрушающегося волнения и т.д. По результатам исследования последней ситуации, проведенных рядом специалистов, были предложены два подхода к моделированию остойчивости судна на разрушающемся волнении. Первый, предложенный А.Н. Холодилиным и С.Н. Благовещенским, связан с оценкой кинетической энергии, сообщаемой судну при ударе в борт разрушающейся волны, и сопоставлении её с запасом потенциальной энергии с использованием диаграммы статической или динамической остойчивости [1].

В рамках второго подхода, предложенного Н.Б. Севастьяновым, помимо крена одновременно рассматривается динамика судна в условиях стремительно развивающегося дрейфа от удара волны. При этом поведение судна описывается системой двух дифференциальных уравнений: бортовой качки и дрейфа [2].

2. Особенности динамики судна на разрушающемся волнении

В рассматриваемой задаче особый интерес представляет моделирование ситуации, связанной с поведением малого судна под воздействием крупного разрушающегося волнения, что сопряжено с рядом затруднений. Как отмечено в [3], использование для оценки остойчивости такого судна уравнения баланса энергии удара волны в борт и работы восстанавливающего момента, определенной по общепринятой диаграмме остойчивости, не дало удовлетворительного результата. Также на основании анализа аварий ряда малых судов в условиях разрушающегося волнения показано, что динамика судна в такой ситуации не может быть описана одним лишь дифференциальным уравнением крена, а остойчивость судна не характеризуется диаграммой, полученной для судна на тихой воде [3].

Наглядное представление об ограниченности возможности применения диаграммы статической остойчивости для оценки риска опрокидывания судна под ударом одиночной волны в борт даёт рис. 1, заимствованный из работы [4].

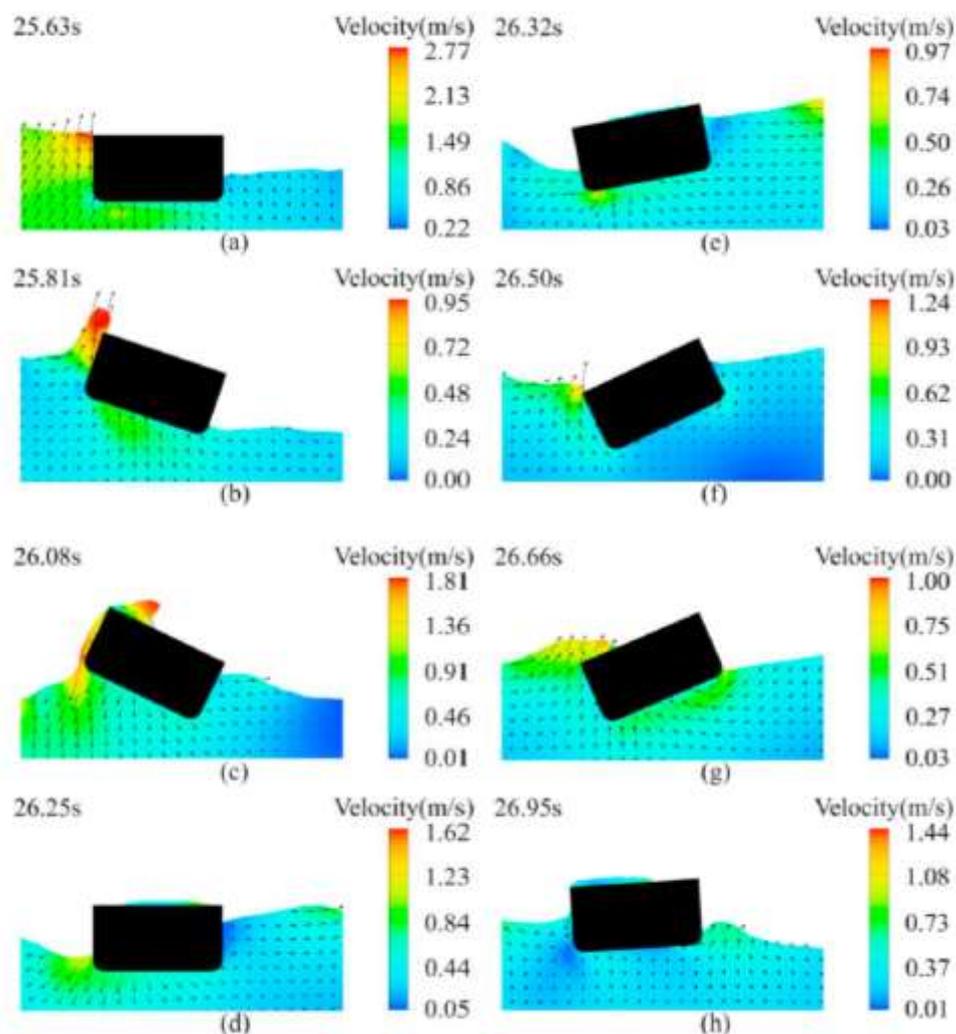


Рис. 1. Динамика судна под воздействием удара одиночной волны в борт [4]

Видно, что на начальном этапе воздействия волны на борт судна происходит существенная трансформация ватерлинии, что делает невозможным использование диаграммы статической остойчивости.

3. Результаты исследования

Разработанная в настоящей статье методика была применена для оценки остойчивости судов на разрушающемся волнении. В частности, были рассмотрены дрейфтер водоизмещением 45,8 т и танкер, имеющий водоизмещение порожнем 16300 т. Результаты расчёта для первого судна представлены на рис. 2. Расчёт выполнялся для трёх значений максимальных высот разрушающихся волн при отношении высоты волны к глубине акватории $\gamma = 0,8$. Сплошные линии соответствуют расчёту по предложенной методике, учитывающей трансформацию ватерлинии, пунктирные линии – традиционно применяемой процедуре оценки остойчивости, не учитывающей этого фактора. Видно, что при всех рассмотренных высотах волн расчёт по предложенной схеме даёт большие углы крена, а при максимальной высоте разрушающихся волн $h_{оп\ max} = 3,3\text{ м}$ наблюдается опрокидывание судна. При этом использование традиционной схемы оценки остойчивости приводит к выводу, что судно выдерживает удар и такой волны.

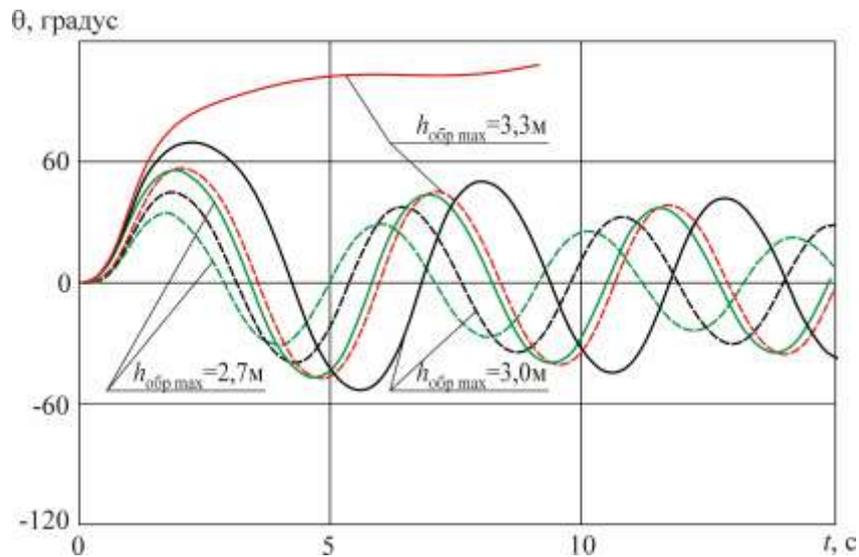


Рис. 2. Моделирование динамики дрефтера в условиях воздействия разрушающейся волны

Результаты моделирования динамики танкера водоизмещением 16300 т представлены на рис. 3 и рис. 4. На рис. 3 представлены зависимости крена судна от времени, пунктирная линия соответствует исходной модели, предложенной Н.Б. Севастьяновым, и не учитывает трансформации ватерлинии при подходе одиночной волны к борту судна, сплошная линия построена с использованием предложенных в настоящей статье подходов. На рис. 4 приведены зависимости дрейфа от времени. Видно, что трансформация ватерлинии оказывает существенное влияние на крен судна, при этом величина дрейфа в обеих моделях практически совпадает. Зависимость, представленная на рис. 3 пунктиром (традиционная модель), показывает, что судно выдерживает удар разрушающейся волны, а максимальный угол крена не превышает 40° . При этом динамика судна характеризуется возникновением затухающих колебаний относительно положения равновесия.

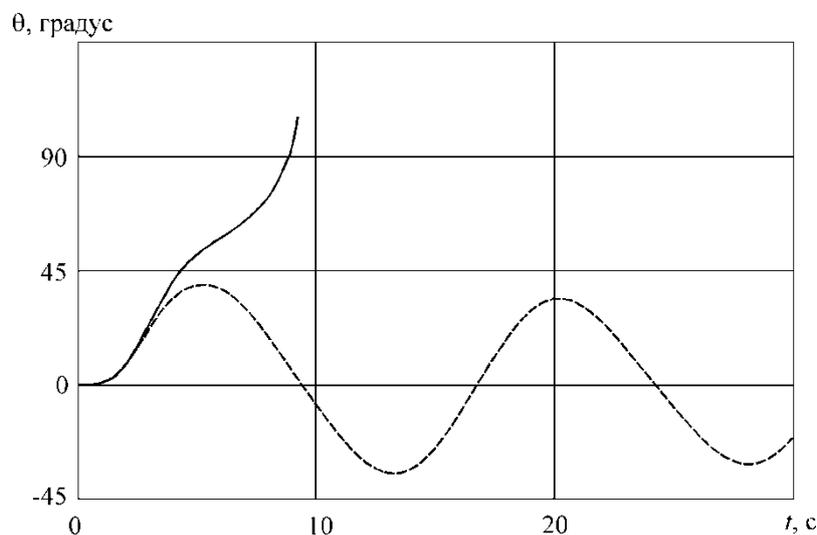


Рис. 3. Зависимости крена судна от времени с учетом (сплошная линия) и без учёта (пунктирная линия) трансформации ватерлинии

Ситуация, показанная на рис. 3 сплошной линией (предложенная в настоящей статье модель), соответствует резкому нарастанию угла крена и опрокидыванию судна в результате воздействия разрушающейся волны. Таким образом, анализ динамики судна под воздействием разрушающейся волны с учётом трансформации ватерлинии и без учета этого обстоятельства приводит к прямо противоположным выводам, а игнорирование указанного обстоятельства сопровождается ошибкой в опасную сторону при оценке остойчивости судна.

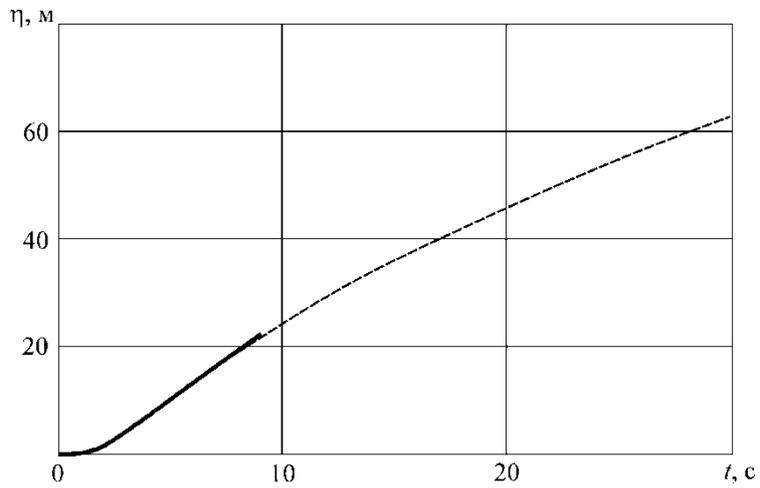


Рис. 4. Зависимости дрейфа судна от времени с учетом (сплошная линия) и без учёта (пунктирная линия) трансформации ватерлинии

На рис. 5 представлены положения судна в процессе развития аварийной ситуации, связанной с его опрокидыванием.

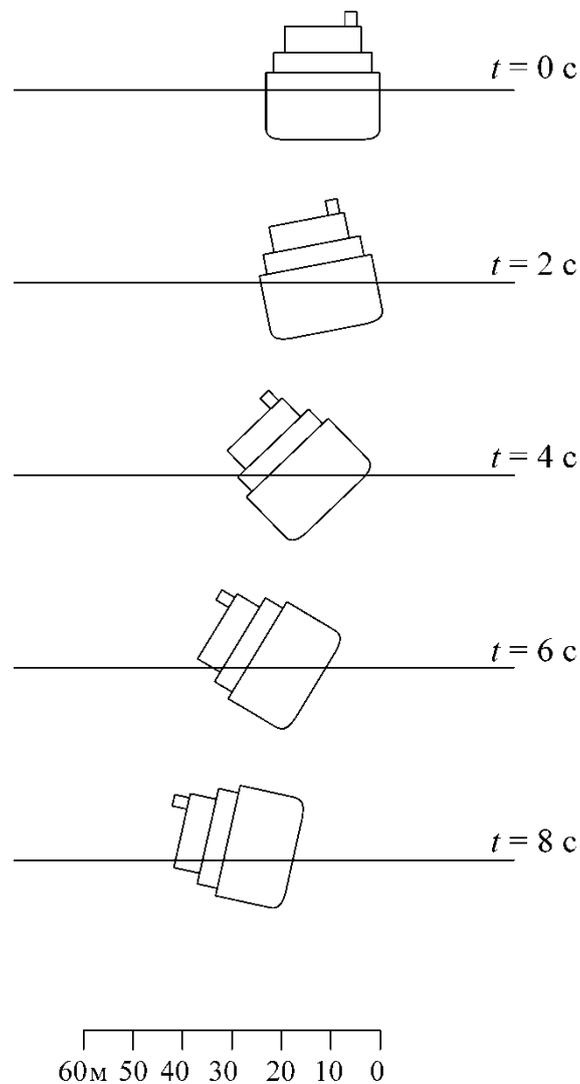


Рис. 5. Последовательные положения судна при ударе в борт разрушающейся волны

Как видно из рис. 5, воздействие разрушающейся волны приводит к резкому нарастанию крена судна и его одновременному дрейфу в направлении воздействия волны. При этом аварийная ситуация развивается достаточно быстро, в результате чего у судовой команды практически нет

возможности оказать влияние на её исход. Поэтому для повышения безопасности судов, находящихся в условиях разрушающегося волнения, целесообразно применять бортовые интеллектуальные системы, позволяющие прогнозировать параметры волнения и оценивать остойчивость судна на разрушающемся волнении с использованием предложенных в настоящей работе подходов.

4. Заключение

Проведенный анализ показал, что учёт трансформации ватерлинии судна при ударе разрушающейся волны позволяет более объективно судить о его остойчивости в подобной ситуации и избежать ошибки в опасную сторону, свойственной традиционным методам расчёта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Холодилин А.Н., Шмырев А.Н. Мореходность и стабилизация судов на волнении. – Л.: Судостроение, 1976. – 328 с.
2. Севастьянов Н.Б. Остойчивость промысловых судов. – Л.: Судостроение, 1970. – 200 с.
3. Севастьянов, Н.Б. Расчётные ситуации для оценки остойчивости и физические картины опрокидывания судов / Н.Б. Севастьянов // Труды КТИРПиХ. – Калининград, 1982. – Вып. 99. – С. 110–122.
4. Wang, J. Three-dimensional study on the interaction between a container ship and freak waves in beam sea / J. Wang, H. Qin, Z. Hu, L. Mu // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. – 2023. – Vol. 15. – P. 100509.

RESEARCH OF STABILITY OF VESSELS ON CRUSHING WAVES

¹Burakovskiy Evgeny Petrovich, Dr. hab., professor;

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

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

^{1,3}Admiral N.G. Kuznetsov Naval Academy (Branch Kaliningrad),

Kaliningrad, Russia, e-mail: ¹e_burakovsky@mail.ru, ³v-y48@yandex.ru

²Baltic Fishing FleetState Academy, Kaliningrad, Russia, e-mail: paul_b@mail.ru

The article is devoted to the study of the dynamics of the vessel on a breaking wave. It is shown that traditional calculation methods do not allow to fully characterize the behavior of the vessel under the impact of a breaking wave. The analysis performed showed that taking into account the transformation of the ship's waterline in this situation makes it possible to more objectively judge its stability in such a situation and avoid an error in the dangerous direction inherent in traditional calculation methods.

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ БАЛЛАСТНО-ОСУШИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ СУДНА

¹Великанов Николай Леонидович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой судостроения, судоремонта и морской техники;

²Наумов Владимир Аркадьевич, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры техносферной безопасности и природообустройства

^{1,2}Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия, e-mail: ¹nikolaj.velikanov@klgtu.ru; ²vladimir.naumov@klgtu.ru

Представлены результаты исследования процессов работы балластно-осушительных систем морских судов. Приведены тенденции развития и требования к этим системам. На конкретных примерах показан алгоритм расчета параметров системы при работе насоса в сети. Получены зависимости в рабочей точке расхода от диаметра трубопровода при различном количестве поворотов, напора от диаметра трубопровода при различном количестве поворотов, расхода от длины трубопровода.

Дренаж прогулочных палуб, грузовых трюмов и плавательных бассейнов регулируется стандартом ISO 15749-5 [1]. Эта серия стандартов учитывает основные правила и минимальные требования, касающиеся гигиенических требований и защиты морской среды. Данная часть стандарта ISO 15749 не применяется к трубопроводным системам, по которым транспортируются маслянистые, химически загрязненные сточные воды, способные образовывать легковоспламеняющиеся смеси газа и кислорода.

Современные суда перевозят жидкий балласт, который включает пресную воду, соленую воду или солоноватую воду в различных балластных цистернах [2]. Поскольку суда увеличиваются в размерах, а груз, перевозимый судами, варьируется от порта к порту (из-за глобальной экономики, состояния судна, местных требований к рейсу и т.д.), цистерны с водяным балластом используются для компенсации дифферента и остойчивости судна для безопасного морского перехода. Если предположить, что на судне нет балластной системы, то в таких случаях могут возникнуть следующие условия: гребной винт может не полностью погрузиться в воду, что повлияет на эффективность работы двигателя судна; судно может накрениться или получить дифферент на нос или корму, поскольку грузоподъемность судна достигнута не полностью; нагрузки на судно при сдвиге и кручении могут увеличивать напряжения в конструкции судна, приводя к возникновению изгибающих моментов и захлопыванию; судно может столкнуться с проблемами динамической поперечной и продольной неустойчивости.

Цистерны с водяным балластом расположены в разных местах в зависимости от типа судна.

Верхние резервуары имеют треугольную форму и снабжены крыльями с обеих сторон грузовых отсеков. Они чаще встречаются на судах-сухогрузах и изготавливаются с использованием поперечных шпангоутов,

Эти резервуары непосредственно подсоединены к магистральным балластным трубопроводам судна, и во время операции погрузки/выгрузки груза объем судовой балластной воды в верхнем резервуаре поддерживается в равновесии с весом груза.

Конструкция верхних резервуаров помогает избежать перемещения груза в недоступных для захвата местах, поскольку такие конструкции резервуаров помогают перевозить такие грузы, как зерно.

Аналогичны по конструкции верхним балластным цистернам нижние бункерные емкости. Эти водяные балластные цистерны расположены на нижних бортах каждого грузового отсека судов и являются продолжением резервуаров с двойным дном, которые проходят по центру судна.

Двойное дно судна является элементом безопасности, позволяющим избежать попадания воды в случае посадки на мель или столкновения. Эти пустые пространства используются для хранения судового водяного балласта для стабилизации судна.

Баки с двойным дном расположены между носовой частью и кормовой переборкой, разделяющей машинное отделение.

На некоторых судах, таких как контейнеровозы и суда для наливных грузов, пространство с двойным дном разделено поперечно на три секции (вместо двух). Это сделано для создания коффердама в центре, известного как киль воздуховода, который используется, в том числе, для работы клапанов балластных и бункерных цистерн, а также для прокладки трубопроводов для судовых балластных цистерн и системы бункеровки.

Конструкция резервуаров напрямую связана с длиной судна, поскольку судно длиной более 120 м будет иметь дополнительный продольный каркас по сравнению с поперечным каркасом для судов длиной менее 120 м.

В отличие от верхних бортовых цистерн, эти водяные балластные цистерны примыкают к резервуарам для мазута с двойным дном. Следовательно, они обычно не подключаются к балластной системе, чтобы избежать какой-либо вероятности загрязнения.

Носовые и кормовые пиковые балластные цистерны предназначены для выполнения точных операций по судну. Для достижения требуемой уравниваемости эти резервуары заполняются только частично, чтобы избежать эффекта свободной поверхности жидкости.

Конструкция носовых и кормовых цистерн отличается от других балластных цистерн судов, поскольку их форма довольно неправильная из-за расположения, и их форма сильно зависит от конструкции носа и кормы судна.

Конструкция этих судовых балластных цистерн такова, что они узкие в нижней части, и по мере продвижения цистерны вверх ширина цистерны значительно увеличивается. Ширина резервуара соответствует ширине корпусов судов.

Резервуар для водяного балласта на судне оснащен датчиками уровня для управления клапанами и балластными насосами для безопасной балластировки.

В машинном отделении установлено несколько балластных насосов, которые забирают воду из магистрального трубопровода для забортной воды и во время операции дебалластировки сбрасывают воду из балласта за борт по трубопроводу с клапаном. Система оснащена датчиками контроля уровня балластной цистерны, и отключение насоса контролируется, как только уровень воды достигает уровня датчика, чтобы активировать отключение.

Во время нахождения судна в загруженном состоянии балластная цистерна будет оставаться пустой. В такой ситуации трехходовой клапан в линии отбора проб будет установлен в определенное положение.

Данные по объему балластной цистерны и степени ее заполнения используются для расчета расхода балластного насоса, который, в свою очередь, определяет время, необходимое для завершения операции балластировки или дебалластировки. Это помогает своевременно завершить операцию по обеспечению устойчивости для поддержания расчетного времени отправления судна [2].

Биоинвазия, вызванная сбросом балластных вод, является одной из многих проблем загрязнения морской среды [3]. Ряд стран признали проблемы, связанные с оборотом балластных вод. Страны, пораженные инвазивными видами, разработали конкретные законы для сброса балластных вод в своих соответствующих портах. При координации международной морской организации ИМО, страны разрабатывают и прилагают усилия для внедрения общепринятых руководящих принципов, которым должно соответствовать каждое судно при заходе в любой порт. В связи с этим ИМО в конвенции (2004) о балластных водах предложила руководящие принципы надлежащего управления балластными водами. Эти принципы включают замену балластных вод, очистку балластных вод, портовые приемные сооружения, процесс утверждения технологии, отбор проб балластных вод, методы анализа балластных вод и оценку рисков в соответствии с конвенцией. В конечном счете, конвенция 2004 года была признана недостаточной для обеспечения полной ликвидации биоинвазии. С годами в конвенцию 2004 года вносятся поправки, касающиеся управления балластными водами. Происходит обмен технологиями между странами при создании лабораторий по отбору проб и испытаниям. Для понимания биоинвазии на основе региона и характеристик различных целевых видов при оценке риска необходимо проводить анализ и исследование выборок для конкретного региона. Стандарт, упомянутый в конвенции 2004 года, в будущем можно изменить с конкретного допуска по количеству на стандарт "отсутствие микроорганизмов" в балластной воде для сброса. Новая комбинация систем балластных вод и системы "без балласта" с

модификацией конструкции судна должна быть протестирована, разработана и внедрена для обеспечения экологического баланса и жизнеобеспечения морских экосистем [3, 4].

Методика расчета гидравлических параметров балластно – осушительных систем описана в работе [5]. Для определения гидравлических параметров судовых трубопроводных систем зависимости производительности – напора представлены в виде параболы.

Для рабочей точки производительность насоса:

$$Q_{PT} = \sqrt{\frac{H_0 - H_C}{b - a}}, \quad (1)$$

где H_0 , a – эмпирические коэффициенты, H_C – статический напор трубопровода, b расчетный коэффициент.

Для сухогруза [5-7] (рис. 1) были рассчитаны различные варианты балластно – осушительной системы.

Результаты расчетов приведены на рис 2-5. Показаны зависимости расхода, напора, мощности в рабочей точке от различных параметров.



Рисунок 1. Самоходное сухогрузное судно RDB 63.01[9]

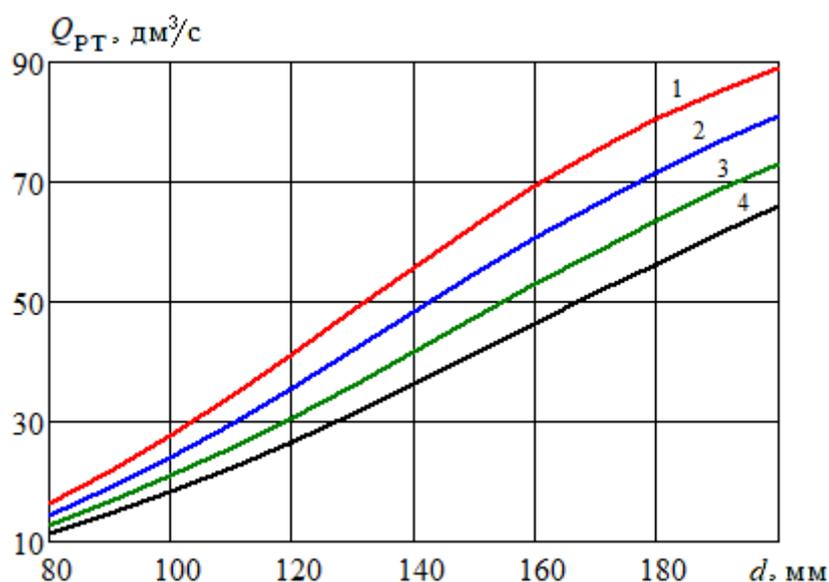


Рисунок 2. График расход - диаметр трубопровода при $L = 200$ м, $\Delta = 0,2$ мм и числе поворотов: 1 – $m=10$, 2 – $m=25$, 3 – $m=45$, 4 – $m=70$.

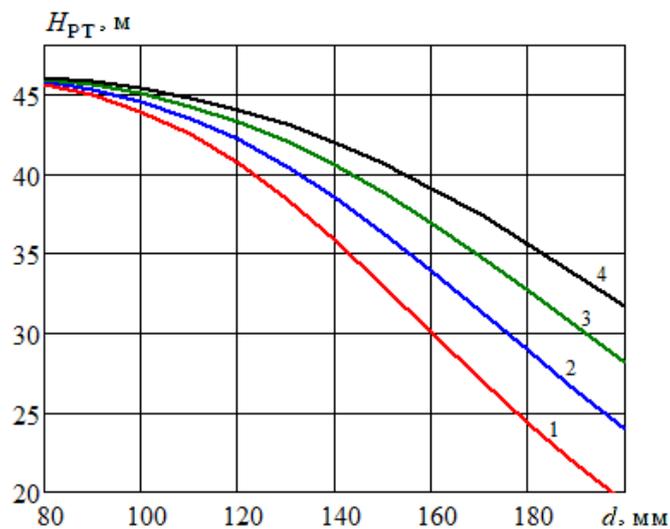


Рисунок 3. График напор - диаметр трубопровода при $L=200$ м, $\Delta=0,2$ мм и числе поворотов: 1- $m=10$, 2- $m=25$, 3 - $m=45$, 4 - $m=70$.

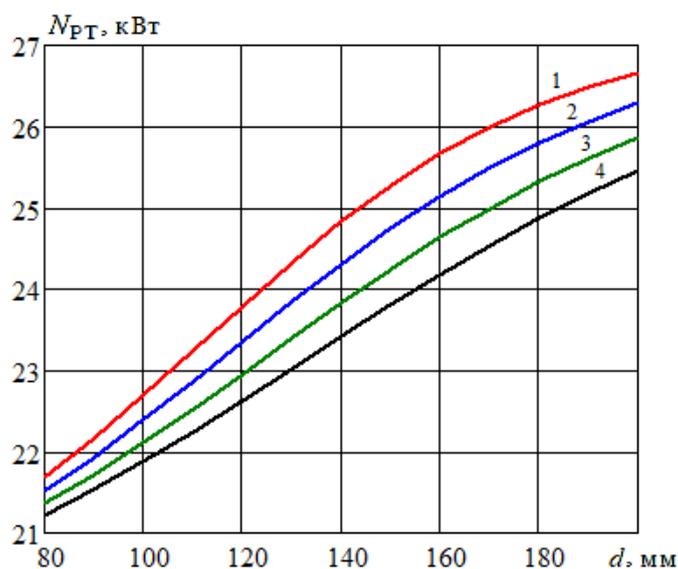


Рисунок 4. График мощность - диаметр трубопровода при $L=200$ м, $\Delta=0,2$ мм и числе поворотов: 1- $m=10$, 2- $m=25$, 3 - $m=45$, 4 - $m=70$.

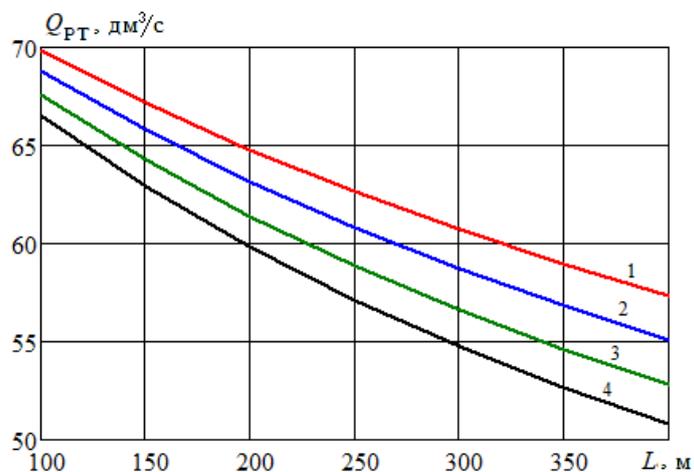


Рисунок 5. График расход - длина трубопровода при $d=160$ мм, $m=20$ и различной абсолютной шероховатости: 1- $\Delta=0,1$ мм, 2- $\Delta=0,2$; 3 - $\Delta=0,4$ мм; 3 - $\Delta=0,7$ мм.

Методика позволяет проводить расчеты гидравлических показателей балластно – осушительных систем на стадии проектирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Drainage systems on ships and marine structures – Part 1[Electronic resource]. URL: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:15749:-1>(accessed: 02.02.2023)
2. A Guide To Ballast Tanks On Ships [Electronic resource]. URL: <https://www.marineinsight.com/naval-architecture/a-guide-to-ballast-tanks-on-ships/> (accessed: 02.02.2023).
3. Lakshmi E., Priya M., Achari V. S. Systems and Operation of Ballast Water in Ships with the Changing Ballast Water Management Policy. DOI: 10.5772/intechopen.99552URL:<https://www.intechopen.com/chapters/78698> (accessed: 02.02.2023).
4. Muhan Cheng, Jia-An Ye, Ta-Kang Liu Exploring Ballast Water Management in Tai-wan Using the PSR Conceptual Model Based on Stakeholders' Perspectives. - Water 2022, 14(15), 2409; <https://doi.org/10.3390/w14152409>.
5. Великанов Н.Л., Наумов В.А. Гидравлический проектный расчет судовой балластно - осушительной системы // Техничко-технологические проблемы сервиса. – №1(63) 2023. – С. 19-23.
6. РЦПКБ «Стапель». Самоходное сухогрузное судно RDB-63-01[Электронный ресурс]. URL: https://www.stapel.ru/projects/sukhogruznye-suda/samokhodnoe-sukhogruznoe-sudno-rdb-63-01/?sphrase_id=2585 (дата обращения: 02.02.2023).
7. HI-Sea Co. CLZ marine vertical self-priming centrifugal pump [Electronic resource]. URL: <http://www.hiseamarine.com/clz-marine-vertical-self-priming-centrifugal-pump-448.html> (accessed: 02.02.2023).

SELECTION OF BALLAST AND DRAINAGE SYSTEM PARAMETERS VESSEL SYSTEMS

¹Velikanov Nikolay Leonidovich, Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of the Department of Shipbuilding, Ship Repair and Marine Engineering;

²Naumov Vladimir Arkadevich, Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor of the Department of Technosphere Safety and Environmental Management

^{1,2}Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,
e-mail: ¹nikolaj.velikanov@klgtu.ru; ²vladimir.naumov@klgtu.ru

The results of a study of the processes of operation of ballast and drainage systems of marine vessels are presented. The development trends and requirements for these systems are given. Specific examples show the algorithm for calculating the system parameters when the pump is running in the network. The dependences at the operating point of the flow rate on the diameter of the pipeline with a different number of turns, the pressure on the diameter of the pipeline with a different number of turns, the flow rate on the length of the pipeline are obtained.

АРХИТЕКТУРА, ОБЛИК И РЕАЛИЗАЦИЯ ПЕРСПЕКТИВНОЙ ПРИВЯЗНОЙ ВЫСОТНОЙ СИСТЕМЫ КОРАБЕЛЬНОГО БАЗИРОВАНИЯ

Давлюд Игорь Игоревич, канд. техн. наук, докторант

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

Рассмотрены цели и задачи перспективной привязной высотной системы, а также принципы формирования ее архитектуры и облика, удовлетворяющего требованиям корабельного базирования: компактная конструкция БПЛА и корабельного модуля, размещение в стандартном транспортно-пусковом контейнере для универсальной вертикальной пусковой установки корабля. Выбрана оптимальная аэродинамическая схема БПЛА, разработана структура высоковольтного питания, состав привязной системы. Определены и обоснованы необходимые требования к корабельной привязной системе. Представлен перспективный облик подвесной системы и описана ее работа.

В последнее десятилетие существенно возрос интерес к беспилотным летательным аппаратам (БПЛА), построенным по схеме мультикоптер – летательный аппарат, имеющий более двух несущих винтов. На их базе создаются робототехнические системы для решения разнообразных задач как в военной, так и в гражданских областях [1, 2]. Опыт участия РФ в конфликте САР, а также СВО на Украине показал эффективность применения БПЛА различного назначения.

Использование БПЛА в ВМФ для выполнения различных задач является перспективным направлением. Вследствие эксплуатационных и технических особенностей, с которыми сталкивается флот при использовании БПЛА на кораблях, не приспособленных для их функционирования, особое значение имеет обеспечение возможности размещения, взлета и посадки БПЛА [3]. Вместе с этим, главным недостатком самих БПЛА является малое время работы, ограниченное емкостью аккумуляторов (или запасом топлива). В связи с этим, БПЛА не могут оперативно использоваться на кораблях, а также эффективно и продолжительно функционировать.

Решением данной проблемы может быть разработка и создание привязной высотной системы корабельного базирования (ПВС). ПВС – совокупность беспилотного летательного аппарата, механически связанного с корабельным модулем, средств его управления, хранения, а также обеспечения питания. В таких системах электропитание двигателей и аппаратуры полезной нагрузки должно осуществляться по тонкому кабель-тросу от корабельных источников энергии, при этом БПЛА может эксплуатироваться длительное время без посадки, а вся ПВС должна быть размещена в контейнере хранения. Использование ПВС в ВМФ может решать ряд задач: организация связи, целеуказание, радиоэлектронная борьба и разведка. Одновременно с радиолокационными задачами, ПВС могут применяться для видеонаблюдения, например за БПЛА и безэкипажными катерами (БЭК).

Предельная дальность обнаружения цели ограничена прямой видимостью, значение которой определяется известной формулой:

$$L_{max} \approx 4.12(\sqrt{h_a} + \sqrt{h_c}),$$

где h_a – высота антенны (наблюдателя), h_c – высота цели.

При высоте цели $h_c = 0$ (например, БЭК) и наблюдении с верхней палубы корабля ($h_a \approx 10$ м) дальность обнаружения составит $L_{max} \approx 13$ км. Однако, при подъеме средств наблюдения на высоту $h_a \approx 100$ м, предельная дальность возрастет более чем в 3 раза: $L_{max} \approx 41$ км.

Основным направлением исследования является создание перспективной ПВС, удовлетворяющей требованиям корабельного базирования: компактная конструкция БПЛА и корабельного модуля, размещение в стандартном транспортно-пусковом контейнере (ТПК) для универсальной

вертикальной пусковой установки (УВПУ). Разработка такой ПВС требует проведение комплекса работ: выбор аэродинамической схемы БПЛА, определение состава и архитектуры функционирования, облика, места хранения и запуска ПВС, определение основных требований к ПВС.

При выборе аэродинамической схемы БПЛА, необходимо учитывать особенности ее работы и условия эксплуатации [4]. Одна из главных задач – простота и надежность конструкции, сведение к минимуму зависимости пространственной ориентации БПЛА от силы и направления ветровой нагрузки. Исходя из этого, для ПВС целесообразно использование одной из трех аэродинамических схем БПЛА: одновинтовая с несколькими рулевыми устройствами (рулевыми винтами), симметрично расположенными относительно оси несущего винта; соосная; мультироторная, с четырьмя и более винтами симметрично расположенными относительно центра БПЛА. Основные особенности аэродинамических схем БПЛА для построения ПВС, представлены в таблице 1.

Таблица 1

Особенности аэродинамических схем БПЛА

Особенности	Тип аэродинамической схемы БПЛА		
	одновинтовая	соосная	мультироторная
достоинства	- простая, легкая конструкция; - простая, компактная трансмиссия	- курсовая ориентация менее всего зависит от ветра	- высокая эффективность; - простота конструкции
недостатки	- наличие рулевых винтов	- сложность конструкции (автомат перекоса)	- большое количество двигателей

Все типы БПЛА имеют свои особенности и недостатки, однако, несмотря на относительную сложность конструкции, в ПВС выбрана соосная схема – такой тип БПЛА имеет минимальную площадь в плане (наиболее пригоден для хранения в контейнере) и компактные размеры.

В настоящее время известны различные конструкции ПВС [5 – 7]. Однако эти системы не приспособлены для размещения, запуска и посадки в ТПК на корабле. Рассматриваемая в настоящей работе ПВС лишена этого недостатка: все оборудование и БПЛА размещены в стандартном ТПК для УВПУ. Таким образом, для ПВС не требуется отдельного оборудованного места хранения. Загрузка и хранения в УВПУ имеет ряд достоинств: гибкость и универсальность применения (ПВС может эксплуатироваться на любом носителе с УВПУ), вариативность загрузки (можно загружать несколько ПВС в разных модулях УВПУ), скрытность применения (противник не сможет определить что загружено в УВПУ).

С точки зрения архитектуры, перспективная ПВС представляет собой систему, состоящую из воздушного (БПЛА) и корабельного модулей, соединенных гибкой связью (кабель-тросом) и размещенных в стандартном транспортно-пусковом контейнере (ТПК) для вертикальной пусковой установки корабля (рис. 1).

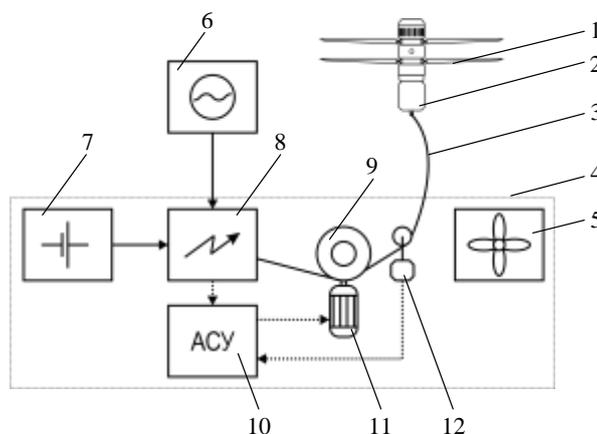


Рис. 1. Строение привязной высотной системы: 1– БПЛА, 2– полезная нагрузка, 3 – кабель-трос, 4 – корабельный модуль (транспортно-пусковой контейнер), 5 – место хранения БПЛА, 6 – корабельный источник энергии, 7 – резервный источник энергии (аккумулятор), 8 – преобразователь (конвертер) напряжения, 9 – лебедка, 10 – автоматическая система управления лебедкой, 11– привод лебедки, 12- датчик натяжения кабель-троса

В состав ПВС входит:

- ТПК с размещенным в нем необходимым оборудованием и местом хранения БПЛА;
- БПЛА большой грузоподъемности и длительным временем функционирования с соосной аэродинамической схемой, приспособленный для размещения в ТПК. Он предназначен для подъема и удержания на определенной высоте полезной нагрузки;
- преобразователя напряжения большой мощности, обеспечивающий функционирование БПЛА с полезной нагрузкой;
- автоматическая система управления лебедкой для стабилизации БПЛА и обеспечения постоянного заданного натяжения кабель-троса;
- кабель-трос, равномерно намотанный на лебедку.

Для функционирования БПЛА необходима организация эффективного электропитания. Анализ зарубежных и отечественных источников показал, что наиболее эффективна организация питания высоковольтным напряжением [8]. Схема организации питания переменным и постоянным током представлена на рисунке 2и в общем случае состоит из источника переменного тока (корабельное питание), выпрямителей и преобразователей.

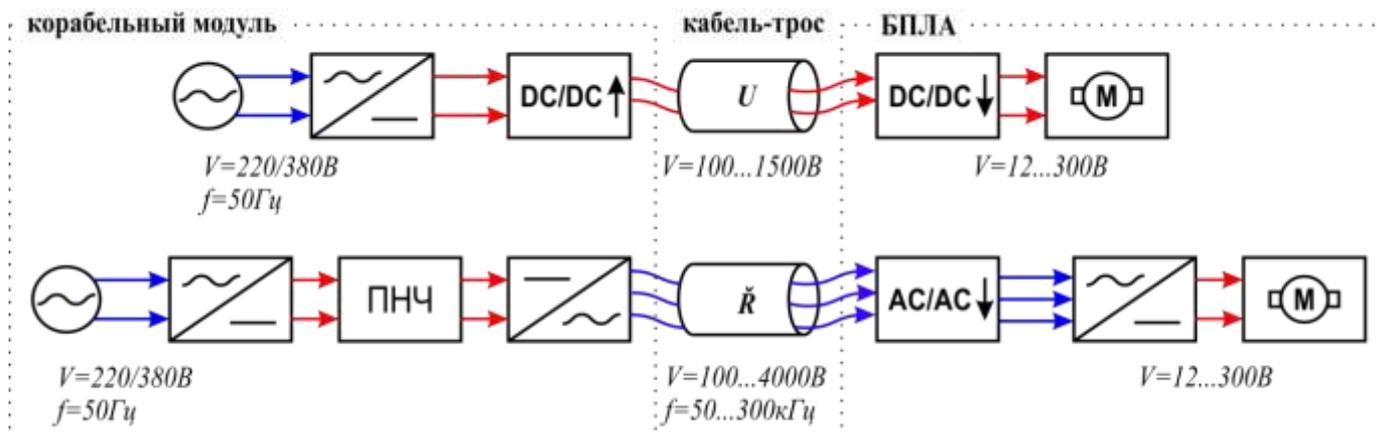


Рис. 2. Схема организации питания постоянным током (верхний рисунок) и переменным током (нижний рисунок)

При таких схемах питания (не зависимо от рода тока) к кабель-тросу ПВС предъявляются повышенные требования:

- достаточная механическая прочность;
- проводники малого сечения ($\approx 0,5 \text{ мм}^2$);
- минимально-возможная погонная масса и толщина;
- максимально возможная пропускная способность по мощности;
- широкий температурный диапазон эксплуатации;
- наличие высокоскоростного канала связи (предпочтительно оптоволокну);
- устойчивость к атмосферным воздействиям (солнце, дождь, снег и т.д.).

Данные требования определяются свойствами используемых материалов и конструкцией кабель-троса. При использовании постоянного тока в кабель-тросе можно применять две медные жилы, сравнительно большой площади сечения, а значит и большой погонной массой кабель-троса. Вместе с этим КПД при передаче постоянного тока меньше переменного. При выборе переменного тока, в проводниках возникают волновые процессы, заключающиеся в возникновении отраженной волны, что приводит к повышению напряжения на отдельных участках линии. Увеличение числа фаз способствует уменьшению волнового сопротивления. В [9] определено, что наибольшая мощность будет достигнута при использовании пятижильного проводника

При одинаковой длине кабель-троса, род тока целесообразно выбирать исходя из максимальной планируемой мощности: до 15 кВт целесообразней организация питания постоянным током, а свыше 15 кВт – переменным током высокой частоты [10]. Параметры кабеля при напряжении 400В представлены в таблице 2.

Параметры кабеля питания в зависимости от рода тока

Мощность, кВт	Постоянный ток		Переменный ток	
	Диаметр жилы, мм	Погонная масса, кг/м	Диаметр жилы, мм	Погонная масса, кг/м
5	6,33	0,072	5,7	0,056
20	8,472	0,157	6,5	0,076

Предлагаемый состав кабель-троса включает медные изолированные проводники (количество и сечение зависит от рода тока) для передачи высокого напряжения большой мощности, оптоволоконно для обмена информацией с большой пропускной способностью, а также кевларовой основы, обеспечивающей механическую связь.

Полнота состава требований определяется относительно важнейших свойств ПВС, которыми она должна обладать. Для ПВС к таким свойствам относится функциональность, компактность, устойчивость позиционирования и ресурсоемкость [11].

В качестве основных требований к ПВС являются следующие:

- масса полезной нагрузки, не менее 10 кг;
- высота зависания платформы до 100 метров;
- время непрерывной работы БПЛА и оборудования, не менее суток;
- масса кабеля-троса, не более 10 кг;
- компактность БПЛА и оборудования;
- работоспособность при любых климатических условиях;
- нормальная эксплуатация при: температуре $-35^{\circ}\text{C} \dots +55^{\circ}\text{C}$, скорости ветра до 20 м/с, скорости корабля до 15 узлов; волнении моря до 5 баллов.

Для удовлетворения вышеперечисленных требований необходимо определить облик и схему построения ПВС, обладающую наилучшими массогабаритными и эксплуатационными показателями. Внешний вид предлагаемой ПВС представлен на рисунке 3.

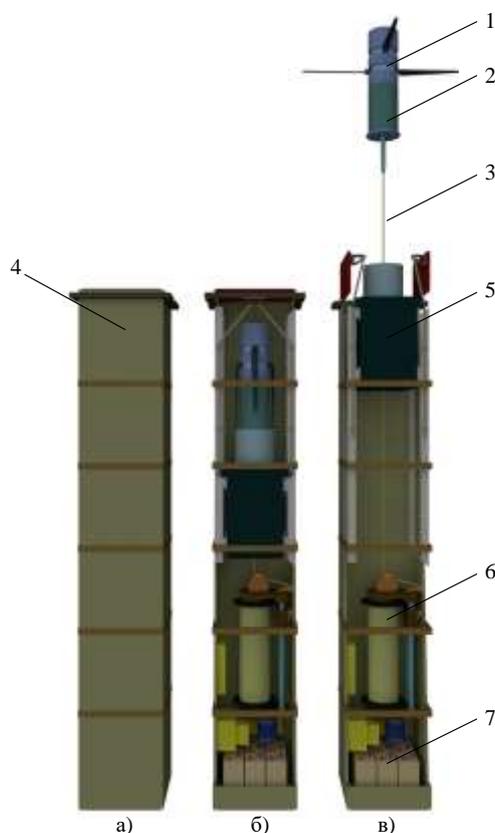


Рис. 3. Внешний вид ПВС: а) – ТПК для ВПС; б) – ПВС в походном положении; в) – ПВС в развернутом положении. 1 – БПЛА, 2 – полезная нагрузка, 3 – кабель-трос, 4 – ТПК, 5 – подвижная тумба со стаканом для крепления БПЛА, 6 – барабан с лебедкой, 7 – аккумулятор

Все оборудование ПВС и БПЛА размещены в стандартном ТПК с двусторонними крышками. БПЛА с полезной нагрузкой в походном положении установлен и зафиксирован на стакане подвижной тумбы, в центре которого выполнено сквозное отверстие со стопорным устройством. В нижней части БПЛА закреплен кабель-трос, который через датчик натяжения, систему роликов и кабелеукладчик, наматывается на барабан лебедки, приводимый в движение приводом, управляемым системой управления. Подвижная тумба имеет возможность вертикального перемещения благодаря взаимодействию зубчатой рейки, установленной на внутренней стенке корпуса и зубчатых колес, приводимых в движение приводом. Напряжение питания для БПЛА и системы управления поступает от корабельного источника, однако при аварийной ситуации предусмотрены аккумуляторы, расположенные в донной части ТПК. Система управления служит также для преобразования корабельного напряжения в высокое, для передачи по кабель-тросу и дальнейшего понижения бортовым преобразователем в необходимое для питания БПЛА и оборудования.

ПВС работает следующим образом. По сигналу на развертывание ПВС открывается крышка УВПУ и крышки ТПК. После открытия створок крышки, поднимается стакан с установленным ТПК, жестко закрепленный на тумбе. После подъема тумбы в крайнее верхнее положение запускаются винты БПЛА, приводимых в движение парой электродвигателей, получающих питание по кабель-тросу и БПЛА начинает вертикальный взлет. Система управления формирует необходимое напряжение для привода лебедки, датчик натяжения при этом служит для поддержания установленной силы натяжения кабель-троса, независимо от качки корабля и предотвращения аварийных ситуаций, посредством выработки сигналов для системы управления. Совершив набор высоты, БПЛА стабилизируется относительно горизонта и курса с заданной точностью и удерживается в этом положении в процессе всей работы. Стабилизация БПЛА во время работы осуществляется автоматически с помощью системы датчиков: гироскопа, акселерометра, барометрического высотомера (альтиметра), трехкомпонентного магнитометра. Управляющие сигналы формируются с помощью микропроцессора и позволяют осуществлять стабилизацию курса, крена и тангажа, а также противостоять возмущающим воздействиям ветра, движению и качке корабля. Компенсация сноса БПЛА из-за ветра или движения корабля осуществляется с помощью приемника глобальной навигационной системы и акселерометров. Компенсация вертикальных перемещений, вызванных волнением, осуществляется путем изменения длины кабель-троса по сигналам от бортовых датчиков и системы управления.

В случае обрыва кабель-троса предусмотрен автоматический режим аварийной посадки БПЛА с использованием энергии бортового аккумулятора. Развертывание, взлет, посадка и свертывание ПВС осуществляется автоматически.

Таким образом, благодаря конструктивным особенностям выполнения перспективной ПВС, разработана компактная и надежная конструкция повышенной грузоподъемности, обеспечивающая возможность размещения в стандартном ТПК для УВПУ. Вместе с этим, конструкция ПВС обеспечивает длительное хранение и эксплуатацию на кораблях без обслуживания, возможность автоматического развертывания и свертывания, ориентацию и стабилизацию БПЛА с полезной нагрузкой в пространстве.

Рассматриваемая в настоящей статье ПВС имеет значительные конкурентные преимущества, обладая лучшими основными характеристиками. Основным преимуществом данного проекта по сравнению с отечественными и зарубежными разработками является возможность контейнерного хранения и эксплуатации в УВПУ на кораблях, продолжительное функционирование полета, относительная скрытность наблюдения, скорость развертывания, защищенность канала передачи данных. При этом функционирование ПВС осуществляется в автоматическом режиме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. С.И. Макаренко Робототехнические комплексы военного назначения – современное состояние и перспективы развития / Системы управления, связи и безопасности №22016 С.72-128
2. Полтавский А.В., Жумабаева А.С., Бикеев Р.Р., Многофункциональные комплексы беспилотных летательных аппаратов: развитие в системе вооружения / Надежность и качество сложных систем №1(13) 2016 С.39-46

3. Соловьев, В.В., Шаров, С.Н. Судовые взлетные и посадочные устройства беспилотных летательных аппаратов / В.В. Соловьев, С.Н. Шаров // Морской вестник. – 2015. - №1(53). – С. 65-69.
4. Методы и алгоритмы проектирования и реализации привязных высотных беспилотных телекоммуникационных платформ / В.М. Вишнеvский // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ-2019) – М, 2019. С.40-43
5. Lv Q., Hu G. Design of Tethered UAV Low Altitude Relay Communication Networking Technology // The 2nd International Conference on Computing and Data Science. 2021, pp. 1-4 (Проектирование привязного ретранслятора БПЛА на малых высотах Коммуникационные сетевые технологии)
6. Привязная мониторинговая платформа с системой питания : пат 2724509 Рос. Федерация. №2019106709 / Масюков М.В., Лукашов П.П.; заявл. 11.03.19; опубл. 23.06.20. Бюл. № 18. 12с.
7. Телекоммутиационная воздушная платформа для беспроводных сетей передачи информации : пат 52296 Рос. Федерация. №2005131867/22/ Вишнеvский В.М., Терещенко Б.Н., Ачильдиев В.М., Мезенцев А.П., Мезенцев О.А.; заявл. 14.10.05; опубл. 10.03.06. 12с.
8. Сравнительный анализ вариантов построения проводной системы передачи энергии земля-борт для привязных высотных телекоммутиационных платформ В.М. Вишнеvский, Б.Н. Терещенко, Д.А. Тумченко, А.М. Ширванян / материалы 21Международной научной конференции – Москва: РУДН, 2018. – 474 с.
9. Оптимальная структура высоковольтного кабеля для передачи энергии с земли на борт привязной высотной беспилотной телекоммутиационной платформы / Вишнеvский В.М., Тумченко Д.А., Ширванян А.М. // Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова. М. – 2019. С. 197-205
10. Вишнеvский В.М., Терещенко Б.Н. Система энергосбережения с высокими уровнями КПД и надежности для удаленных потребителей через соединительную линию малых сечений и масс. Proceedings of the international Workshop «Distributed Computer and Communication Networks (DCCN-2011)». Moscow, Russia. М.: VINITI, 2011, Pp. 158-163.
11. Микони С.В., Полтавский А.В., Семенов С.С. Методология проектирования модели многомерного оценивания привязных высотных платформ на базе мультикоптеров // Надежность. 2022. №2. С. 55-63.

ARCHITECTURE, APPEARANCE AND IMPLEMENTATION OF A PROMISING TIED HIGH-ALTITUDE SHIP-BASED SYSTEM

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

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

Abstract. The work examines the goals and objectives of a promising tethered high-altitude system, as well as the principles of forming its architecture and appearance that meets the requirements of a ship-based system: compact design of the UAV and ship module, placement in a standard transport and launch container for a universal vertical ship launcher. The optimal aerodynamic design of the UAV was selected, the structure of the high-voltage power supply, and the composition of the tethered system were developed. The necessary requirements for the ship's harness system have been determined and justified. The perspective appearance of the suspension system is presented and its operation is described.

ПРОГНОЗ СОСТОЯНИЯ ЦИЛИНДРОПОРШНЕВОЙ ГРУППЫ СУДОВОГО ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ КОСВЕННЫМИ МЕТОДАМИ ДИАГНОСТИКИ МАСЛА

¹Мазур Екатерина Владимировна, ассистент;

²Великанов Николай Леонидович, д-р техн. наук, заведующий кафедрой судостроения, судоремонта и морской техники

¹Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта, Россия, Калининград, ул. А. Невского, 14, e-mail: ekaterina.mazur@gmail.com

²Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия, e-mail: nikolaj.velikanov@klgtu.ru,

Выход из строя таких элементов как поршневое кольцо и гильза цилиндра, работающих в условиях высокой температуры и большой нагрузки, влечет за собой снижение эффективности работы и срока службы судового двигателя. Своевременная диагностика и прогноз эксплуатационных характеристик элементов дизельного двигателя имеет существенное влияние на безопасность судна. В представленной работе предложен подход по оценке технического состояния цилиндропоршневой группы судовой энергетической установки, основанный на применении методов математического анализа к массиву данных, сформированному на основе результатов измерений параметров используемого моторного масла. Предложен математический подход, основанный на определении индекса эффективности физико-химических параметров отработанного моторного масла с последующим прогнозом появления неисправностей цилиндропоршневой группы посредством метода ветвей и границ.

Введение

Для снижения загрязнения морской среды, нормативами Международной Морской Организации с 2020 года установлен предел в 0,5% (и менее 0,1% в некоторых зонах) по массе на содержание серы в судоводном топливе. Коррозионное поведение элементов дизельного двигателя морского судна зависит от таких основных факторов как: тип смазочного масла, условия эксплуатации, содержание в топливе серы. Для отдельной части судовых двигателей применение высокосернистого топлива предотвращает абразивный износ между поршнем и цилиндром благодаря смазывающему свойству серы. Увеличение случаев высокого износа деталей и аномальной частоты коррозионного повреждения деталей цилиндропоршневой группы (ЦПГ) судовых дизельных двигателей, работающих на мазуте с низким содержанием серы привели исследователей к широкому изучению данного вопроса. Важной парой трения для преобразования энергии СЭУ является пара гильза цилиндра – кольцо поршня, наряду с этим потери на трение в данных элементах составляют значительную часть общих механических потерь (35-40%) [1]. Проработка механизмов возникновения износа ЦПГ проводилась при помощи системного изучения проблемы в ракурсе смазки гильзы цилиндра [2]. Суда, где подача цилиндровой смазки проводится через лубрикаторы точно во втулку, увеличивают подачу смазки, в остальных случаях решением, помогающим избежать сухого трения, служит добавление присадок и сокращение времени между сменой масла. Одним из самых эффективных способов для борьбы с коррозией элементов судовых энергетических установок, работающих на малосернистом топливе, стало широкое применение различных присадок, действующих как ингибиторы коррозии. Для обнаружения информации о состоянии пар трения двигателя с последующим прогнозом, базовой процедурой является технический контроль, частью которого служит получение первичной информации о состоянии объекта – анализ проб отработанного моторного масла.

Использование математической модели в диагностике масла

Как правило, на судах, определение вышедшего из строя узла происходит благодаря контрольно-измерительным приборам, при помощи которых осуществляется наблюдение за косвенными показателями: температурой применяемых жидкостей, нагрузкой, давлением и т.д. (рис.1). К косвенным методам диагностики также можно отнести наблюдение за состоянием масляной системы двигателя внутреннего сгорания (ДВС), сбор статистических данных, их обработка и определение индекса эффективности (ИЭФ) каждого исследуемого параметра моторного масла.

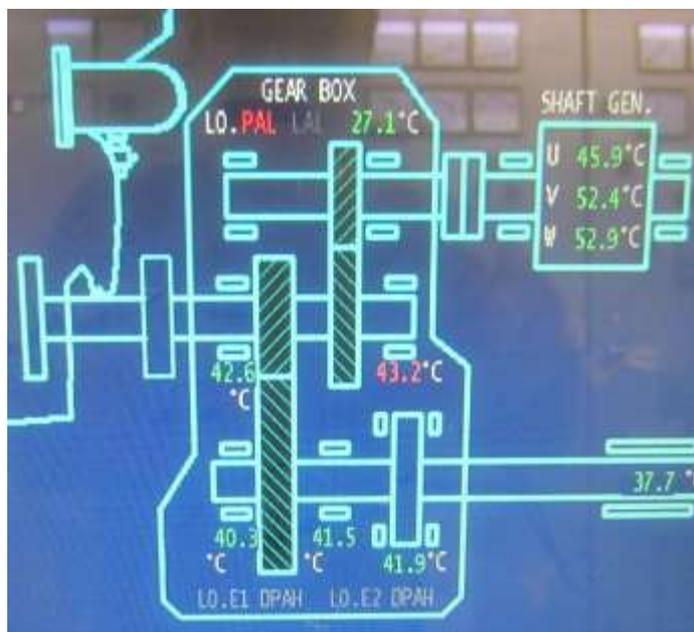


Рис. 1. Пример дистанционного контроля температур в главном редукторе (на опорных подшипниках)

Свойства масла, используемого в двигателях, должны строго соответствовать качеству топлива, данное сочетание ведет к сокращению времени износа технических элементов повышая тем самым надежность и увеличивая ресурс СЭУ. Большая часть механических потерь на трение приходится на поршневые кольца, тем самым побуждая ученых находить различные решения по снижению потерь. Теоретические и экспериментальные разработки в данной области привели к тому, что снижение трения и повышение износостойкости могут быть достигнуты благодаря текстурированию поверхности и смазки системы поршневое кольцо – цилиндр [3,4,5]. Показателем износа масла служит приближение значений параметров, характеризующих состояние к рабочим границам, а дальнейшая математическая обработка статистических данных лабораторных исследований помогает принять решение о последующем техническом обслуживании СЭУ и ее элементов. При наблюдении за концентрацией примесей в отработанном масле, сборе данных и обработке методом параметров процесса [6], существует возможность определения, какой именно узел СЭУ подвержен износу. Характерными материалами, используемыми при изготовлении составляющих ЦПГ на примере среднеоборотного двигателя MaK M32C служат легированная молибденом сталь – верхняя часть составного поршня, чугун – нижняя часть составного поршня и головка цилиндра (рис.2). Зная конструкционный материал деталей узлов и нормативные показатели металлических примесей в масле, можно определить, какой элемент наиболее подвержен износу.

Алгоритм математической обработки лабораторных исследований масла состоит из следующих этапов:

становление граничных значений физико-химических элементов масла (верхней и нижней контрольных границ).

приведение количественных значений физико-химических параметров (системных переменных) исследуемого масла к безразмерным величинам в диапазоне от 0 до 10. Формулы перевода (1) и (2):

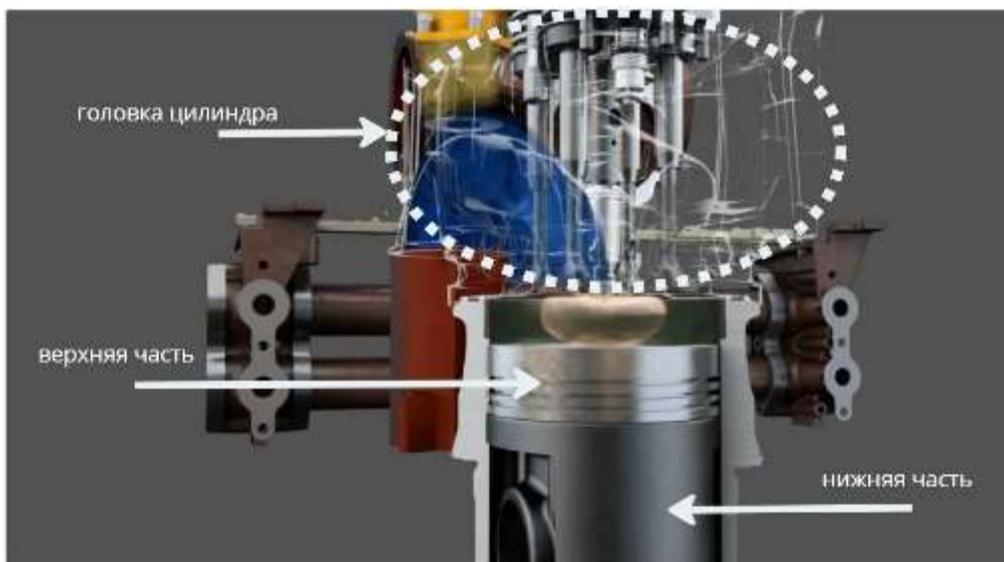


Рис. 2. Составной поршень дизельного двигателя Источник: industrialmarinepower.com

$$F_{ij} = 10 * \frac{P_h - P_t}{P_l - P_t}, \quad (1)$$

$$F_{ij} = 10 * \frac{P_h - P_l}{P_t - P_l}, \quad (2)$$

где F_{ij} – рассматриваемый элемент, P_h – фактическое значение исследуемого элемента, P_l – значение нижней контрольной границы, P_t – значение верхней контрольной границы.

Выражение (1) используется при условии, что концентрация переменной более предпочтительна в зоне нижней контрольной границы (P_l). К таким переменным относятся такие параметры, как вода, кислотное число, примеси металлических частиц. Выражение (2) применяется при условии, что присутствие исследуемого параметра предпочтительно в зоне верхней контрольной границы (P_t).

а основании полученных безразмерных показателей переменных составляется матрица параметров процесса (формула 3), где тело матрицы – кодированные значения исследуемых параметров, столбцы – время наработки ДВС в часах:

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{ccccccc}
 & T_1 & T_2 & \dots & \dots & T_j & \dots & T_m \\
 \hline
 \Pi_1 & F_{11} & F_{12} & \dots & \dots & F_{1j} & \dots & F_{1m} \\
 \Pi_2 & F_{21} & F_{22} & \dots & \dots & F_{2j} & \dots & F_{2m} \\
 \dots & \dots \\
 \Pi_i & F_{i1} & F_{i2} & \dots & \dots & F_{ij} & \dots & F_{im} \\
 \dots & \dots \\
 \Pi_n & F_{n1} & F_{n2} & \dots & \dots & F_{nj} & \dots & F_{nm}
 \end{array}
 \end{array}
 \quad (3)$$

пределение индекса эффективности по каждому параметру (выражения 4 и 5):

$$\text{ИЭФ}_i = R_i \cdot m, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (4)$$

где

$$\frac{1}{R} = \sum_{j=1}^n \frac{1}{Q_{ij}}, \quad (5)$$

Q_{ij} – точка данных матричного профиля, m – строки, n – столбцы.

Пример обработки данных части лабораторных исследований масла судового двигателя МАК М32С, касательно содержания металлов представлен на рис.4.

Параметры	Время работы оборудования (ч)							ИЭФ
	7121	8392	9662	10930	12198	13480	...	
Al (Алюминий) (ppm)	9,50	9,25	8,50	8,50	8,50	8,25	...	8,60
Cr (Хром) (ppm)	10,00	10,00	9,75	9,50	10,00	9,75	...	9,89
Cu (Медь) (ppm)	10,00	10,00	9,94	9,94	10,00	10,00	...	9,98
Fe (Железо) (ppm)	9,14	8,86	8,57	8,00	8,79	8,43	...	8,59
Ni (Никель) (ppm)	4,75	1,75	0,00	0,00	0,00	0,00	...	0,00
Pb (Свинец) (ppm)	10,00	10,00	10,00	9,94	9,94	10,00	...	9,97
Sn (Олово) (ppm)	9,50	10,00	9,75	9,00	9,50	10,00	...	9,78
Na (Натрий) (ppm)				4,86	6,57	5,57	...	4,90
Si (Кремний) (ppm)	8,20	8,00	7,40	7,00	7,00	6,80	...	7,14
V (Ванадий) (ppm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	...	0,00
Содержание нерастворимого осадка (объем, %)	8,20	7,60	9,33	9,33	9,33	9,33	...	7,64

Рис.3. Индексы эффективности исследуемых параметров масла

Снижение индекса эффективности ванадия (рис.3) может служить показателем износа легированной стали и в тоже время указывать на содержание тяжелого топлива в масле, что отрицательно влияет на охлаждение поршня. Во избежание скорого износа поршня, нижняя часть (юбка поршня) может проходить обработку нанесением никель-керамического покрытия, также снижение индекса эффективности никеля, может указывать на истирание легированных никелем стальных элементов. Высокое содержание в анализах натрия может указывать на попадание в масло воды. Сочетанное повышение содержания химических элементов, дает возможность более точного определения детали, подвергающейся износу, так, например, если в анализах присутствует комбинация «железо + хром и/или ванадий», это укажет на износ деталей цилиндропоршневой группы. Однако, подобных комбинаций с учетом значительного количества различных отклонений и дефектов внутри цилиндропоршневой группы может быть множество, в результате возникает нетривиальная задача – определения взаимосвязи между зафиксированными изменениями показателей масла с одной стороны и деградационными процессами, ведущими к конкретным отказам с другой стороны.

Таким образом возникает задача, создания алгоритма выявления неисправностей и построение прогноза об износе методом перебора допустимых вариантов комбинаций, что может быть реализовано путем применения метода ветвей и границ, при помощи которого обеспечивается дискретная оптимизация. На основе предложенного математического подхода разработано программное обеспечение, позволяющее накапливать и сопоставлять результаты лабораторных исследований с дальнейшим представлением информации о состоянии подконтрольного узла.

Применение метода ветвей и границ

Изложим общие принципы применения данного метода к рассматриваемой проблеме. Реализация больших возможностей для исследования в части диагностики неисправностей представляется при помощи наблюдение за сложными техническими системами, их математическим описанием и разработкой алгоритмов. Представим ЦПГ в форме структурного графа, принимая уровень - собственно цилиндропоршневая группа, как единое целое, а 2уровень – это узлы (D_n), входящие в систему: поршень, гильза цилиндра, маслосъемные кольца, компрессионные кольца, поршневой палец. (рис. 4а). Контроль параметров узлов системы задается определенными алгоритмами и при наличии более двух исходов наблюдения, диагностирование разделяется на отдельные бинарные проверки (рис. 4б), где вершинами графа являются мероприятия по диагностике, дугами – возможные результаты. Состояние узла (С) переходит в различные позиции во время проверки, q – процедура диагностирования с символами «0» - отказ или недопустимый результат и «1» - допустимый результаты контроля [7].

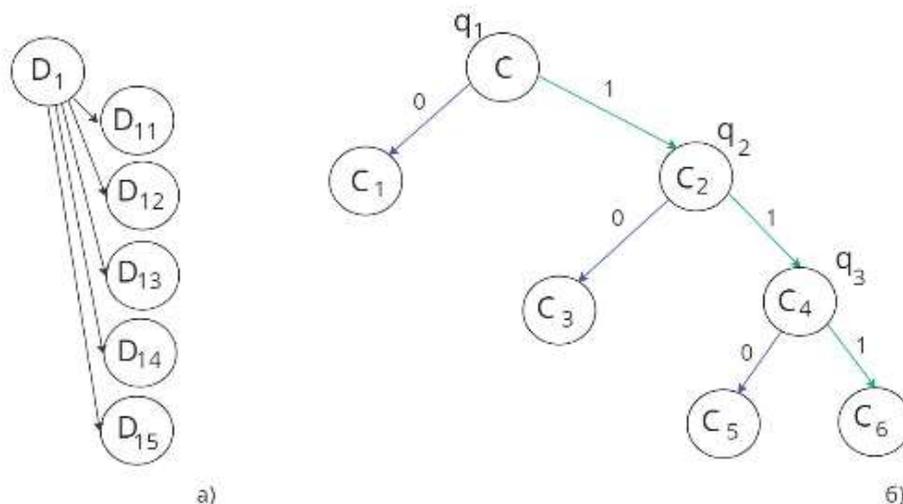


Рис. 4. Графы а) структуры цилиндропоршневой группы; б) алгоритма контроля узла

С помощью метода ветвей и границ, основанного на переборе – ветвлении, всех возможных решений, строится модель выгодной совокупности факторов с «наилучшем» верхним значением и оценкой нижней границы на каждой из вершин графа. Полагаем, что состояние (G) технического узла характеризуется совокупностью ИЭФ каждого из параметров масла, тогда:

$$G_i = [\text{ИЭФ}_1, \text{ИЭФ}_2 \dots \text{ИЭФ}_n], \quad (6)$$

Таким образом, каждая вершина графа обладает неким набором признаков, соответственно комплексной оценки ИЭФ. Определяя наиболее информативные для ЦПГ показатели моторного масла, возможно определить G_i и идентифицировать его на каждой вершине графа в состояниях C_n . При диагностике состояния узла при помощи алгоритмов и выстраивании цепочек взаимодействия между входящими в анализ элементами возникают так называемые неучтенные точки – ими могут служить параметры, не оказывающие прямого воздействия на исследуемый узел. Например, точка совпадения при переборе различных комбинаций ИЭФ в состоянии G_i (C_1). Обнаружение таких точек и определение того, находятся ли данные точки на самом длинном пути, дает возможность вычислить нижнюю границу самого длинного пути, т.е. остаточного ресурса безотказной работы узла.

Заключение

Применение современных систем диагностики элементов СЭУ, развитие и разработка новых алгоритмов, основанных на различных математических методах, является основой системности, а объединение исследований ведет к повышению срока эксплуатации технических элементов и снижению затрат на обслуживание. Потери, при выходе из строя механизмов могут быть сведены к минимуму благодаря разносторонней оценке работы диагностической системы. Предложенный комплекс математической обработки лабораторных анализов масла поможет в управлении скоростью процесса деградации элементов цилиндропоршневой группы судового двигателя, упрощая процесс технического обслуживания за счет создания на базе предложенных методов, компьютерной программы. Таким образом, представлена концепция выявления степени износа и вероятности отказа того или иного элемента ЦПГ судовой энергетической установки по средствам оценки результатов анализов масла и пропуска полученных данных через системы графов, разрабатываемые на основе метода ветвей и границ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Usman A., Park C. W. Optimizing the tribological performance of textured piston ring–liner contact for reduced frictional losses in SI engine: Warm operating conditions //Tribology International. – 2016. – Т. 99. – С. 224-236. doi: 10.1016/j.triboint.2016.03.030

2. Rao X. et al. Preparation and properties of graphene composite lubricants additive used for cylinder liner in marine diesel burning low sulfur fuel oil //Wear. – 2023. – С. 204994. doi: 10.1016/j.wear.2023.204994
3. Алисин В. В., Моделирование процесса трения в сопряжении цилиндрическая втулка-поршневое кольцо дизеля//Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2022. – №. 10-2. – С. 73-76.
4. Казаков С. С., Гоева В. В., Лазерное упрочнение поршневых колец дизелей как способ повышения износостойкости //Карельский научный журнал. – 2015. – №. 2(11). – С. 120-123.
5. Gu C., et al. Effects of surface texturing on ring/liner friction under starved lubrication //Tribology international. – 2016. – Т. 94. – С. 591-605, doi: 10.1016/j.triboint.2015.10.024
6. Liu J. S., Thompson G. The multi-factor design evaluation of antenna structures by parameter profile analysis //Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. – 1996. – Т. 210. – №. 5. – С. 449-456.
7. Фандеев В. П., Волков В. С., Баринов И. Н. Модели, методы и алгоритмы оптимизации диагностирования микромеханических датчиков //Пенза: ПГУ. – 2013.

PREDICTION OF THE STATE OF THE CYLINDER-PISTON GROUP OF A MARINE DIESEL ENGINE BY INDIRECT METHODS OF OIL DIAGNOSIS

¹Mazur Ekaterina Vladimirovna, assistant;

²Velikanov Nikolay Leonidovich, Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of the Department of Shipbuilding, Ship Repair and Marine Engineering

¹Immanuel Kant Baltic Federal University Russia,
Kaliningrad, A. Nevskogo ul.,14, e-mail: ekaterina.mazur@gmail.com;

²Kaliningrad State Technical University,
Kaliningrad, Russia, e-mail: ikolaj.velikanov@klgtu.ru

The failure of elements such as the piston ring and cylinder liner, operating under conditions of high temperature and heavy load, entails a decrease in the efficiency and service life of a marine engine. Timely diagnostics and forecast of the operational characteristics of diesel engine elements have a significant impact on the safety of the ship. In the presented work, an approach is proposed for assessing the technical condition of the cylinder-piston group of a ship power plant, based on the application of mathematical analysis methods to a data array formed on the basis of the results of measuring the parameters of the used engine oil. A mathematical approach is proposed based on determining the efficiency index of the physical and chemical parameters of used motor oil, followed by the prediction of the occurrence of malfunctions of the cylinder-piston group using the branch and bound method.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВАРИАНТОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЛОСКИХ СЕКЦИЙ КОРПУСА СУДНА С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ УСЛОВИЙ ТРУДА

Шевердяев Александр Сергеевич доцент кафедры судостроения,
судоремонта и морской техники

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

Приведены результаты работы по учету производственных элементов условий труда при анализе вариантов технологии сборки плоских секций на базе развернутых математических моделей продолжительности выполнения элементов технологических операций: технологических комплексов приемов (ТКП) и технологических приемов (ТП), а также энергозатрат исполнителей, производящейся посредством введения соответствующих коэффициентов тяжести труда по тому или иному элементу технологической операции сборки плоской секции. В качестве примера приведено рассмотрение 4 вариантов подачи сборочных единиц (листов), оборудования и оснастки к месту установки с первичным ориентированием. Приведенная схема анализа вариантов сборочного процесса с учетом производственных условий труда на основе введения соответствующих коэффициентов тяжести труда по продолжительности и энергозатратам исполнителей позволит более точно определить оптимальные варианты элементов технологического процесса сборки плоских корпусных конструкций.

В проведенных проработках по теме исследования было продолжено изучение влияния наиболее чувствительных показателей условий труда, в плане их психофизиологических элементов, на продолжительность выполнения технологических комплексов приемов при сборке судовых корпусных конструкций (СКК). К наиболее чувствительным психофизиологическим элементам – показателям условий труда, изменяющихся от состава технологических приемов, места и последовательности их проведения в сравниваемых технологических процессах сборки СКК были выделены следующие основные показатели:

1. Физическая динамическая нагрузка в энергозатратах (ккал) при общей нагрузке корпуса и ног, т.е. при перемещениях исполнителей;
2. Физическая динамическая нагрузка в энергозатратах при региональной нагрузке плечевого пояса при подъеме (спуске) грузов руками;
3. Рабочая пока и отсутствующее перемещение при выполнении элементов технологической операции;
4. Физическая динамическая нагрузка во внешней механической работе за время рассматриваемого отрезка времени, кгм;

Далее для совершенствования технологических операций и их элементов с учетом психофизиологических показателей рассматривались первые три вышеуказанных показателя, имеющие ранее проработанные количественные удельные значения (кДж/мин).

Сравнение технологических процессов сборки плоскостных корпусных конструкций-секций корпуса проводилось на базе построения развернутых математических моделей.

При систематизации вариантов выполнения развернутых математических моделей технологического процесса сборки секции используется та же классификация сборочных работ, что и для обобщенных математических моделей.

В составе технологического процесса рассматриваются три типовые сборочные операции: сборка базового полотнища, установка деталей и узлов набора, сборка замыкающего полотнища.

В качестве составных частей операции рассматриваются следующие технологические комплексы приемов:

1. Подача сборочных единиц, оборудования, оснастки к месту установки с первичным ориентированием – ТКП – 1;

2. Основная ориентация сборочных единиц, оборудования, оснастки с первоначальной фиксацией их положения – ТКП – 2;
3. Разметка и пригонка сопряжений – ТКП – 3;
4. Зачистка под сборку кромок и поверхностей сопряжения – ТКП – 4;
5. Стягивание сопрягаемых элементов – ТКП – 5;
6. Соединение (закрепление) сопряженных элементов – ТКП – 6;
7. Проверка качества сборки и доводочные работы – ТКП – 7;

В составе типовых комплексов приемов технологических операций сборки должны также учитываться пять типовых технологических приемов:

1. Получение информации об объекте работы и принятие решений (ТП 1);
2. Взятие и откладывается инструмента и приспособлений, подготовка оборудования (ТП 2);
3. Подготовка и захват (освобождение) для перемещений сборочных единиц, оборудования, оснастки и приспособлений (ТП 3);
4. Переходы рабочих и перемещение сборочных единиц (ТП 4);
5. Подготовка и выполнение сопряжений (ТП 5).

На основании выделенных выше типовых элементов технологических процессов сборки и на базе проверенных ранее наблюдений по продолжительности и энергозатратам при изготовлении секций корпусов судов на судостроительном предприятии были систематизированы варианты сборки секции корпусов судов.

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

Оценка производственных элементов труда проводилась в баллах по рекомендациям «Межотраслевая методическая рекомендация» НИИ труда [1]. Для отдельных элементов технологического процесса определялись интегральные показатели тяжести труда (ИТ) в баллах с учетом рекомендованного 10-кратного увеличения.

На основе интегральных показателей тяжести труда были определены отдельные коэффициенты тяжести труда j -ом рабочем месте. Необходимо отметить, что нормативы времени на выполнение технологических комплексов приемов по физическим нагрузкам соответствуют 3 категории тяжести труда и устанавливаются, в основном от удельных энергозатрат работающих, которые не превышают значения: при общей нагрузке корпуса ног не более 23 кДж/мин; при региональной нагрузке плечевого пояса не более 12,5 кДж/мин.

Для технологических комплексов приемов сборочных работ на основе рассмотрения физических динамических нагрузках были определены в первом приближении, максимальные тяжести труда K_T , для III категории тяжести – 0,094; для IV категории тяжести – 0,111; для V категории тяжести – 0,122; для VI категории тяжести – 0,125.

Следует уточнить K_T для третьей категории тяжести при судовой сборке и принять его равным среднему граничному значению III и IV категории тяжести $K_{T3} = 0,103$. При оценке продолжительности элементов корпусной сборочной операций сравнимых вариантов сборки следует допустить, что учет тяжести выполнения технологического элемента операции при определении оценки его продолжительности (t_i) можно учесть соответствующим коэффициентом – $K_{ТП}$.

В соответствии с принципами медико-физиологической классификации и методики количественной оценки тяжести труда по условиям его выполнения на примере предприятия Волжский автозавод была разработана система дифференцированных доплат в зависимости от фактических условий труда и тяжести работ на рабочих местах. Размеры доплат за работу можно условно сопоставить с увеличением трудоемкости выполнения вариантов корпусосборочных работ при сборке секций корпусов судов.

При сравнении вариантов работ сравниваются показатели продолжительности выполнения элементов операций как основных показателей трудоемкости работ. Размер доплаты за работу с учетом категории тяжести труда и соответственно увеличено продолжительности выполнения элемента технологической операции для сравнительной оценки можно принять K_T в виде коэффициентов тяжести труда, влияющих на продолжительность, $K_{ТП}$ с максимальными значениями: для I и II не устанавливаются; для III категории $K_{ТП3} = 1,08$; для IV категории $K_{ТП4} = 1,16$; для V категории $K_{ТП5} = 1,20$; для VI категории $K_{ТП6} = 1,24$.

Для оценки продолжительности выполнения корпусосборочных работ при сборке плоскостных секций были разработаны развёрнутые математические модели для сборки полотнищ и установки набора.

В качестве основных частей операций сборки на начальном этапе были выделены следующие технологические комплексы приемов (ТКП):

1. Подача сборочных единиц, оборудования, оснастки к месту установки с первичным ориентированием (ТКП-1);

2. Основная ориентация сборочных единиц, оборудования, оснастки с первоначальной фиксацией их положения (ТКП-2);

В этих типовых технологических комплексах приемов (ТКП) для сборки полотнищ секций и условиям их применения были выделены следующие возможные варианты типовых ТКП, так для ТКП-1 следующие варианты:

1. ТКП - 1. Захват листов струбциной из горизонтального положения (вариант 1).

Захват листов струбциной из вертикального положения (вариант 2).

Захват листов из горизонтального положения быстрозахватными устройствами (вариант 3).

Захват листов из горизонтального положения траверсой листоукладчика или другого оборудования (вариант 4).

Захват листов из горизонтального и вертикального положений (вариант 1и 2) может производиться обычной и быстродействующей струбциной. В варианте 3 захват производится самозахватывающими устройствами типа кляммеров.

Построение развернутых математических моделей технологических приемов работ, входящих в ТКП-1 сборки полотнищ с учетом тяжести работ для четырех вариантов приводится ниже.

В качестве примера представлена развернутая математическая модель работ, входящих в технологический комплекс приемов (ТКП-1) сборки полотнищ: подача листов полотнищ секций на сборочно-сварочную оснастку.

Наблюдения за продолжительностью актов, входящих в ТКП-1 при подаче листов полотнищ секций на сборочно-сварочную оснастку с помощью крана, показатели, которые следует учесть следующие особенности: значительное по продолжительности и ответственное по сути принятие решений рабочими главным образом связано с нахождением маркировки и надписей, сделанных для правильной ориентации листа в составе полотнища и с оценкой положения поданного листа на весу на месте укладки; при захвате для транспортировки листа струбциной ее винт вращается рукой и ломиком; для свободного надевания струбцины или другого механического грузозахватного устройства на горизонтально лежащий лист, необходимо приподнять его кромку и установить подкладку, также иметь провисание троса; перемещения моста и тележки крана, а также переходы рабочих определяются расположением пачки листов относительно места сборки, геометрическими характеристиками сборочно-сварочной оснастки, очередностью установки листов на оснастку, местом расположения их в составе полотнища.

При моделировании рассматриваемых приемов по энерготратам рабочих были учтены следующие условия выполнения работ: закручивание и откручивание винта струбцины ломиком и подготовка листа к захвату производятся рабочим в положении нагнувшись, а во время нахождения маркировки листа и работы со струбциной рукой рабочий находится на корточках. При захвате листов из вертикального положения, нахождения на них маркировки и надписей работы выполняются рабочим в положении нагнувшись, все остальные работы - в положении стоя. Ориентация листа на весу производится рабочим только в положении стоя. По роду (тяжести) работы следует отметить: подготовка листа к захвату, закручивание и откручивание винта струбцины ломиком - тяжелая работа рукой; закручивание и откручивание винта струбцины рукой - тяжелая работа кистью; разворот листа при его ориентации на весу - легкая работа рукой.

Математическое моделирование технологических приемов, входящих в ТКП-1 сборки полотнищ по продолжительности, $t_{ТКП1}^{II}$ и по энерготратам исполнителей $E_{ТКП1}^{II}$ проводилось с учетом составляющих:

$$t_{ТКП1S}^{II} = t_{P1S}^{II} + t_{H1S}^{II} + t_{31S}^{II} + t_{H1S}^{II},$$

$$E_{КП1S}^{II} = e_{P1S}^{II} + e_{H1S}^{II} + e_{31S}^{II} + e_{H1S}^{II},$$

где II - индекс принадлежности ТКП и составляющих его актов к операции сборки полотнища;

S - индекс, обозначающий номер варианта проведения ТКП и составляющих его актов;

t_p, t_{II}, t_3, t_{II} - соответственно время на осмотр и принятие решений (t_p), на подготовку, откладывание и смену инструмента и приспособлений (t_{II}), закрепление (установку) и снятие грузозахватных устройств (t_3), переходы рабочих и перемещение сборочных элементов (деталей, узлов и т.п.), оборудования и оснастки (t_{II}), мин;

e_p, e_{II}, e_3, e_{II} - соответственно энерготраты исполнителей на осмотр и принятие решений (e_p), на подготовку, откладывание и смену инструмента и приспособлений (e_{II}), закрепление (установку) и снятие грузозахватных устройств (e_3), переходы рабочих и перемещение сборочных элементов (деталей, узлов и т.п.), оборудования и оснастки (e_{II}), кДж;

При типовом ТКП-1 рассматривается 4 варианта работ по продолжительности и энерготратам исполнителей.

Для 1 варианта ТКП-1 формулы развернутой математической модели записываются в полном объеме, в следующих вариантах, для упрощения записи, вводятся обозначения повторяющихся выражений формул с указанием принадлежности их к определенному варианту (номер индекса совпадает с номером варианта).

1) Вариант 1. Захват листов с помощью струбцины из горизонтального положения.

$$t_{ТКП11}^{\Pi} = t_{P_{нач11}} + n \cdot (t_{OC11} + t_{OЦ11}) + t_{P_{кон11}} + n \cdot K_{ТП4} \cdot (t_{3P11} + t_{3Л11} + t_{OP11} + 2 \cdot t_{B3}) + \sum_1^n t_{подi11} +$$

$$+ \frac{\sum_1^n S_{x_i} + \Delta_{x_i}}{v_x} + \frac{\sum_1^n S_{y_i} + \Delta_{y_i}}{v_y} + \frac{\sum_1^n 2 \cdot (h_{ПР} + e_{Л_i} + h_{3АП} + h_{Л} + \Delta_i)}{v_{нод}} + \frac{\sum_1^n l_{Л_i} \cdot \sin \frac{\alpha_i}{2}}{v_{cp}} +$$

$$+ \frac{2 \cdot n \cdot S_n}{v_{np}} + n \cdot \left(\frac{l_{mp}}{v_{mp}} + \frac{l_{cp}}{v_{cn}} \right), \text{ мин};$$

$$t_{P11}^{\Pi} = t_{P_{нач11}} + n \cdot (t_{OC11} + t_{OЦ11}) + t_{P_{кон11}}, \text{ мин};$$

$$t_{II11}^{\Pi} + t_{311}^{\Pi} = n \cdot (t_{3P11} + t_{3Л11} + t_{OP11} + 2 \cdot t_{B3}), \text{ мин};$$

$$t_{П11}^{\Pi} = \sum_1^n t_{нод} + \frac{\sum_1^n S_{x_i} + \Delta_{x_i}}{v_x} + \frac{\sum_1^n S_{y_i} + \Delta_{y_i}}{v_y} + \frac{\sum_1^n l_{Л_i} \cdot \sin \frac{\alpha_i}{2}}{v_{cp}} + \frac{2 \cdot n \cdot S_n}{v_{np}} + n \cdot \left(\frac{l_{mp}}{v_{mp}} + \frac{l_{cp}}{v_{cn}} \right) \text{ мин.}$$

В укрупненном виде значение $t_{ТКП11}^{\Pi}$ примет вид:

$$t_{ТКП11}^{\Pi} = t_{P11}^{\Pi} + t_{II11}^{\Pi} + t_{311}^{\Pi} + t_{П11}^{\Pi} + \frac{\sum_1^n 2 \cdot (h_{ПР} + e_{Л_i} + h_{3АП} + h_{Л} + \Delta_i)}{v_{нод}}, \text{ мин},$$

где t_{P11}^{Π} - время типового акта 1 первого варианта сборки полотна, мин;

$t_{II11}^{\Pi} + t_{311}^{\Pi}$ - соответственно время типовых приемов 2 и 3 в ТКП-1 первого варианта сборки полотна, мин;

$t_{П11}^{\Pi}$ - часть времени типового приема 4, состав которого повторяется в вариантах ТКП-1 сборки полотна, мин;

$t_{P_{нач11}}, t_{P_{кон11}}$ - соответственно время на осмотр и принятие решений в начале и конце проведения первого приема, мин;

n - количество листов в полотнище;

$t_{OC_{11}}, t_{OЦ_{11}}$ - соответственно время нахождения маркировки детали и время оценки положения относительно предполагаемого места укладки, мин.

$t_{3P_{11}}, t_{3Л_{11}}, t_{OL_{11}}, t_{OP_{11}}$ - соответственно время завинчивания рукой ($t_{3P_{11}}$) и ломиком ($t_{3Л_{11}}$) отвинчивания рукой ($t_{OL_{11}}$) и ломиком ($t_{OP_{11}}$) во 2-ом и 3-ем приемах проведения работ, мин;

t_{B3} - время взятия и откладывания лома, мин;

$t_{нод_{i11}}$ - время подготовки i -ого листа к захвату в 4-ом приеме проведения работ, мин;

S_{x_i}, S_{y_i} - соответственно расстояния перемещения i -ого листа краном и его тележкой по оси x (S_{x_i}) и оси y (S_{y_i}), м;

$\Delta_{x_i}, \Delta_{y_i}$ - соответственно величины корректировок i -ого листа на весу относительно оси x (Δ_{x_i}) и оси y (Δ_{y_i}), м;

$h_{ПР}, h_{3АП}, h_{Л}$ - соответственно высота провисания троса ($h_{ПР}$), дополнительный запас высоты над оснасткой ($h_{3АП}$), высота оснастки ($h_{Л}$), м;

Δ_i - высота пачки листов в момент подъема i -ого очередного листа, м;

$v_{нод} = v_{он}$ - скорость подъема и опускания листа, м/мин;

$b_{Л_i}, l_{Л_i}$ - соответственно ширина ($b_{Л_i}$) и длина ($l_{Л_i}$) i -ого листа, м;

v_{cp} - средняя скорость разворота детали на весу, м/мин;

α - угол отклонения продольной линии листа от линии укладки, град;

S_n - путь рабочего от пачки (контейнера) листов до места укладки, м;

v_{np} - скорость перемещения рабочего, м/мин;

l_{mp} - длина трапа, м;

v_{mp}, v_{cn} - соответственно скорость подъема (v_{mp}) и спуска (v_{cn}) рабочего по трапу без груза, м/мин.

Соответственно энерготраты исполнителей представляются в виде:

$$E_{ТКП_{11}}^{\Pi} = 3,3 \cdot 10^3 \cdot t_{P_{Нач_{11}}} + n \cdot (3,4 \cdot 10^3 \cdot t_{OC_{11}} + 3,3 \cdot 10^3 \cdot t_{OЦ_{11}}) + 3,3 \cdot 10^3 \cdot t_{P_{КОН_{11}}} + n \cdot [20,2 \cdot 10^3 \cdot (t_{3Л} + t_{OL}) + 7,9 \cdot 10^3 \cdot (t_{3P} + t_{OP}) + 20,6 \cdot 10^3 \cdot t_{B3}] + 20,2 \cdot 10^3 \cdot \sum_1^n t_{нод_{i11}} + \frac{9,8 \cdot 10^3 \cdot \sum_1^n l_{Л_i} \cdot \sin \frac{\alpha_i}{2}}{v_{cp}} + \frac{14,4 \cdot 10^3 \cdot n \cdot S_n}{v_{np}} + n \cdot \left(\frac{27,7 \cdot 10^3 \cdot l_{mp}}{v_{mp}} + \frac{15,6 \cdot 10^3 \cdot l_{mp}}{v_{cn}} \right), \text{ Дж,}$$

$$e_{P_{11}}^{\Pi} = 3,3 \cdot 10^3 \cdot t_{P_{Нач_{11}}} + n \cdot (3,4 \cdot 10^3 \cdot t_{OC_{11}} + 3,3 \cdot 10^3 \cdot t_{OЦ_{11}}) + 3,3 \cdot 10^3 \cdot t_{P_{КОН_{11}}}, \text{ Дж,}$$

$$e_{И_{11}}^{\Pi} + e_{3_{11}}^{\Pi} = n \cdot [20,2 \cdot 10^3 \cdot (t_{3Л} + t_{OL}) + 7,9 \cdot 10^3 \cdot (t_{3P_{11}} + t_{OP_{11}}) + 20,6 \cdot 10^3 \cdot t_{B3_{11}}], \text{ Дж,}$$

Значение $E_{ТКП_{11}}^{\Pi}$ по (укрупненному) составу энерготрат исполнителей примет вид:

$$E_{ТКП_{11}}^{\Pi} = e_{P_{11}}^{\Pi} + e_{И_{11}}^{\Pi} + e_{3_{11}}^{\Pi} + e_{П_{11}}^{\Pi} + 20,2 \cdot 10^3 \cdot \sum_1^n t_{нод_{i11}},$$

где $e_{P_{11}}^{\Pi}$ - энерготраты (расход энергии) исполнителей при выполнении 1-ого типового приема ТКП-1в первом варианте сборки полотнища, Дж;

$e_{И_{11}}^{\Pi} + e_{3_{11}}^{\Pi}$ - соответственно энерготраты исполнителей при выполнении 2-ого и 3-его приема в ТКП-1первого варианта сборки полотнища, Дж;

$e_{П_{11}}^{\Pi}$ - энерготраты исполнителей при выполнении 4-ого приема ТКП-1первого варианта сборки полотнища, Дж.

2) Вариант 2

Второй вариант ТКП-1 отличается от первого варианта захватом листа из вертикального положения.

$$t_{\text{ТКП}12}^{\text{П}} = t_{\text{P}12}^{\text{П}} + K_{\text{ТПЗ}} \cdot (t_{\text{И}12}^{\text{П}} + t_{\text{З}12}^{\text{П}}) + t_{\text{П}12}^{\text{П}} + \frac{n \cdot (h_{\text{Л}} + h_{\text{зап}} + h_{\text{ВЛ}})}{v_{\text{под}}}, \text{ мин}$$

где $t_{\text{P}12}^{\text{П}}(t_{\text{P}11}^{\text{П}})$, $t_{\text{И}12}^{\text{П}}(t_{\text{И}11}^{\text{П}})$, $t_{\text{З}12}^{\text{П}}(t_{\text{З}11}^{\text{П}})$, $t_{\text{П}12}^{\text{П}}(t_{\text{П}11}^{\text{П}})$ - соответственно время типовых приемов для второго варианта проведения работ по составу и содержанию совпадающие с аналогичными приемами первого варианта.

Соответственно энерготраты представляются в виде:

$$E_{\text{ТКП}12}^{\text{П}} = (e_{\text{P}12}^{\text{П}} - 0,1 \cdot 10^3 \cdot t_{\text{OC}12}) + [e_{\text{И}12}^{\text{П}} + e_{\text{З}12}^{\text{П}} - n \cdot 0,5 \cdot 10^3 \cdot (t_{\text{ЗЛ}12} + t_{\text{ОЛ}12} + t_{\text{ЗP}12} + t_{\text{OP}12})] + (e_{\text{П}12}^{\text{П}} + 13,3 \cdot 10^3 \cdot \sum_1^n t_{\text{нод}12}), \text{ кДж},$$

где $e_{\text{P}12}^{\text{П}}(e_{\text{P}11}^{\text{П}})$, $e_{\text{И}12}^{\text{П}}(e_{\text{И}11}^{\text{П}})$, $e_{\text{З}12}^{\text{П}}(e_{\text{З}11}^{\text{П}})$, $e_{\text{П}12}^{\text{П}}(e_{\text{П}11}^{\text{П}})$ - соответственно энерготраты (расход энергии) исполнителей при выполнении 1, 2, 3 и 4 приемов работы в ТКП-1 второго варианта сборки полотноща, совпадающие по составу и содержанию с приемами первого варианта, Дж;

$0,1 \cdot 10^3 \cdot t_{\text{OC}12}$ - уменьшение энерготрат исполнителя при нахождении маркировки детали во втором варианте, кДж;

$0,5 \cdot 10^3 \cdot (t_{\text{ЗЛ}12} + t_{\text{ОЛ}12} + t_{\text{ЗP}12} + t_{\text{OP}12})$ - уменьшение энерготрат исполнителей при закреплении и откреплении грузозахватного приспособления ломиком ($t_{\text{ЗЛ}12}$, $t_{\text{ОЛ}12}$) и рукой ($t_{\text{ЗP}12}$, $t_{\text{OP}12}$) во втором варианте, кДж.

3) Вариант 3

В третьем варианте производится захват листов из горизонтального положения быстрозахватными устройствами, при этом увеличивается скорость выполнения приемов работ $t_{\text{И}} + t_{\text{З}}$. Для третьего варианта также имеет место совпадение частей математических выражений с 1 и 2 вариантами.

$$t_{\text{ТКП}13}^{\text{П}} = t_{\text{P}13}^{\text{П}} + 8 \cdot K_{\text{ТПЗ}} \cdot n \cdot t_{\text{над}13}^{\text{П}} + t_{\text{П}13}^{\text{П}} + \sum_1^n 7 \cdot t_{\text{под}13}^{\text{П}} + \frac{\sum_1^n 2 \cdot (h_{\text{Л}i} + l_{\text{Л}i})}{v_0} + \frac{\sum_1^n 2 \cdot (h_{\text{ПР}} + h_{\text{ЗАП}} + h_{\text{Л}} - \Delta_i)}{v_{\text{под}}}, \text{ мин}$$

где $t_{\text{P}13}^{\text{П}}(t_{\text{P}11}^{\text{П}})$, $t_{\text{П}13}^{\text{П}}(t_{\text{П}11}^{\text{П}})$, $K_{\text{ТПЗ}} \cdot 8 \cdot n \cdot t_{\text{над}13}^{\text{П}}$, $(t_{\text{И}}^{\text{П}} + t_{\text{З}}^{\text{П}})$, $\sum_1^n t_{\text{нод}13}$, $\left(\sum_1^n t_{\text{нод}11} \right)$ - соответственно время типовых приемов третьего варианта совпадающие по составу и содержанию с приемами первого варианта, мин;

$t_{\text{над}13}^{\text{П}}$ - время надевания и снятия быстрозахватного устройства, мин;

Соответственно энерготраты исполнителей представляются в виде:

$$E_{\text{ТКП}13}^{\text{П}} = e_{\text{P}13}^{\text{П}} + 82,4 \cdot 10^3 \cdot t_{\text{над}13}^{\text{П}} + (e_{\text{П}13}^{\text{П}} + 20,2 \cdot 10^3 \cdot \sum_1^n 8 \cdot t_{\text{нод}13}), \text{ кДж}$$

где $e_{\text{P}13}^{\text{П}}(e_{\text{P}11}^{\text{П}})$, $82,4 \cdot 10^3 \cdot t_{\text{над}13}^{\text{П}} \cdot (t_{\text{И}}^{\text{П}} + t_{\text{З}}^{\text{П}})$, $e_{\text{П}13}^{\text{П}}(e_{\text{П}11}^{\text{П}})$ - энерготраты исполнителей при выполнении приемов в ТКП-1 третьего варианта работ совпадающие по составу и содержанию с приемами первого варианта.

4) Вариант 4

В четвертом варианте захват листов из горизонтального положения осуществляется траверсой механизированного устройства.

При захвате листов из горизонтального положения траверсой резко сокращаются продолжительности приемов в ТКП-1 при этом математическая запись этих приемов представлена без укрупнения, так как сильно отличается от первого варианта.

$$t_{\text{ТКП}14}^{\text{П}} = t_{\text{P}14}^{\text{П}} + n \cdot (t_{\text{P}014} + t_{\text{OC}14}) + t_{\text{P}14}^{\text{П}} + K_{\text{ТПЗ}} \cdot n \cdot t_{\text{ЗЛ}14} + \frac{\sum_1^n S_{x_{i14}} + \Delta_{x_{i14}}}{v_{x_{14}}} + \frac{\sum_1^n S_{y_{i14}} + \Delta_{y_{i14}}}{v_{y_{14}}} +$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{\sum_{i=1}^n 2 \cdot (h_{3АП} + h_{Л} - \Delta_i)}{v_{нод_{4}}} + n \cdot t_{нод_{4}}, \text{ мин}; \\
t_{P_{14}}^{\Pi} & = t_{P_{нач14}} + n \cdot (t_{P_{01}} + t_{ОЦ_{14}}) + t_{P_{кон_{14}}}, \text{ мин}; \\
t_{m_{14}}^{\Pi} & = \frac{\sum_{i=1}^n S_{x_{i14}} + \Delta x_{i14}}{v_{x_{14}}} + \frac{\sum_{i=1}^n S_{y_{i14}} + \Delta y_{i14}}{v_{y_{14}}} + \frac{\sum_{i=1}^n 2 \cdot (h_{3АП} + h_{Л} - \Delta_i)}{v_{нод_{4}}} + n \cdot t_{Пор_{14}}, \text{ мин},
\end{aligned}$$

$t_{P_{014}}$ - время принятие решения рабочим-оператором, мин;

$t_{Пор_{14}}$ - время поворота траверсы, мин;

В укрупненном виде продолжительность ТКП-1в четвертом варианте можно представить

$$t_{ТКП14}^{\Pi} = t_{P_{14}}^{\Pi} + n \cdot t_{3П_{14}}^{\Pi} + t_{П_{14}}^{\Pi}, \text{ мин};$$

Соответственно энерготраты исполнителей представляются в виде:

$$E_{ТКП14}^{\Pi} = 3,3 \cdot 10^3 \cdot t_{P_{14}}^{\Pi} + 5,3 \cdot 10^3 \cdot n \cdot t_{3П_{13}}^{\Pi} + 5,3 \cdot 10^3 \cdot t_{П_{14}}^{\Pi}, \text{ Дж},$$

$$e_{И_{14}}^{\Pi} + e_{3_{14}}^{\Pi} = 5,3 \cdot 10^3 \cdot n \cdot t_{3П_{13}}^{\Pi}, \text{ Дж},$$

или

$$E_{ТКП14}^{\Pi} = e_{P_{14}}^{\Pi} + (e_{И_{14}}^{\Pi} + e_{3_{14}}^{\Pi}) + e_{П_{14}}^{\Pi}, \text{ Дж},$$

где $e_{P_{14}}^{\Pi}$, $(e_{И_{14}}^{\Pi} + e_{3_{14}}^{\Pi})$, $e_{П_{14}}^{\Pi}$ - энерготраты исполнителей при выполнении приемов в ТКП-1 четвертого варианта работ.

Анализ четырех вариантов подачи листов на место сборки показал, что варианты 1, 3 и 4 менее затратны по тяжести труда при закреплении листов на месте предварительного их хранения.

Выводы:

1. Введение в расчеты дополнительных коэффициентов тяжести труда в продолжительности технологических элементов сборочных работ позволит более точно оценить время их проведения.

2. Учет производственных элементов условий труда при анализах вариантов технологических процессов позволит выделить оптимальный сборочный процесс, оценить физическую динамическую нагрузку в отдельных элементах сборочных элементов процесса, разработать предложения по организационно-технологическим схемам сборки.

3. На базе исходных данных математических моделей с учетом тяжести труда разработать алгоритм решения этих моделей для выявления заданного процесса сборки с наименьшей продолжительностью и энергетической стоимостью работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Количественная оценка тяжести труда (Межотраслевые методические рекомендации и труда) -: Экономика, 1988, с.120.
2. Иванов А.П. К вопросу повышения производительности труда судосборщиков на секционной сборке/ А.П. Иванов// Вопросы судостроения. Сер. Технология судостроения. Вып. 24. –Л.: Судостроение, 1978.
3. Иванов А.П., Кожевников В.А., Шевердяев А.С. Результаты исследований технологических операций формирования корпусов судов// Известие КГТУ, №37 Калининград ФГБОУ ВО «КГТУ», 2015, с.211-220.
4. Иванов А.П., Жаровин Д.А., Шевердяев А.С. Разработка технических предложений по повышению производительности труда при изготовлении секций корпусов судов. Отчет о НИР ФГБОУ ВПО «КГТУ» шифр 41.01.1рег№01201172256 (ФГНУ ЦИТиС) Калининград, 2011, с.81
5. Оценка влияния производственных элементов условий труда на выбор технологии изготовления секций корпусов судов. Сборник IX Международной научной конференций «Морская техника и технология. Безопасность морской индустрии» г. Калининград. Издательство БГАРФ, 2021, с. 136-142.

MODELING OPTIONS FOR MANUFACTURING FLAT SECTIONS OF A SHIP HULL TAKEN INTO ACCOUNT OF THE INFLUENCE OF PRODUCTION ELEMENTS OF WORKING CONDITIONS

Sheverdyayev Alexander Sergeevich, Associate Professor of the Department of Shipbuilding, Ship Repair and Marine Engineering

Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia, e-mail: sheverd49@gmail.com

The article presents the results of work on taking into account production elements of working conditions when analyzing technology options for assembling flat sections on the basis of detailed mathematical models of the duration of execution of elements of technological operations: technological complexes of techniques (TCP) and technological techniques (TP), as well as the energy consumption of performers produced by introducing the corresponding coefficients of labor severity for one or another element of the technological operation of assembling a flat section. As an example, we consider 4 options for supplying assembly units (sheets), equipment and accessories to the installation site with primary orientation. The presented scheme for analyzing options for the assembly process, taking into account production working conditions, based on the introduction of appropriate coefficients of labor severity in terms of duration and energy consumption of performers, will make it possible to more accurately determine the optimal options for elements of the technological process of assembling flat hull structures.

СЕКЦИЯ «ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ОБЪЕКТОВ МОРСКОЙ ИНДУСТРИИ»

SECTION "ELECTRICAL SYSTEMS OF MARINE INDUSTRY FACILITIES"

УДК 621.3

ЗАЩИТА ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРОВ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКЕ

¹Бабасюк Игорь Владимирович, курсант;

²Бочарников Александр Сергеевич, магистрант;

³Попов Михаил Александрович, студент;

⁴Чижма Сергей Николаевич, д-р техн. наук, доцент, профессор образовательно-научного кластера «Институт высоких технологий» БФУ им. И. Канта

¹Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ», Калининград, Россия, e-mail: babasuk@yandex.ru.ru

^{2,3,4}Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия, e-mail: ²ABocharnikov@stud.kantiana.ru; ³MPopov@stud.kantiana.ru; ⁴SChizhma@kantiana.ru

Несимметричный режим для источников бесперебойного питания на основе дизель-генераторов может привести к повышенной вибрации генератора при значительной величине несимметрии. Целью работы является анализ систем защиты от несимметрии и на основе анализа построение системы защиты от несимметрии на основе контроля фазных токов и подключения балластной нагрузки к недогруженным фазам. Такое техническое решение позволяет уменьшить несимметрию фазных токов и уровень тока в нулевом проводе трехфазной линии, а применение такого переключения позволяет уменьшить ток в нулевом проводе.

Сегодня все больше предприятий и организаций инфраструктуры зависят от качества электроэнергии, которая является одним из важнейших элементов электроснабжения технологических процессов. Отказ оборудования может привести к серьезным финансовым потерям и даже к аварийным ситуациям. Поэтому обеспечение надежного и бесперебойного питания является одной из важнейших задач для любой компании.

Несимметрия напряжений – состояние системы энергоснабжения трехфазного переменного тока, в которой среднеквадратические значения основных составляющих междуфазных напряжений или углы сдвига фаз между основными составляющими междуфазных напряжений не равны между собой. Однофазные нагрузки трехфазных систем в силу своей специфики вызывают несимметрию, поэтому вопрос анализа несимметричных режимов и управление параметрами регулирующих устройств в таких электроэнергетических системах стоит особенно остро. Степень несимметрии обычно выражают отношением напряжений обратной и нулевой последовательностей к напряжению прямой последовательности [1]:

$$k_2 = \frac{U_2}{U_1} \cdot 100; \quad k_0 = \frac{U_0}{U_1} \cdot 100. \quad (1)$$

где K_{2U} – коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности;

K_{0U} – коэффициент несимметрии напряжения по нулевой последовательности;

$U_{1(1)}$ – действующее значение напряжения прямой последовательности основной частоты;

$U_{2(1)}$ – действующее значение напряжения обратной последовательности основной частоты;

$U_{0(1)}$ – действующее значение напряжения нулевой последовательности основной частоты.

Для определения величины несимметрии стандарт [2, 3] прямо рекомендует использование метода симметричных составляющих [4]. Измерения основной составляющей входного сигнала проводят на основном интервале времени измерений 0,2с (10 периодов для систем электроснабжения частотой 50 Гц).

Несимметрия возникает в силу ряда причин [5, 6]:

- большое содержание в нагрузке однофазных потребителей, режим потребления которых приводит к несимметрии токов в фазах;
- схемная несимметрия, т.е. нарушение симметрии самой схемы передачи энергии, например, при ремонте фазы группы, работа через неполнофазную группу трансформаторов, обрыв провода линии, обрыв фазы трансформатора, невключение фазы выключателя и др.;
- несимметричные короткие замыкания.

В соответствии с нормами качества электрической энергии [1, 7] в системах электроснабжения общего назначения, значения коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} и несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U} в точке передачи электрической энергии, усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать 4% в течение 100% времени интервала в одну неделю. Однако при возникновении аварийного режима и питании нагрузки от источника бесперебойного питания, несимметрия может быть значительно выше [8, 9, 10].

В случае прекращения подачи электроэнергии потребителям используют источники бесперебойного электропитания (ИБП) – устройства, обеспечивающие непрерывное питание подключенного оборудования в условиях отключения основного источника энергии. ИБП также предохраняет оборудование от перепадов напряжения, что важно в регионах с нестабильным энергоснабжением.

В основном ИБП используют для защиты оборудования от проблем, снижающих качество электропитания. Кроме компьютеров, ИБП обеспечивают питанием и другую электрическую нагрузку, критичную к наличию питания с нормальными параметрами электропитающей сети, например, схемы управления отопительными котлами. Сложные и дорогие ИБП способны корректировать параметры (напряжение, частоту) выходной сети. Может совмещаться с различными видами генераторов электроэнергии (например, дизель-генераторы).

В энергетике при аварии в первичных цепях, по которым передается электрическая энергия, для сохранения возможности переключений и защиты оборудования от повреждений необходимо наличие напряжения на вторичных цепях. В энергетике оборудование, обеспечивающее питанием вторичные цепи, называется источниками оперативного тока.

ИБП бывают двух типов [11]:

- роторные. ИБП имеет двигатель, подключенный к основному источнику питания, который используется для включения генератора переменного тока, генерирующего выходное напряжение переменного тока для питания выбранных нагрузок вместе с батарейным блоком;
- электронные, или статические. ИБП использует инверторы для генерации синусоидальной волны переменного тока. Работа поддерживается батарейным блоком для достижения желаемого времени работы. В этой категории находятся ИБП различных типов: резервного, линейно-интерактивного и двойного преобразования.

По мощности модели ИБП разделяются на:

– ИБП малой мощности (до 3 кВА) – однофазные устройства, предназначенные для эксплуатации преимущественно в бытовых условиях и рассчитанные на подключение персональных компьютеров, холодильников, кондиционеров и прочей техники домашнего обихода, а также отопительных котлов, водяных насосов, приводов автоматических ворот и т.д. Могут применяться и в офисе или на производственном объекте для электропитания, например, IT-оборудования небольшой локальной сети.

– ИБП средней мощности (до 20 кВА) – однофазные и трехфазные приборы, применяемые вместе с телекоммуникационным, медицинским и технологическим оборудованием. В бытовом секторе такие модели обеспечат централизованную защиту всей электросети в квартире или частном доме, в офисе – компьютерного зала или серверной (рис. 1).

– ИБП большой мощности (от 20 кВА и выше – вплоть до 300 - 500 кВА) – трехфазные изделия, исключительно промышленного применения. Они решают задачи по обеспечению автономной работы центров обработки данных, производственных линий, промышленных зданий и объектов.

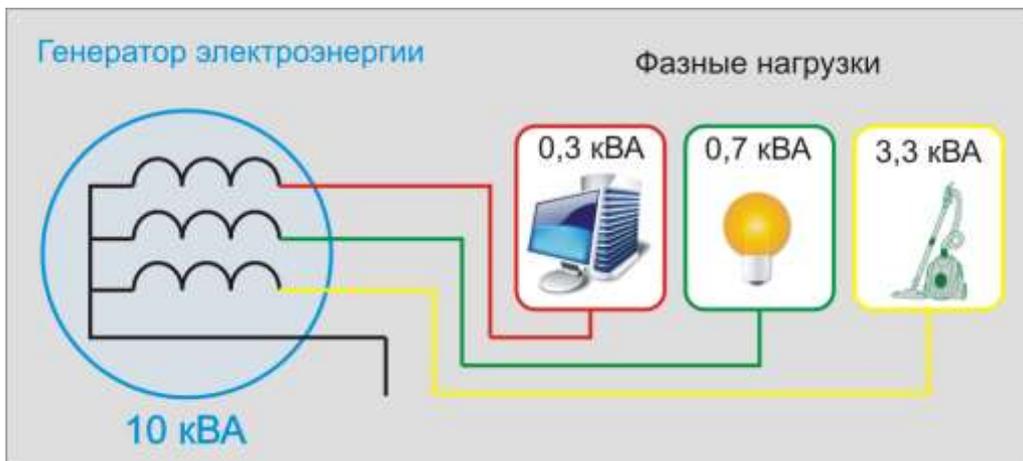


Рис. 1. Однофазные нагрузки в трехфазной системе электроснабжения

Электронные ИБП как правило, имеют относительно небольшую мощность. В качестве источника энергии используются аккумуляторы, которые достаточно быстро разряжаются, поэтому будем рассматривать ИБП роторного типа.

Несимметрия может случаться при электропитании потребителей от трехфазной сети. Такие случаи бывают при неравномерной нагрузке одной из трех фаз сети. При возникновении таких ситуаций происходит значительная вибрация ротора генератора, что может вывести его из строя или сократить срок эксплуатации.

Рациональное перераспределение нагрузок не всегда позволяет снизить коэффициент несимметрии напряжений до допустимого значения (например, когда часть мощных однофазных электроприемников работает по условиям технологии не все время, а также при профилактических и капитальных ремонтах). В этих случаях необходимо применять специальные симметрирующие устройства.

Существуют три типа устройств, решающих аналогичные задачи:

1. Симметрирующие трансформаторы. Цены начинаются от 100 тыс. руб. за аналогичную мощность. Недостатки: не справляются с требованиями при значительных величинах несимметрии (более 30%). При этом вносят дополнительную несимметрию по напряжению.



Рис. 2. Внешний вид симметрирующего трансформатора

2. Статкомы. Решают практически все задачи по повышению качества электроэнергии, но очень дороги. Линейка статкомов начинается от 1МВа, цена – от 22млн. руб.



Рис. 3. Внешний вид статкома

3. Симметрирование с подключением дополнительной нагрузки. Низкая цена, недостаток – низкий КПД. Предлагаемое решение относится к этому классу. С указанным недостатком приходится мириться, т.к. главная цель – непрерывность электропитания установок.

Если потребитель использует трёхфазную систему, то такая ситуация не исключает неравномерное распределение нагрузки на выходе трехфазного ИБП. Так, если одна фаза трехфазного ИБП нагружена на 95%, а две другие – на 40% и на 50%, и есть необходимость подключения трехфазной нагрузки на 20% номинальной мощности, то, в этом случае, надо менять трехфазный ИБП на более мощный. Это затратно. Выход – подключение фильтросимметрирующего трансформатора, который позволит автоматически перераспределить нагрузки между фазами, что не потребует увеличение мощности ИБП.

Однако, использование такого трансформатора оправдано, если несимметрия токов находится в незначительных пределах. При значительной несимметрии токов требуется применять решения, менее энергоэффективные, но решающие вопрос снижения несимметрии, и, соответственно, защищающие дизель-генераторы от вибрации [12, 13, 14].

Предлагаемая система защиты дизель-генератора от несимметрии токов предназначена для защиты трехфазных дизель-генераторов малой и средней мощности от вибрации, появляющейся при значительной несимметрии питающих токов в трехфазной электрической нагрузке, подключенной к дизель-генератору. При питании однофазных нагрузок в трехфазной сети в ряде случаев при неравномерной нагрузке возможен значительный небаланс токов по фазам, в наиболее критичном случае – потребитель получает электроэнергию только от одной фазы, две другие имеют близкий к нулю выходной ток. Такие небалансы вызывают неравномерную нагрузку генератора, что вызывает повышенную вибрацию генератора и дизеля, а это приводит к сокращению срока службы механических частей дизеля и генератора, в первую очередь, подшипников и соединительных муфт.

Под уровнем несимметрии здесь и далее понимается показатель, характеризующий разницу фазных токов – отношение разницы действующих значений максимального и минимального фазных токов к среднему значению действующих значений трехфазных токов. В большинстве известных решений, предполагающих изменение подключения однофазной нагрузки к линии, определение оптимального варианта подключения нагрузки сводится к определению наименее нагруженной фазы (фазный провод линии с наименьшим уровнем тока). Подключение нагрузки к этой фазе позволяет уменьшить несимметрию фазных токов и уровень тока в нулевом проводе трехфазной линии, а применение такого переключения, по меньшей мере, на части однофазных нагрузок, подключенных к линии, позволяет уменьшить ток в нулевом проводе по всей ее длине. Автоматизация такого переключения однофазных нагрузок может стать эффективным и наименее затратным способом симметрирования фазных токов и позволяет снизить неравномерную токовую нагрузку по фазам генератора, которая вызывает повышенную вибрацию, и, следовательно, снижает надежность дизель-генератора.

Задачей системы является повышение надежности трехфазного дизель-генератора в случае значительной несимметрии токов за счет отслеживания соотношения фазных токов и по превышению заранее заданного значения подключения к наименее нагруженным фазам балластных нагрузок, при этом величина токов через балластные нагрузки будет изменяться с помощью симисторных регуляторов, и величина этих токов будет зависеть от величины несимметрии. Такой подход обеспечивает симметрию фазных токов генератора и, соответственно, снижение вибрации самого генератора.

Структурная схема системы для защиты трехфазного дизель-генератора от несимметрии токов представлена на рис. 4. Дизель вращает ротор трехфазного четырехпроводного генератора, на фазных выводах которого установлены датчики тока. Датчики тока передают сигналы, пропорциональные фазовым токам на вход многоканального аналого-цифрового преобразователя, который, соответственно преобразовывает эти сигналы в цифровой вид и подает на первый вход блока управления. С помощью блока ввода уставок задаются характеристики дизель-генератора, нижний порог включения режима компенсации несимметрии, характеристики зависимости токов через балластные нагрузки от величины несимметрии. Регуляторы балластной нагрузки включены между фазными выходами генератора и нулевым проводом. Каждый регулятор балластной нагрузки состоит из блока управления симисторами, симисторного регулятора и балластной нагрузки. Управляющий сигнал с выхода блока управления подается на вход блока управления симисторами, который с помощью симисторного регулятора и определяет величину тока через балластную нагрузку, и, соответственно, фазный ток соответствующей фазы генератора.

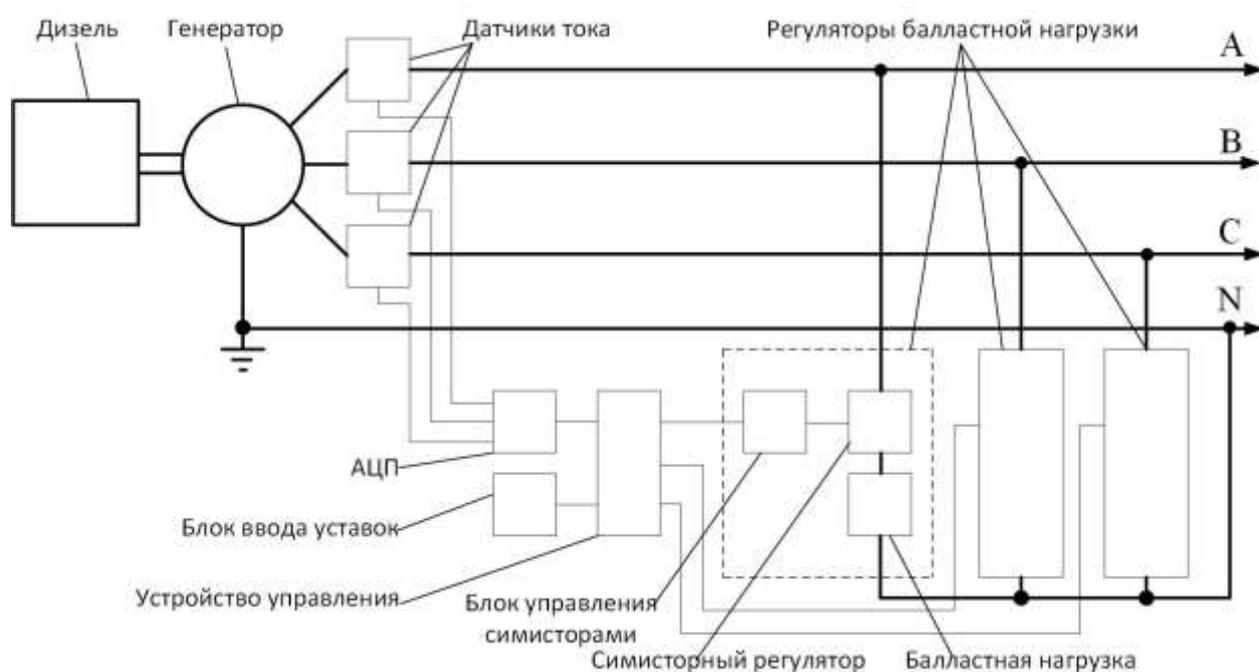


Рис. 4. Структурная схема системы защиты дизель-генератора от несимметрии

Система работает следующим образом. Дизель вращает ротор генератора, который генерирует электроэнергию, при этом фазные токи определяются величинами нагрузки потребителя в каждой фазе. Датчики тока передают на многоканальный аналого-цифровой преобразователь сигналы, пропорциональные фазовым токам, блок управления анализирует соотношение фазных токов генератора. В случае симметрии фазных токов или при небольшом различии токов блок управления не включает регуляторы балластной нагрузки, следовательно, дополнительная нагрузка к фазовым выходам генератора не подключается.

Величина порога включения регуляторов балластной нагрузки определяется типом дизель-генератора, его выходной мощностью, типом предполагаемой нагрузки и задается с помощью блока ввода уставок.

Если происходит превышение величины несимметрии токов порогового значения, заданного блоком ввода уставок по причине изменения нагрузки потребителей и снижения фазовых токов в одной или двух фазах генератора, то определяется величина соотношения токов фаз:

$$I_N > 0,9I_M, \quad (2)$$

где I_N – наименьший ток в одной или двух фазах, I_M – ток в номинально нагруженных фазах. В случае превышения этого соотношения блок управления определяет одну или две ненагруженные фазы, вычисляет соотношение токов нагруженной и ненагруженных фаз, задает управляющее воз-

действие на блоки регулирования балластной нагрузки таким образом, чтобы с помощью подключения балластных нагрузок к ненагруженным фазам и соответствующего увеличения выходного тока генератора в соответствующих фазах привести несимметрию токов к значению, ниже пороговой величины, заданной блоком ввода уставок.

Блок управления задает сигнал, соответствующий действующему значению тока для блока регулирования балластной нагрузки, блок управления симисторами формируют управляющие сигналы для симисторного регулятора, а именно углы открывания симисторов, при этом задается действующее значение токов, протекающих через балластные нагрузки.

Таким образом, с помощью контроля выходных токов генератора определяются наименее нагруженные фазы и подключаются дополнительные балластные нагрузки к этим фазам. Подключение нагрузки к ненагруженным фазам позволяет уменьшить несимметрию фазных токов и уровень тока в нулевом проводе трехфазной линии, а применение такого переключения, по меньшей мере, на части однофазных нагрузок, подключенных к линии, позволяет уменьшить ток в нулевом проводе по всей ее длине. Применение описанного устройства с переключением однофазных нагрузок может стать эффективным и наиболее простым способом симметрирования фазных токов и снизить неравномерную токовую нагрузку по фазам генератора. Применение предложенного технического решения снизит вибрацию генератора и дизеля и повысит их надежность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 54149–2010. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения – М.: Стандартиформ, 2012. – 20 с.
2. ГОСТ Р 51317.4.7–2008. Методы измерений показателей качества электрической энергии – М.: Стандартиформ, 2009. – 54 с.
3. РД 153-34.0-15.502-2002. Методические указания по контролю и анализу качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Часть 2. Анализ качества электрической энергии – М.: 2002. – 33 с.
4. Вагнер, К. Ф. Метод симметричных составляющих / К. Ф. Вагнер, Р. Д. Эванс. – ОНТИ НКПТ СССР, 1936.
5. Тамазов, А. И. Несимметрия токов и напряжений, вызываемая однофазными нагрузками / А. И. Тамазов. – М.: Транспорт, 1965. – 235 с.
6. Driesen J. Введение в несимметричность / J. Driesen, T. Van Craenenbroeck // Энергосбережение. – 2004. – №6. – С. 96–102.
7. Кузнецов, В. Г. Электромагнитная совместимость. Несимметрия и несинусоидальность напряжения / В. Г. Кузнецов, Э. Г. Куренный, А. П. Лютый. – Донецк: Донбасс, 2005. – 249 с.
8. Дрехслер, Р. Измерение и оценка качества электроэнергии при несимметричной и нелинейной нагрузке / Р. Дрехслер. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 112с.
9. Чернин, А. Б. Вычисление электрических величин и несимметричных режимов электрических систем / А. Б. Чернин, С. Б. Лосев. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 528 с.
10. Хомяк, В. А. Особенности измерения коэффициента мощности трехфазных несимметричных нагрузок / В. А. Хомяк, Д. Райнинг // Электричество. – 1996. – № 11. – С. 74 – 77.
11. Сажнев А.М. Источники бесперебойного электропитания переменного тока / А.М. Сажнев, Л.Г. Рогулина Л. Г. – Новосибирск: Изд-во СибГУТИ, 2015. – 312с.
12. Трехфазное симметрирующее устройство: пат. 2660936 РФ, МКИ H02J 3/26 / Василенко В.Д. – № 2017106213; заявл. 22.02.2017; опубл. 11.07.2018, Бюл. № 20, 9 с.
13. Устройство выравнивания нагрузки: пат. 210337 РФ, МКИ H02J 3/26 / Орлов А.И., Волков С.В. – № 2020141280; заявл. 14.12.2020; опубл. 08.04.2022, Бюл. № 10, 5 с.
14. Способ симметрирования фазных токов трёхфазной четырёхпроводной линии и устройство для его осуществления: пат. 2598760 РФ, МПК H02J 3/26 / Самокиш В.В. – № 2015111470/07; заявл. 30.03.2015; опубл. 27.09.2016, Бюл. № 27, 7 с.

PROTECTION OF DIESEL GENERATORS UNDER UNBALANCED LOAD

¹Babasuk Igor Vladimirovich, cadet;

²Bocharnikov Aleksandr Segeevich, master's student;

³Popov Mikhail Aleksandrovich, student;

⁴Chizhma Sergey Nikolaevich, doctor of engineering, docent,
professor educational and scientific cluster «Institute of high Technologies»

¹Baltic Fishing Fleet State Academy FSBEI HE «KSTU»,
Kaliningrad, Russia, e-mail: babasuk@yandex.ru

^{2,3,4}FSBAI HE Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia,
e-mail: ABocharnikov@stud.kantiana.ru; MPopov@stud.kantiana.ru; schizma@kantiana.ru

An asymmetric mode for uninterruptible power supplies based on diesel generators can lead to increased vibration of the generator with a significant amount of asymmetry. The purpose of the work is to analyze the systems of protection against asymmetry and, based on the analysis, to build a system of protection against asymmetry based on monitoring phase currents and connecting the ballast load to under-loaded phases. Such a technical solution allows you to reduce the asymmetry of phase currents and the current level in the zero wire of a three-phase line, and the use of such switching allows you to reduce the current in the zero wire.

УДК 629.311

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЫСШИХ ГАРМОНИЧЕСКИХ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПСЗ «ЯНТАРЬ»

¹Белей Валерий Феодосиевич, д-р техн. наук, профессор,
заведующий кафедрой энергетики;

²Коротких Кирилл Викторович, аспирант кафедры энергетики;

³Самарин Василий Денисович, магистрант кафедры энергетики

^{1,2,3}Калининградский государственный технический университет,
Калининградская область, г. Калининград, Россия,

e-mail: ¹vbeley@klgtu.ru; ²kirill.korotkikh@klgtu.ru; ³w.d.samarin@mail.ru

В данной работе приведены некоторые результаты исследований по распространению высших гармонических составляющих токов и напряжения на исходной математической модели системы электроснабжения завода, выявлены узлы с преобладающей долей нелинейных электроприёмников, что может иметь высокую практическую значимость при дальнейшей реструктуризации системы электроснабжения объекта морской индустрии с целью повышения качества электрической энергии в соответствии с ГОСТ и снижения потерь электроэнергии. Приведены результаты экспериментальных исследований высших гармонических, эмиссируемых в сеть сварочными агрегатами, активно эксплуатируемыми на предприятии и занимающими основную долю в нелинейном электропотребляющем оборудовании объекта морской индустрии.

Упрощенная структурная схема системы электроснабжения Прибалтийского судостроительного завода (ПСЗ) «Янтарь», отражающая принцип присоединения к энергосистеме Калининградской области и перетоки активной и реактивной мощности по трансформаторным подстанциям напряжением 6/0,4 кВ завода, представлена на рисунке ниже.

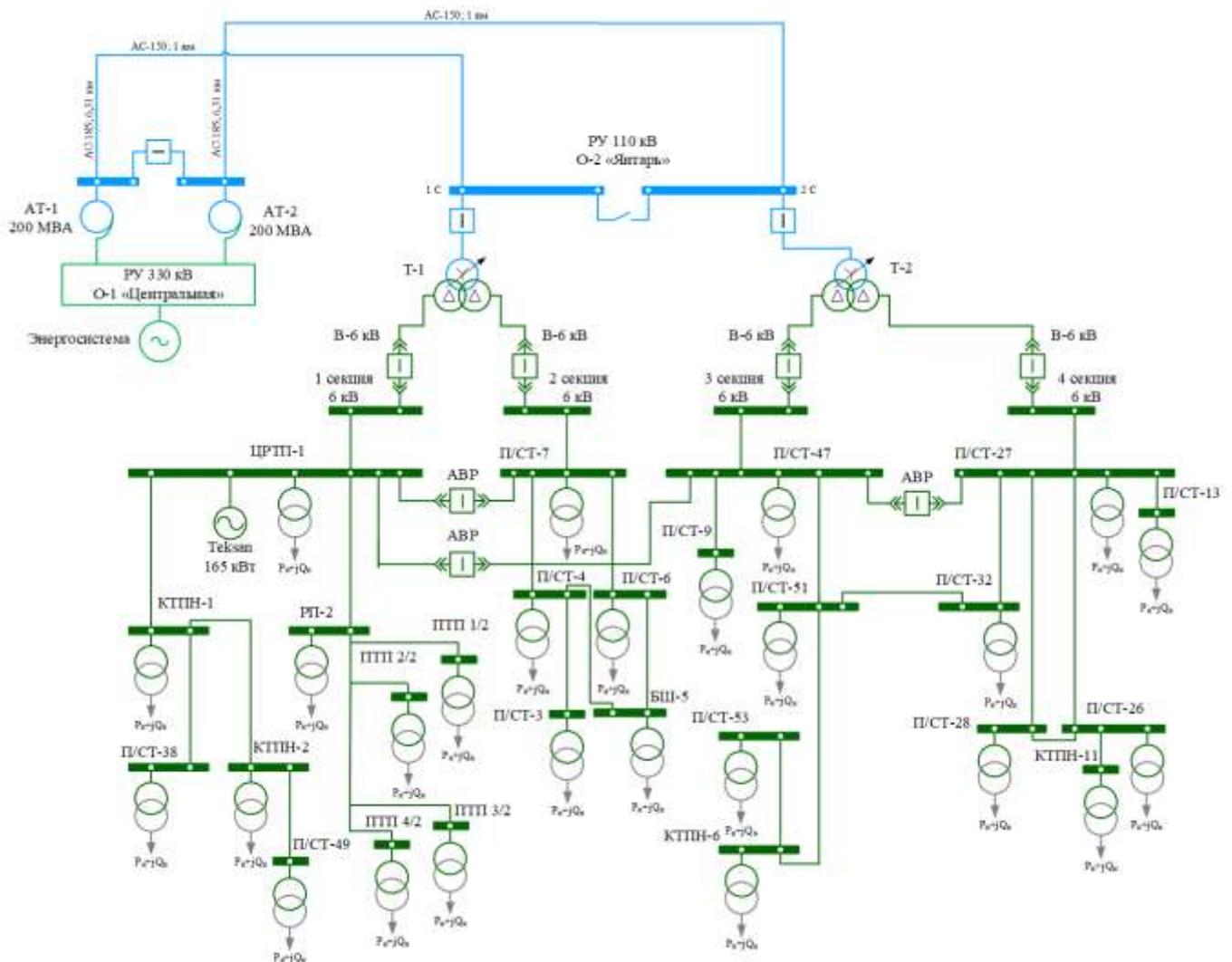


Рис. 1. Схема системы электроснабжения исследуемого объекта морской индустрии

Большая часть кабельных трасс на исследуемом заводе проложена кабелем марки АСБ 3х95. Сопротивление нулевой последовательности кабельных трасс, зависящее от различного рода факторов (удельного сопротивления почвы, заземления экранов, способа прокладки кабельной линии) трудно поддается расчетам, что характерно и для силовых трансформаторов, чье индуктивное сопротивление зависит от группы соединения обмоток, наличия или отсутствия нулевого проводника, коэффициента загрузки, конструкции бака, направления распространения высших гармонических [1]. Трансформаторный парк завода представлен высокой долей двухобмоточных трансформаторов напряжением 6/0,4 кВ (Таблица 1).

Таблица 1

Данные о трансформаторном парке 6/0,4 кВ исследуемого объекта морской индустрии

Стр-ва, МВА	Количество, шт	Трансформаторы, эксплуатируемые на схеме Y/Y ₀ , %
1,6	12	33
1,0	11	81
0,63	22	77
0,56	2	100
0,4	4	100
0,32	1	100

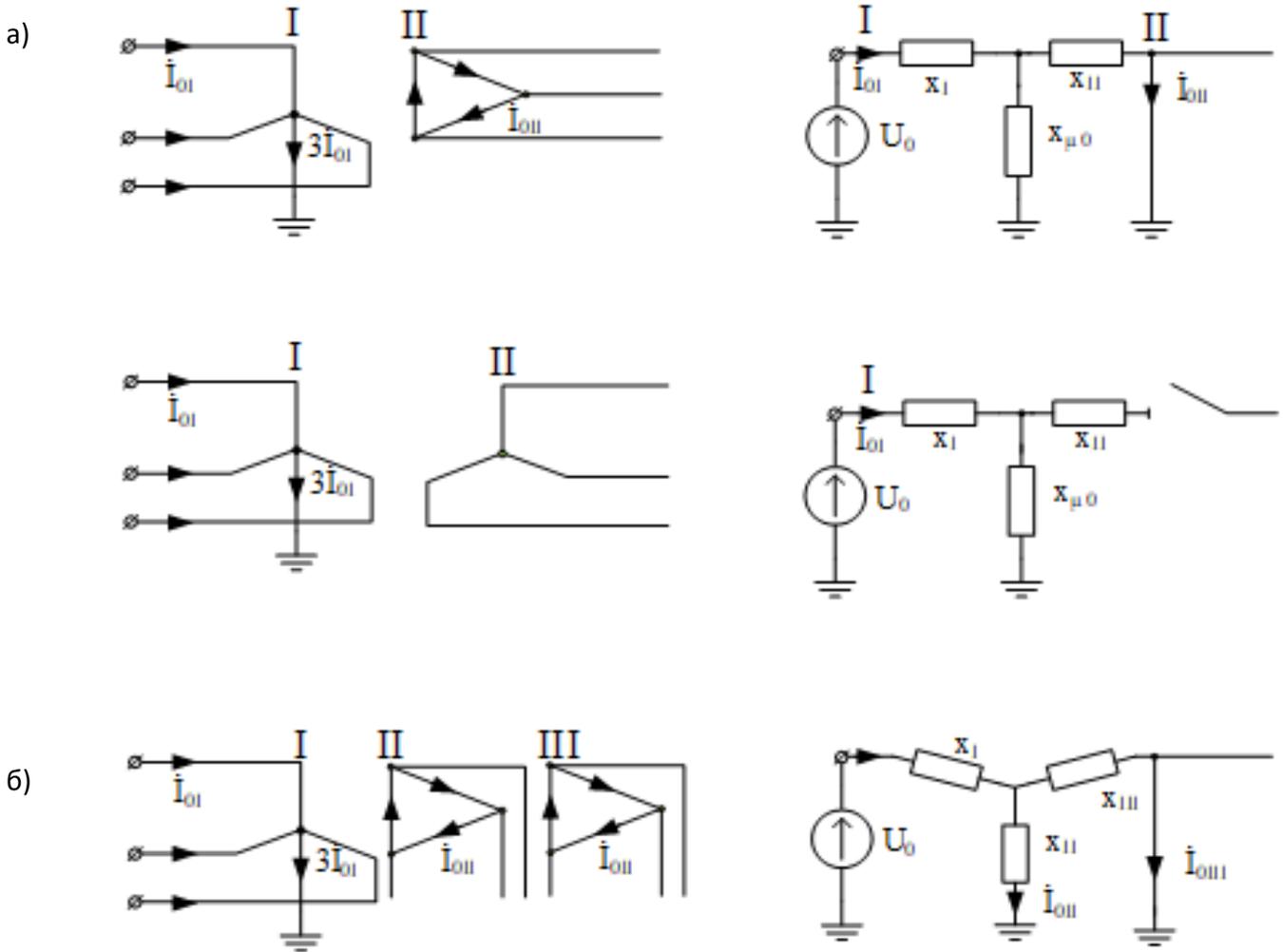


Рис. 2. Соединения обмоток и схемы замещения по оценке распространения токов нулевой последовательности трансформаторов системы электроснабжения завода

При схеме соединения обмоток Y_0/Δ (Рисунок 2а) ток вторичной обмотки не выходит за её пределы, на схеме замещения это отражается тем, что часть сети, находящаяся дальше считается замкнутой [1, 2]. При схеме соединения обмоток Y_0/Y (Рисунок 2б) используется схема замещения, эквивалентная режиму работы трансформатора при малой доле нагрузки [1, 2]. Для трансформаторов с расщепленной обмоткой применяется комбинация рассмотренных выше случаев как параллельных соединений (Рисунок 2в) [1, 2].

Была разработана исходная математическая модель в программной среде NEPLAN (Рисунок 3), позволяющая оценить: уровень высших гармонических в системе электроснабжения Прибалтийского судостроительного завода «Янтарь»; их распространение в сети, подстанции с высокой долей нелинейных электроприёмников, в перспективе – наметить технические, технологические решения по снижению влияния высших гармонических на функционирование системы электроснабжения исследуемого объекта морской индустрии.

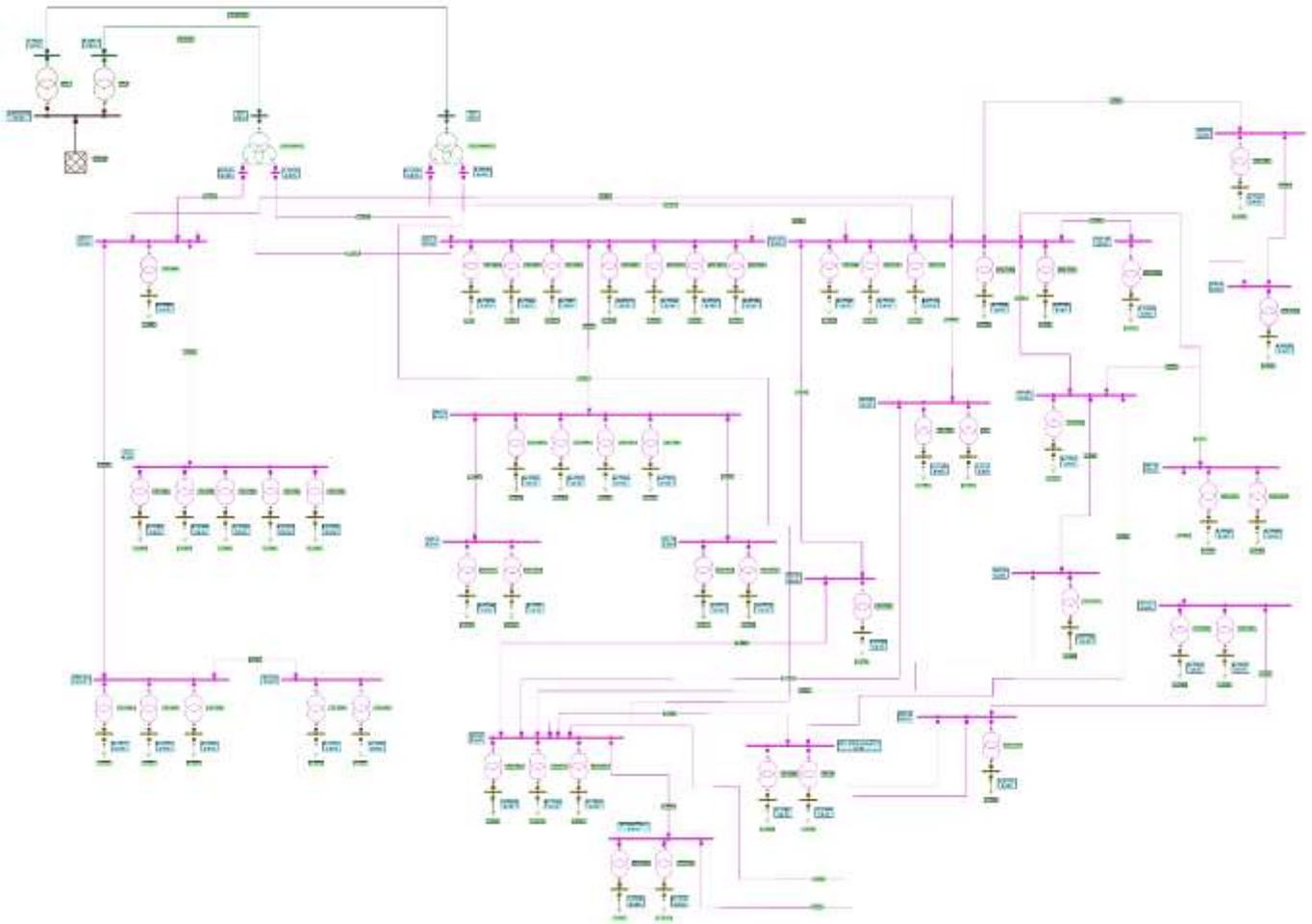


Рис. 3. Исходная математическая модель системы электроснабжения исследуемого завода

Благодаря возможности моделирования источников высших гармоник можно оценить распространение гармоник любого порядка, отметить уровни преобладающих из них и выявить узлы с преобладающей долей нелинейных электроприёмников (Рисунок 8).

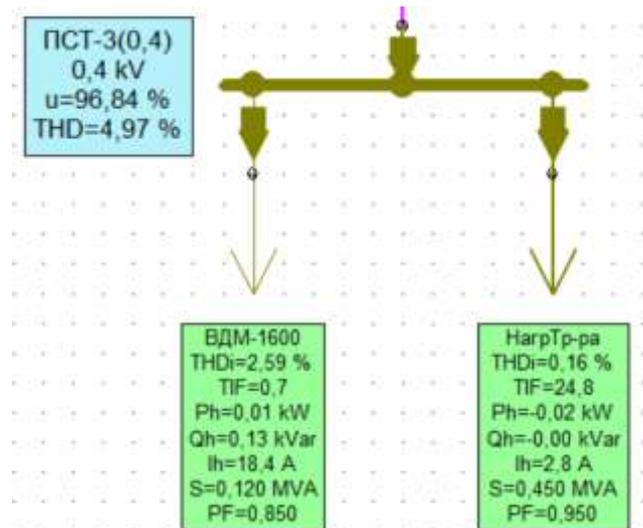
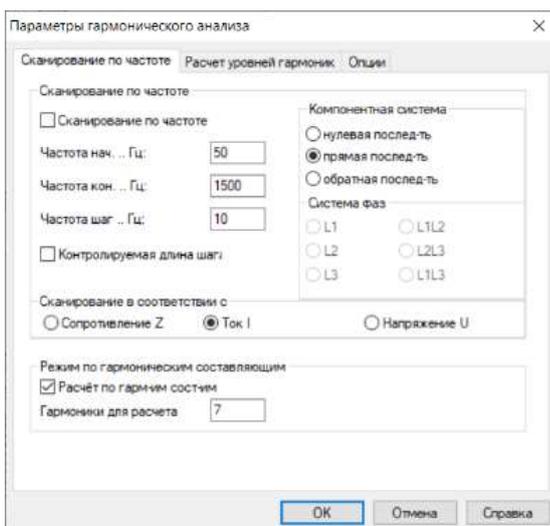


Рис. 4. Параметры расчета гармоник соответствующего порядка и результаты расчета для каждого элемента в программной среде NEPLAN

Некоторые результаты расчёта на математической модели распространения токов высших гармонических прямой, обратной и нулевой последовательностей приведены в таблице 2.

Уровни высших гармонических на четырех головных подстанциях завода «Янтарь»

Подстанция	Элемент	Ток гармоника, А на частоте		
		150, Гц	250, Гц	350, Гц
Центральная распределительная трансформаторная подстанция № 1	ЛЭП	0,2078	0,1536	0,1487
	ЛЭП	0,1419	0,1485	0,1451
	ЛЭП	1,5903	0,9524	0,5926
	ЛЭП	1,3983	0,4452	0,3746
Подстанция № 7	ЛЭП	3,8013	2,2943	1,3583
	ЛЭП	2,3283	0,9583	0,6791
Подстанция № 47	ЛЭП	1,1773	0,1578	0,1509
	ЛЭП	1,2463	0,1657	0,1566
	ЛЭП	0,1474	0,1397	0,1388
	ЛЭП	0,4566	0,1418	0,14
	ЛЭП	0,6186	0,1452	0,1423
	ЛЭП	0,546	0,1425	0,1403
Подстанция № 27	ЛЭП	0,2684	0,1426	0,1408
	ЛЭП	0,5157	0,1442	0,1417

Наивысший уровень гармоник тока, протекающих по одной из кабельных линий 6 кВ судостроительного завода, наблюдается на трансформаторной подстанции №4: на частоте 150 Гц – 3,701А, на частоте 250 Гц – 2,192А, на частоте 350 Гц – 1,253 А.

Наивысший уровень гармоник тока в системе электроснабжения 0,4 кВ завода «Янтарь», наблюдается на трансформаторной подстанции №3: на частоте 150 Гц – 58 А, на частоте 250 Гц – 34,2А, на частоте 350 Гц – 19,4 А. Высокий уровень гармоник третьего порядка обусловлен большой долей сварочной аппаратуры в системе электроснабжения завода (18% от установленной мощности всех электроприемников). В связи с этим были проведены экспериментальные исследования высших гармонических, эмиссируемых в сеть сварочным аппаратом ВДМ-1600, активно эксплуатируемом на заводе.

Схема экспериментальной установки и технические характеристики сварочного агрегата приведены на рисунке 4.

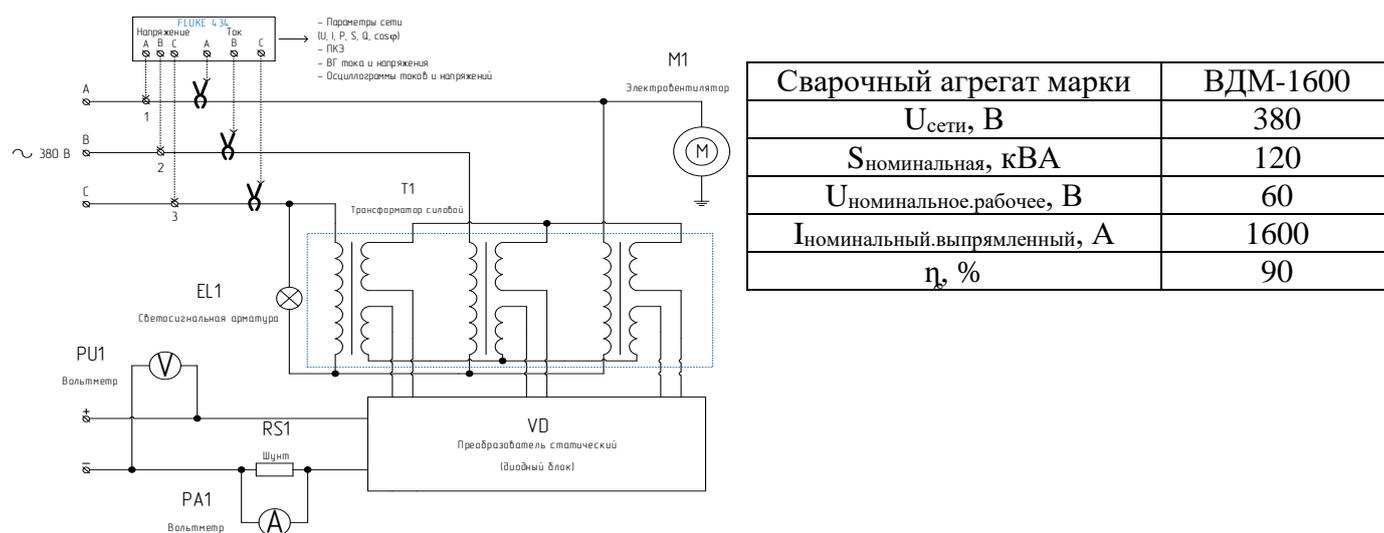


Рис. 4. Схема экспериментальной установки и технические параметры нелинейного элемента завода

Результаты измерений сведены в таблицах 3-5.

Результаты измерений энергетических параметров сварочного аппарата ВДМ-1600

Параметр	Значение			
Фазные токи	$I_{L1}, I_{L2}, I_{L3}, A$	20,1	24,9	16,2
Линейные напряжения	$U_{L1-L2}, U_{L2-L3}, U_{L3-L1}, B$	392,6	406,9	403
Активная мощность	$P_{L1}, P_{L2}, P_{L3}, кВт$	0,51	1,45	2,15
Реактивная мощность	$Q_{L1}, Q_{L2}, Q_{L3}, кВАр$	4,49	5,65	3,07
Полная мощность	$S_{L1}, S_{L2}, S_{L3}, кВА$	4,52	5,83	3,74
Коэффициент мощности	$\cos\phi$	0,11	0,25	0,59

Таблица 4

Значения высших гармонических по тока исследуемого сварочного аппарата

Гармоники	Результаты измерений, %		
	Фаза L1, %	Фаза L2, %	Фаза L3, %
Третья гармоника	32,461	13,261	39,061
Пятая гармоника	19,161	5,361	9,461
Седьмая гармоника	11,061	3,161	6,661
Девятая гармоника	9,861	3,461	7,361
Одиннадцатая гармоника	8,961	3,961	7,761
Тринадцатая гармоника	6,361	4,061	7,161
Пятнадцатая гармоника	8,561	3,461	6,861
$K_i, \%$ (Суммарный коэффициент гармонических составляющих тока в точке передачи электрической энергии)	43,861	17,761	44,861

Полученные результаты свидетельствуют о высокой доле потребляемой реактивной мощности, низком значении коэффициента мощности, высоком уровне токов высших гармонических, преобладающими из которых являются токи нулевой последовательности, в большей степени распространяющиеся по двум фазам (L1и L3) трёхфазной системы электроснабжения завода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование проблемы распространения высших гармонических по системам электроснабжения на стадии проектирования, с опорой на результаты экспериментальных, аналитических исследований и мат. моделирования позволит повысить качество электроэнергии в данных системах.

В работе были достигнуты следующие результаты:

- Разработана исходная математическая модель системы электроснабжения объекта морской индустрии, позволяющая оценить степень распространения высших гармонических прямой, обратной и нулевой последовательностей между трансформаторными подстанциями завода, выявить узловые точки в системе электроснабжения с преобладающей долей нелинейных электроприёмников;

- Были проведены экспериментальные исследования высших гармонических, эмиссируемых в сеть наиболее распространенным типом электрооборудования на судостроительном заводе – сварочными агрегатами. Суммарный коэффициент гармонических составляющих тока – 41,5%, 15,4%, 42,5% по фазам L1, L2и L3 соответственно. Наблюдается высокий уровень высших гармонических, преобладающими из которых являются токи гармоник третьего (32% по фазе L1), пятого (19% по фазе L1) и седьмого (11% по фазе L1) порядков, распространяющиеся по путям следования токов нулевой, обратной и прямой последовательностей соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ульянов С. А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах: учебник для вузов. – М.: «Энергия», 1970. – 520 с.
2. Шидловский А. К., Жаркин А. Ф. Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях. – Киев: «Наукова думка», 2005. – 211 с.
3. Копылов И. П. Электрические машины: учебное пособие для вузов. – М.: «Логос», 2000. – 607 с.
4. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения предприятий. – М.: «Энергоатомиздат», 1984. – 160 с.

SOME RESULTS OF STUDIES OF HIGHER HARMONICS IN THE POWER SUPPLY SYSTEM OF THE BSP "YANTAR"

¹Beley Valery Feodosievich, Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of the Department of Power Engineering;

²Korotkikh Kirill Viktorovich, PhD student of the Department of Power Engineering;

³Samarin Vasily Denisovich, Master Degree student of the Department of Power Engineering

^{1,2,3}FSBEI HE "Kaliningrad state technical university", Kaliningrad region, Kaliningrad, Russia,
e-mail: vbeley@klgtu.ru kirill; korotkikh@klgtu.ru; w.d.samarin@mail.ru

This paper presents some research results on the propagation of higher harmonic components of currents and voltage on the initial mathematical model of the plant's power supply system, identifying nodes with a predominant share of nonlinear electrical receivers, which can have high practical significance in the further restructuring of the power supply system of a marine industry facility with the purpose of improving the quality of electrical energy in accordance with GOST and reducing electricity losses. The results of experimental studies of higher harmonics emitted into the network by welding units that are actively operated at the enterprise and occupy the main share in the non-linear power-consuming equipment of a marine industry facility are presented.

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ РЕГИСТРАЦИИ ДУГОВЫХ ПРОЦЕССОВ

¹Жижечкин Юрий Алексеевич, аспирант

¹Калининградский государственный технический университет,
Калининград, Россия, e-mail: y.zhizhechkin@shipyard-yantar.ru

Рассматривается программный метод анализа дуговых процессов, используя сигналы тока и напряжения в цепи. Рассмотрено применение алгоритмов библиотек SciPy, NumPy и Pandas для обработки экспериментальных данных. Выполнено сравнение экспериментально полученных сигналов с математической моделью дуговых процессов О. Майера. Выполнено сравнение ручной обработки и машинной обработки сигналов дуговых процессов. Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального агентства по рыболовству (контракт № 122030900054-0).

Введение

Дуговые процессы, происходящие в сетях низкого напряжения, являются наиболее пожароопасными [1]. Согласно статистике [2] количество пожаров в Российской Федерации произошедших по причине нарушений правил устройства и эксплуатации электрооборудования за 2021г составило 57 766. Проводя эксперименты по исследованию дуговых процессов, мы сталкиваемся с большим количеством постоянно повторяющимися идентичными действиями. Суть проводимых экспериментов заключается в воссоздании дугового процесса и регистрации его осциллографом. Не смотря на рутинность экспериментов, львиную долю времени занимает обработка полученных результатов. Сложность обработки заключается в выделении участка осциллограммы на котором зарегистрирован процесс горения дуги и его последующий анализ. В низковольтной промышленной электрической сети переменного тока частотой 50Гц, за одну секунду непрерывного дугового процесса мы получаем около 100 полупериодов, подлежащих анализу. Помимо этого, на осциллограммах присутствуют участки с отсутствием дугового процесса. В процессе воссоздания дуговых процессов накапливается колоссальный объем полученных данных. При этом интересующая нас часть данных занимает не более 20% от общего объема.

Ручная обработка занимает большое количество времени. Для автоматизации обработки данных необходимо использование ЭВМ. Ввиду того, что обработка результатов регистрации дуговых процессов специфична и специализированное программное обеспечение отсутствует было принято решение написать собственное программное обеспечение.

При написании программного обеспечения были использованы Microsoft Visual Studio Code, Python 3.11, а также библиотеки NumPy, Pandas, SciPy, Matplotlib, argparse, configparser.

Методика и требования обработки данных

Для статистической обработки большого количества данных отлично подходит язык программирования Python. Большой выбор существующих фреймворков для работы с данными, построения графиков и гистограмм, математических вычислений и преобразований делают Python незаменимым инструментом.

Для программной обработки результатов регистрации дуговых процессов программа должна соответствовать следующим базовым критериям:

- обработка одного и множества файлов с результатами регистрации дугового процесса;
- поиск участка осциллограммы на котором зарегистрирован дуговой процесс;
- настраиваемая фильтрация шумов;
- поддержка программных модулей для расширения аналитического функционала;

Состав данных сигнала

Данные с осциллографа представляют собой набор значений считываемых величин с определённой частотой дискретизации. Формат файла, в котором представлены данные полученные с осциллографа*.CSV. При обработки следует учитывать, что в файлах *.CSV содержится величина напряжения на щупах. Для измерения токовой составляющей дугового процесса, щупы осциллографа присоединяются параллельно измерительному шунту. В рамках исследования был использован шунтирующий резистор 75-РИ. Омическое сопротивление шунтирующего резистора, в соответствии с замерами, составляет 0,16 Ом. Для получения действительных значений тока, в канале тока, необходимо выполнять перерасчет каждой точки согласно закону Ома для участка цепи $I = \frac{U}{R}$.

Пример сохранённых осциллографом зарегистрированных данных тока и напряжения в виде файловой структуры представлен на рисунке 1.

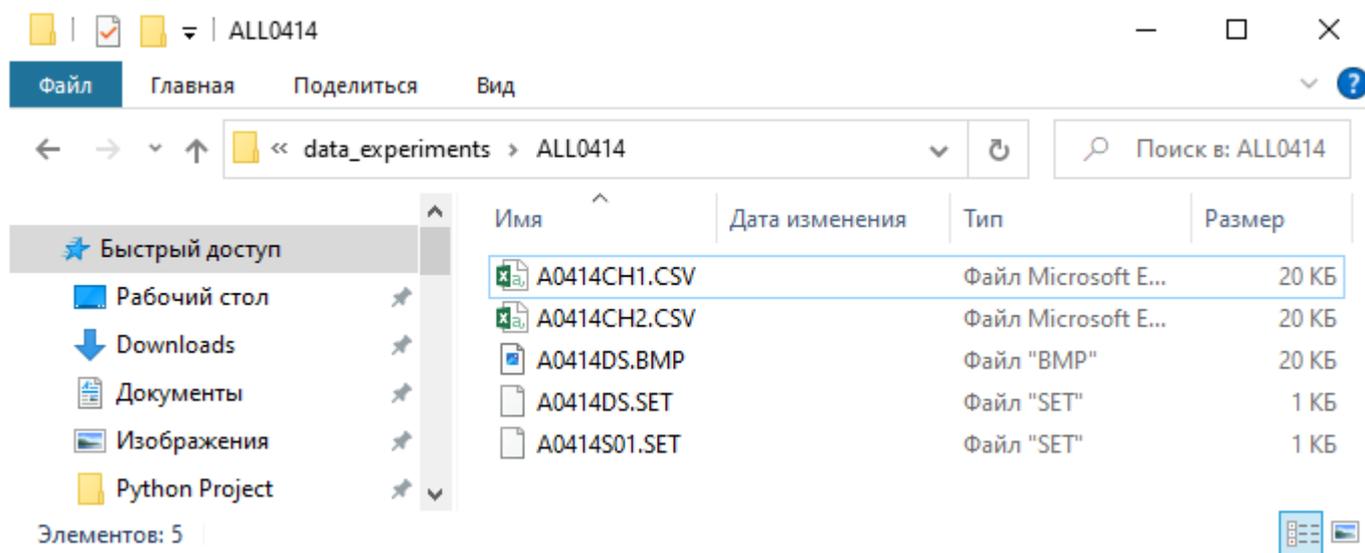


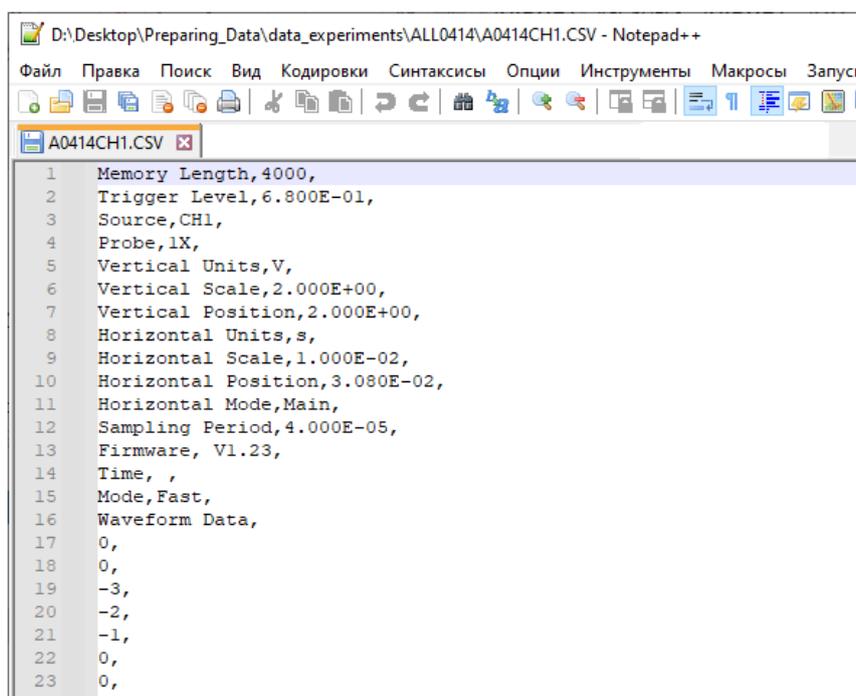
Рис. 1. Файловая структура, предоставляемая осциллографом.

Все файлы сохраняются в папку со своим индивидуальным номером измерения. В нашем примере это ALL0414. Файлы A0414CH1.CSV и A0414CH2.CSV это текстовые таблицы с настройками измерения и числовыми значениями координат по оси OY измеряемой величины. Содержание такого файла показано на рисунке 2.

В первых 16 строках мы видим настройки осциллографа для данного измерения, такие как:

- количество сохранённых координат по оси OY
- уровень триггера для регистрации измеряемого сигнала
- источник сигнала
- точность данных
- измеряемая величина по вертикали
- масштаб по вертикали
- смещение по вертикали
- измеряемая величина по горизонтали
- масштаб по горизонтали
- смещение по горизонтали
- режим измерения по горизонтали
- частота дискретизации
- версия прошивки осциллографа
- текущее время (если установлено в осциллографе)
- режим регистрации сигнала
- данные сигнала (сигнал, преобразованный сигнал и т.д.)

В последующих строках записаны данные сигнала. Количество последующих строк определено в параметре Memory Length и содержит 4000 значений. Точность записанных данных согласно параметру Probe представлена с округлением до целого числа.



```
1 Memory Length,4000,
2 Trigger Level,6.800E-01,
3 Source,CH1,
4 Probe,1X,
5 Vertical Units,V,
6 Vertical Scale,2.000E+00,
7 Vertical Position,2.000E+00,
8 Horizontal Units,s,
9 Horizontal Scale,1.000E-02,
10 Horizontal Position,3.080E-02,
11 Horizontal Mode,Main,
12 Sampling Period,4.000E-05,
13 Firmware, V1.23,
14 Time, ,
15 Mode,Fast,
16 Waveform Data,
17 0,
18 0,
19 -3,
20 -2,
21 -1,
22 0,
23 0,
```

Рис. 2. Содержание файла с данными зарегистрированного сигнала.

Файл A0414DS.BMP это фотография (скриншот) экрана осциллографа на момент регистрации дугового процесса. Такой скриншот имеет низкое качество изображения и годится только для визуального анализа сигнала. Скриншот, в натуральную величину, представлен на рисунке 3.

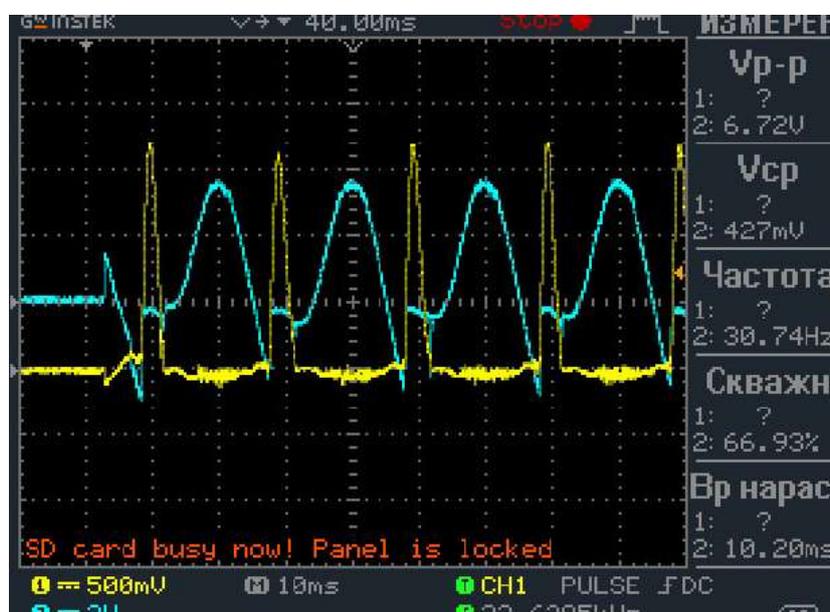


Рис. 3. Фотография экрана осциллографа в натуральную величину.

Файлы A0414DS.SET и A0414S01.SET содержат общие настройки осциллографа такие как текущее время, версии прошивок модулей, режим измерения и т.п. Данные файлы не несут никакой полезной для анализа информации.

Первичная обработка сигнала

Работать с полученными данными сигналов в том виде в каком они представлены весьма неудобно. Первичная обработка данных заключается в приведении в удобочитаемый вид и сохранении их в виде таблицы Excel. Используя настройки, указанные в шапке фала с данными, программно выполняется перерасчет и запись в массив. Для работы с массивами данных и их статистической обработки используются библиотеки NumPy и Pandas. Часть кода, выполняющего данные преобразования показано на рисунке 4.

```

214 #####
215 ##### Загрузка данных #####
216 #####
217 #####
218 pr_deb("Reading Setting ...", color='t')
219 SET_1 = pd.read_csv(EXP_FILE+'CH1.CSV', header=None, encoding='utf-8', skiprows=[1,2,3,4,7,10,12,13,14,15]+[i for i in range(16,4017)]), usecols=[1], index_col=None).T
220 SET_2 = pd.read_csv(EXP_FILE+'CH2.CSV', header=None, encoding='utf-8', skiprows=[0,1,2,3,4,7]+[i for i in range(10,4017)]), usecols=[1], index_col=None).T
221 SET = pd.concat([SET_1, SET_2], axis=1)
222 del SET_1; del SET_2
223
224 # Сжатие данных в массив
225 SET.columns = ['Memory_Length', 'C_v_s', 'C_v_p', 'C_h_s', 'C_h_p', 'Sampling_Period', 'V_v_s', 'V_v_p', 'V_h_s', 'V_h_p']
226
227 pr_deb("Reading Chanel 1 ...", color='t')
228 IF(CHAN1 == False):
229     DATA['Current'] = pd.read_csv(EXP_FILE+'CH1.CSV', header=None, encoding='utf-8', dtype='float64', skiprows=[i for i in range(0,16)]), usecols=[0])
230     DATA['Current'] = DATA['Current'].apply(lambda x: x*(SET.C_v_s)) # Коррекция величины тока
231     DATA['Current'] = DATA['Current'].apply(lambda x: x*SET.C_v_p)
232     DATA['Current'] = DATA['Current'].replace([0],0.01) # Убираем все нулевые значения тока прибавив им минимальное значение в 1мА
233     pr_deb("Reading Chanel 2 ...", color='t')
234     DATA['Voltage'] = pd.read_csv(EXP_FILE+'CH2.CSV', header=None, encoding='utf-8', dtype='float64', skiprows=[i for i in range(0,16)]), usecols=[0])
235     DATA['Voltage'] = DATA['Voltage'].apply(lambda x: x*(SET.V_v_s)) # Коррекция величины напряжения
236     DATA['Voltage'] = DATA['Voltage'].apply(lambda x: x*SET.V_v_p)
237 else:
238     DATA['Current'] = pd.read_csv(EXP_FILE+'CH2.CSV', header=None, encoding='utf-8', dtype='float64', skiprows=[i for i in range(0,16)]), usecols=[0])
239     DATA['Current'] = DATA['Current'].apply(lambda x: x*(SET.C_v_s)) # Коррекция величины тока
240     DATA['Current'] = DATA['Current'].apply(lambda x: x*SET.C_v_p)
241     DATA['Current'] = DATA['Current'].replace([0],0.01) # Убираем все нулевые значения тока прибавив им минимальное значение в 1мА
242     pr_deb("Reading Chanel 2 ...", color='t')
243     DATA['Voltage'] = pd.read_csv(EXP_FILE+'CH1.CSV', header=None, encoding='utf-8', dtype='float64', skiprows=[i for i in range(0,16)]), usecols=[0])
244     DATA['Voltage'] = DATA['Voltage'].apply(lambda x: x*(SET.V_v_s)) # Коррекция величины напряжения
245     DATA['Voltage'] = DATA['Voltage'].apply(lambda x: x*SET.V_v_p)
246
247 DATA.squeeze()
248 DATA['Filename'] = 'A'+exp_cue
249 # Конвертация значения величины напряжения на нагруженном резисторе IT в величину тока первичной цепи
250 DATA['Current'] = DATA['Current'].values/R_LOAD
251 #####
252 ##### Выделение расчетных значений #####

```

Рис. 4. Программный код для загрузки и первичного преобразования данных.

Данные обоих каналов (напряжения и тока) приводятся к нормальным значениям и записываются в один массив.

В рамках одного эксперимента, без изменения параметров дугового процесса, собирается множество данных, для выявления корреляционных данных и исключения из них ошибочных. Учитывая данную необходимость множество зарегистрированных данных сигналов записываются в один массив с соответствующими номерами. На этапе первичной обработки данных производится вычисление расчетных величин времени, сопротивления дуги и выделяемой на ней мощности. Пример полученных данных на срезе двух регистраций сигнала представлены на рисунке 5.

	A	B	C	D	E	F	G
1	Index	Filename	Time	Current	Voltage	Resistance	Power
3996	3994	A0400	0.4954	187.5	-27.0	0.144	5062.5
3997	3995	A0400	0.4955	125.0	-30.0	0.24	3750.0
3998	3996	A0400	0.4956	-62.5	-33.0	0.528	2062.5
3999	3997	A0400	0.4957	0.625	-33.0	52.8	20.625
4000	3998	A0400	0.4958	62.5	-33.0	0.528	2062.5
4001	3999	A0400	0.4959	125.0	-31.0	0.248	3875.0
4002	0	A0401	0.096	0.625	-25.0	40.0	15.625
4003	1	A0401	0.0961	0.625	-25.0	40.0	15.625
4004	2	A0401	0.0962	0.625	-25.0	40.0	15.625
4005	3	A0401	0.0963	0.625	-26.0	41.6	16.25
4006	4	A0401	0.0964	62.5	-28.0	0.448	1750.0

Рис. 5. Подготовленные данные в таблице Excel.

Состав программного комплекса

Программный комплекс состоит из нескольких файлов. Главный файл `main.py` содержит тело программы, с поддержкой автоматического подключения модулей для обработки. Программа выполняет загрузку данных из файлов CSV и запись преобразованной таблицы в файл Excel. Настройки основного тела программы хранятся в файле `main_config.ini`. Программа поддерживает обработку аргументов командной строки для изменения настроек. К настройкам программы относятся следующие аргументы:

- включение/выключение вывода в терминал отладочной информации;
- запись выполненных действий и возникших ошибок в журнал;
- наименование папок с экспериментальными и обработанными данными;
- величина сопротивления шунта;
- величина делителя щупов осциллографа;
- включение/отключение инверсии каналов;
- включение/отключение тихого режима.

Функции обработки сигналов реализованы в отдельных файлах, что позволяет оперативно вносить изменения в программный модуль, находить и исправлять ошибки, не влияя на работу основной программы. Каждый модуль имеет собственный файл настроек с параметрами, относящимися к конкретному преобразованию. На момент написания статьи реализованы следующие модули:

- фильтрация сигнала;
- построение графиков и диаграмм и их сохранение в файл;
- быстрое преобразование Фурье;
- определение стационарных точек и точек экстремумов;
- статистический анализ.

Алгоритмы обработки

Обработка данных имеет вариативный характер. Для исследования реализована возможность включения и отключения различных модулей обработки. Такой подход позволяет комбинировать методы обработки. Реализованы следующие алгоритмы:

- фильтрация шумов КИХ фильтром;
- быстрое преобразование Фурье;
- определение точек экстремумов сигналов тока и напряжения;
- вычисление критических значений сопротивления дуги;
- вычисление значений максимальной мощности дугового процесса;
- определение минимального напряжения возникновения дугового процесса;
- статистическая обработка данных в рамках одного или нескольких экспериментов.

Фильтрация шумов выполняется КИХ фильтром (с англ. FIR – «finite impulse response»). КИХ фильтры – это цифровые фильтры с конечной импульсной характеристикой. Импульсные характеристики таких фильтров ограничены во времени и имеют конечное счетное число коэффициентов. Множество алгоритмов КИХ фильтров реализованы в библиотеки SciPy [4]. Для фильтрации наших сигналов опытным путём был определён оптимальный алгоритм фильтрации методом Кайзера [4]. Результаты фильтрации представлены на рисунке 8.

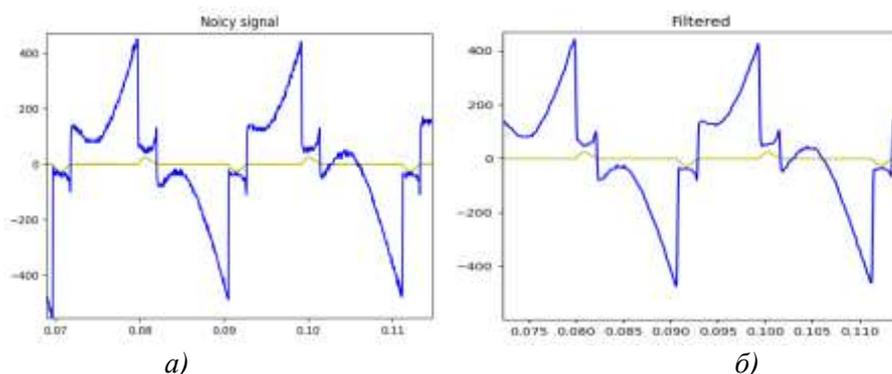


Рис. 8. Фильтрация сигнала. (а – зашумленный исходный сигнал; б – сигнал после фильтрации)

На изображениях сигналов едва заметен фазовый сдвиг сигнала. Так как фильтр применяется к обеим характеристикам (тока и напряжения) то фазовый сдвиг сигнала взаимно компенсируется.

Быстрое преобразование Фурье необходимо для анализа естественного и создаваемого дугой шума, а также для анализа гармонических составляющих. Спектр сигнала напряжения представлен на рисунке 9.

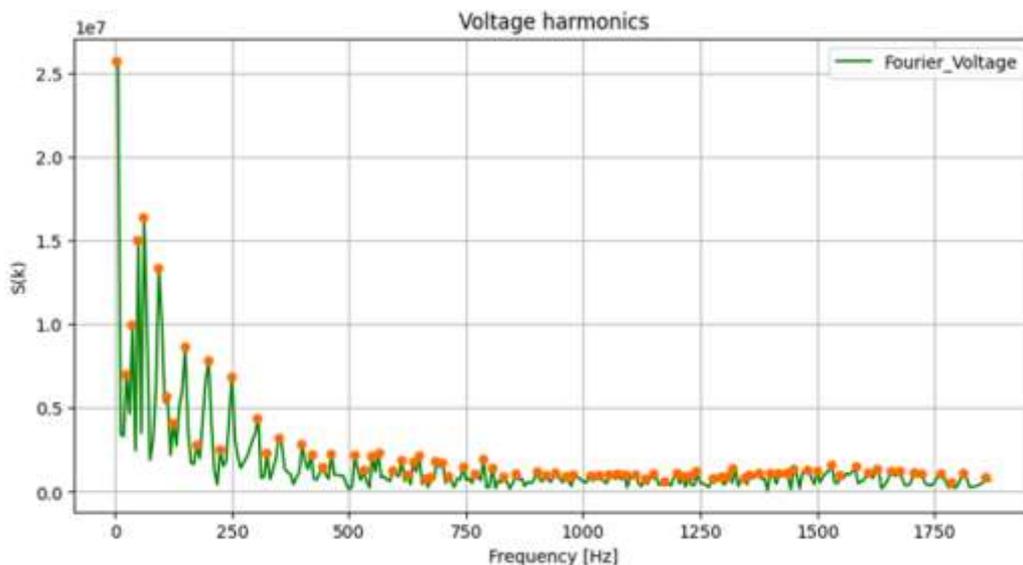


Рис. 9. Спектр сигнала напряжения.

Определив точки экстремумов в спектре сигнала можно определить принадлежность шума к тому или иному спектру. Алгоритмы аппроксимации шума также реализованы в библиотеки SciPy [4].

Определение точек экстремумов и стационарных точек необходимо для нахождения минимумов и максимумов значений исследуемой величины. На рисунке 10 показан график напряжения и тока. На изображении показаны точки возникновения и гашения дуги, а также максимумы напряжения.

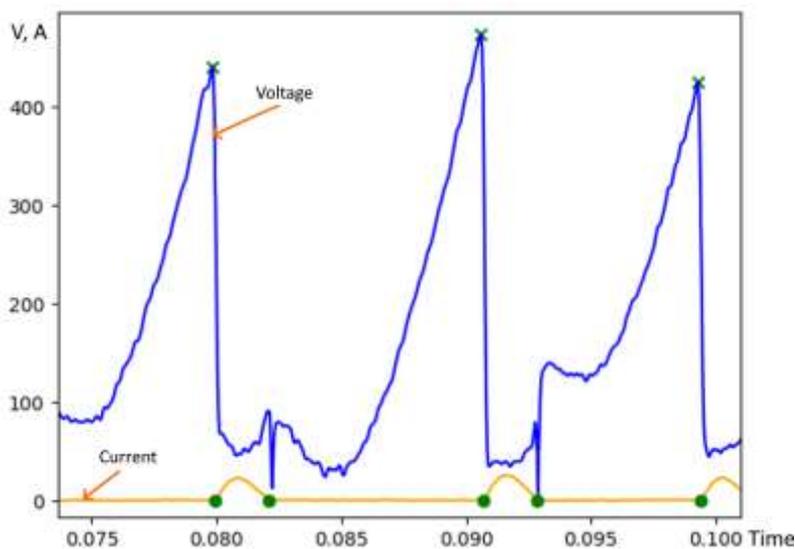


Рис. 10. Максимумы напряжения и минимумы тока.

Часть кода для определения точек экстремумов и точек начала и окончания дугового процесса показан на рисунке 11.

```

MinApm = 1
x = F_DATA['Time']
f = np.arange(0, F_DATA['Time'].size)
f[...] = MinApm
c = F_DATA['Current'].abs()
v = F_DATA['Voltage'].abs()
grp_c = F_DATA.loc[F_DATA['Period'].isin(range(Per_start, Per_end))].groupby(
    (np.sign(F_DATA['Current']).diff().fillna(0).ne(0)).cumsum())# Группировка токовых данных по знаку
grp_v = F_DATA.loc[F_DATA['Period'].isin(range(Per_start, Per_end))].groupby(
    (np.sign(F_DATA['Voltage']).diff().fillna(0).ne(0)).cumsum())# Группировка данных напряжения по знаку
extrem_c = grp_c['Current'].apply(lambda x: x.abs().max() * np.sign(x[x.abs().idxmax()])) # Находим точки экстремума
extrem_v = grp_v['Voltage'].apply(lambda x: x.abs().max() * np.sign(x[x.abs().idxmax()])) # Находим точки экстремума

```

Рис. 11. Код Python для нахождения экстремумов.

Используя полученные значения величин в нужный момент времени определим напряжение возникновения дуги, критическое сопротивление дуги, рассеиваемую мощность и постоянную времени.

Расчет мощности дугового процесса производится для каждой точки в интервале горения дуги, что позволяет определить как максимальную выделяемую мощность, так и среднеквадратичную на всё время горения дуги.

Расчет критического сопротивления производится в момент гашения дуги согласно закону Ома.

$$R = \frac{U}{I} \quad (1)$$

Расчет постоянной времени производится по формуле, представленной О.Майером:

$$\theta = \frac{1}{R} * \frac{dR}{dt} \quad (2)$$

Знание постоянной времени дуги позволяет наилучшим образом проанализировать процесс повторного зажигания электрической дуги [5]. Для анализа этих процессов и дальнейшего поведения дуги имеется математическая модель, которая учитывает электрические и тепловые процессы, влияющие на поведение электрической дуги.

После обработки ряда экспериментов накапливается большое количество данных. Для общей оценки результатов обработки выполним статистический анализ нормального Гауссовского распределения. Программный комплекс позволяет выполнить такой анализ и построить гистограммы распределений. Программный модуль Charts.py позволяет построить и сохранить на диск гистограммы распределений. Пример такой гистограммы показан на рисунке 12.

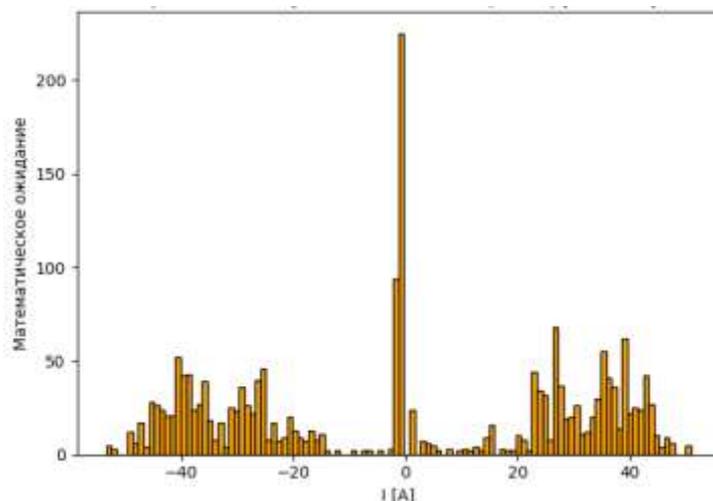


Рис. 12. Гистограмма распределения тока

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Благинин, В. А. Профилактика аварийности отечественного рыбопромыслового флота / В. А. Благинин, И. Е. Кажекин // Безопасность жизнедеятельности. – 2010. – № 3(111). – С. 40-47. – EDN LATGDZ.
2. Гончаренко В.С., Чечетина Т.А., Сибирко В.И., Мартемьянов С.И., Надточий О.В. (ФГБУ ВНИИПО МЧС России). Пожары и пожарная безопасность в 2021 году: статист. сб. Балашиха.: – М.: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2022. 114 с.
3. Таев И.С. Электрическая дуга в аппаратах низкого напряжения. – М.Л.: Энергия, 1965. 219 с.
4. Орельен Ж. Прикладное машинное обучение с помощью Scikit-Learn, Keras и TensorFlow: концепции, инструменты и техники для создания интеллектуальных систем. – М.: Диалектика-Вильямс, 2020. – 1040 с.
5. Вандер П. Дж Python для сложных задач: наука о данных и машинное обучение. СПб.: Питер, 2022. – 576 с.
6. Бослаф С. Статистика для всех. - М.: ДМК Пресс, 2017 – 586 с.

SOFTWARE COMPLEX FOR PROCESSING RESULTS REGISTRATION OF ARC PROCESSES

¹Zhizhechkin Yuri Alekseevich, graduate student

¹Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,
e-mail: y.zhizhechkin@shipyard-yantar.ru

The paper discusses a software method for analyzing arc processes using current and voltage signals in the circuit. The use of algorithms from the SciPy, Numpy and Pandas libraries for processing experimental data is considered. A comparison of the experimentally obtained signals with the mathematical model of arc processes by O. Mayer was carried out. A comparison was made between manual processing and machine processing of arc process signals. The work was carried out with the financial support of the Federal Fisheries Agency (contract No. 122030900054-0).

УДК 621.31

РАЗРАБОТКА КОМПОНОВОЧНЫХ РЕШЕНИЙ МОДУЛЬНОЙ ПЛАВУЧЕЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ НА ОСНОВЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАНЕЛЕЙ

¹Зубавичюс Роман Виргиневич, студент магистратуры кафедры энергетики;

²Харитонов Максим Сергеевич, канд. техн. наук, доцент кафедры энергетики

^{1,2}Калининградский государственный технический университет,
Калининград, Россия, e-mail: zubavichus.rv@yandex.ru

Рассмотрен вопрос расчета параметров плавучих модулей для размещения фотоэлектрических электростанций на поверхности водоемов. С учетом условий инсоляции, оптимального угла наклона и габаритных размеров фотоэлектрических панелей обоснованы требования к взаимному расположению панелей для исключения затенения. Предложен подход к определению оптимальных размеров плавучего модуля и определена конфигурация оборудования, обладающая наилучшими удельными показателями по производству электроэнергии.

Возобновляемая энергетика активно развивается как по пути создания крупных электростанций, так и в формате систем распределенной генерации. При этом активно используются фотоэлектрические панели (ФЭП) по причине малых габаритов, удобства монтажа и простоты эксплуатации.

Однако ввиду особенностей фотоэлектрического преобразования солнечной энергии мощность солнечных электростанций пропорциональна занимаемым территориям, что является ограничительным фактором для внедрения данного типа установок на объектах, не располагающих свободными площадями. В качестве решения данной проблемы широко используется способ размещения ФЭП на кровельных конструкциях.

Однако на объектах морской индустрии существенная часть площадей может приходиться на акватории водоемов, что требует иного подхода к размещению панелей. Существующие на сегодняшний день решения в области плавучей генерации, главным образом, находятся на стадии концепт-проектов, опытных образцов, либо представлены индивидуальными установками, выполненными под нужды конкретного объекта, без явных перспектив масштабирования и возможности автономной работы в отрыве от береговых сетей.

С учетом вышесказанного? актуальной является задача разработки модульной плавучей электростанции на основе фотоэлектрических панелей для нужд объектов морской индустрии и иных объектов, располагающих водоемами для размещения плавучей генерации.

Разрабатываемая электростанция состоит из плавучих модулей гексагональной формы, на которых размещаются ФЭП. Разработка компоновочных решений заключается в выборе типа ФЭП, их количества, угла наклона и способа размещения. Принятое компоновочное решение определяет габаритные размеры плавучего модуля и мощность установленных ФЭП. Данное исследование проводится при поддержке Фонда содействия инновациям по договору №17925ГУ/2022.

Согласно обзорному исследованию существующих технологий фотовольтаики [1], монокристаллические кремниевые солнечные элементы являются более предпочтительными при реализации коммерческих проектов, поскольку имеют высокий коэффициент полезного действия и длительный срок эксплуатации.

С учетом обзора предложений российского рынка ФЭП [2], в качестве основного генерирующего оборудования разрабатываемой плавучей электростанции выбраны гетероструктурные панели HVL-395/HJT производства российской компании «Хевел» [3]. Номинальная мощность панели 395 Вт. Массогабаритные показатели, принятые при разработке компоновочных решений: масса – 32кг, длина – 1995 мм, ширина – 1002мм, толщина – 30 мм.

Определение оптимального угла наклона фотоэлектрических панелей

Оптимальный угол наклона ФЭП – это угол, при котором плоскость панели перпендикулярна направлению падения солнечных лучей и достигается максимально возможная генерация энергии. Ввиду непрерывного изменения положения Солнца для достижения максимальной эффективности солнечной генерации, необходимо постоянное изменения угла наклона ФЭП, что может обеспечиваться установкой специальных механических систем – трекеров. Применительно к разрабатываемой солнечной электростанции использование трекеров приведет к значительному повышению себестоимости производимой электроэнергии, снизит надежность системы и увеличит электропотребление электроустановки на собственные нужды.

В случаях, когда установка трекерных систем нецелесообразна, фотоэлектрическую систему выполняют стационарной – с фиксированным оптимальным углом наклона солнечных панелей. Величина этого угла зависит от широты местности, где расположена солнечная электростанция. Соответствующие определенным районам мира значения среднегодовых оптимальных углов наклона солнечных панелей можно получить из базы данных [4].

С целью определения пространственного положения панелей выполнен анализ оптимальных углов наклона фотоэлектрического модуля и расчет годовой выработки одного модуля HVL-395/HJT при различных углах наклона для различных регионов Российской Федерации по данным [4, 5]. Согласно результатам расчетов величина среднегодового оптимального угла наклона для различных регионов отличается и находится в диапазоне от 32 до 50 градусов.

Угол наклона ФЭП зависит от района расположения солнечной электростанции и определяет длину взаимно затеняемой панелями области, а следовательно, и интервалы между рядами ФЭП. Как показано на рис. 1, угол наклона панели α при угле падения солнечных лучей β создает затенение в области длиной L .

Для определения примерной длины тени L и, следовательно, интервала между панелями, можно воспользоваться следующей формулой:

$$L \approx 3h = 3l \cdot \sin\alpha \quad (1)$$

где h – высота панели при угле наклона α ;

l – ширина солнечного модуля.

Более точный способ расчета представлен в работе [6] и использует простейшие тригонометрические соотношения. Длина тени в этом случае вычисляется следующим образом:

$$L = l \cdot (\cos\alpha + \sin\alpha \cdot \operatorname{ctg}\beta) \quad (2)$$

В таблице 2 приведены рассчитанные по формулам (1), (2) и с помощью непосредственных геометрических построений значения длины тени солнечной панели шириной 1,002 м, расположенной под углом 38° при различных значениях угла β .

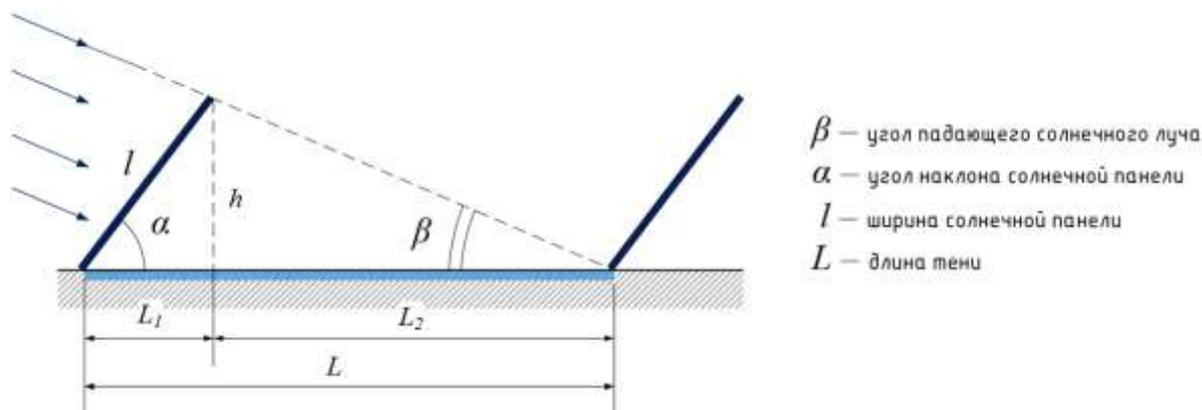


Рис. 1. Затенение фотоэлектрических панелей при совместной установке

Таблица 1

Параметры затенения панелей при различных методах расчета

Метод расчета	Длина тени L при значении угла β , м					
	30°	40°	50°	60°	70°	80°
формула (3.1)	1,851					
формула (3.2)	1,858	1,525	1,307	1,146	1,014	0,898
геометрические построения	1,881	1,532	1,308	1,146	1,014	0,898

Анализ данных таблицы 1 показывает, что расчет длины затенения по формуле (1) является наименее предпочтительным, так как при угле падения солнечных лучей более 30° результаты расчетов значительно отличаются от результатов других методов. Несмотря на то, что формула (2) не учитывает толщину ФЭП и соответствующие результаты расчета отличаются от результатов геометрических построений, данный метод принят в качестве основного при проведении дальнейших расчетов по причине удобства использования. Для расчета угла наклона выбраны условия, соответствующие территории Калининградской области.

Оптимальный среднегодовой угол наклона ФЭП для Калининградской области составляет 38° . На рис. 2 показаны месячные величины выработки одной ФЭП NVL-395/НТ. Таким образом, наибольшая выработка модуля выпадает на май и составляет около 58 кВтч, а минимальная выработка величиной 9 кВтч соответствует декабрю.

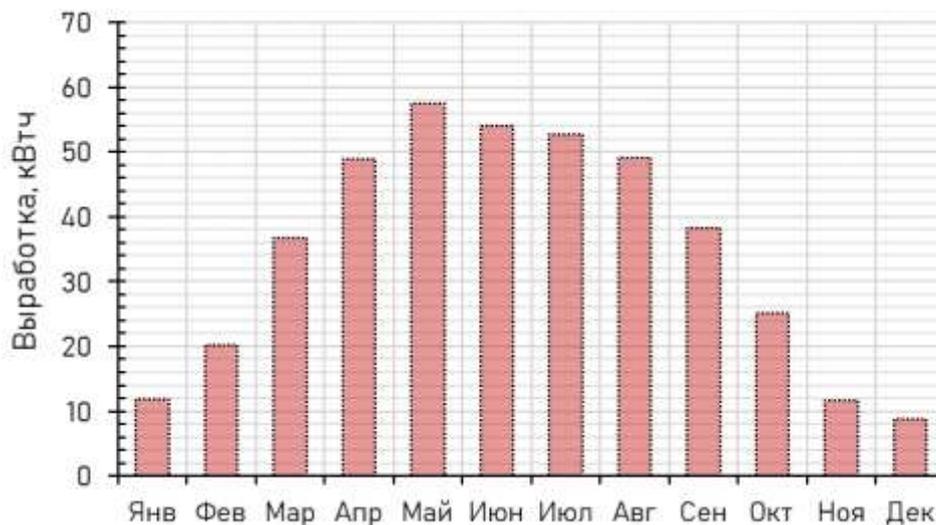


Рис. 2. Величины выработки модуля HVL-395/HJT при угле наклона 38 градусов

Определение оптимального числа фотоэлектрических панелей

Для завершающего выбора числа ФЭП и соответствующей площади занимаемой ими поверхности необходимо решение оптимизационной задачи. Согласно [7], в последующих расчетах значение угла падения солнечных лучей β принимается равным 20 градусам, что соответствует зимнему времени и наибольшей длине затенения. Длина затеняемой области определяется по формуле (2) для угла наклона солнечного модуля, равного 38 градусам составляет 2,48 м. Тогда длина проекции L_1 (рис. 1) ФЭП на поверхность и значение интервала L_2 между проекциями солнечных модулей составляет равны соответственно 0,79 м и 1,69 м.

С учетом требований к взаимному расположению панелей на основе геометрических построений проведен расчет числа ФЭП, которые можно разместить на гексагональной поверхности заданной площади с учетом интервала. По результатам расчета получен (рис. 3) ступенчатый график зависимости между площадью гексагональной поверхности и числом размещаемых на поверхности ФЭП.

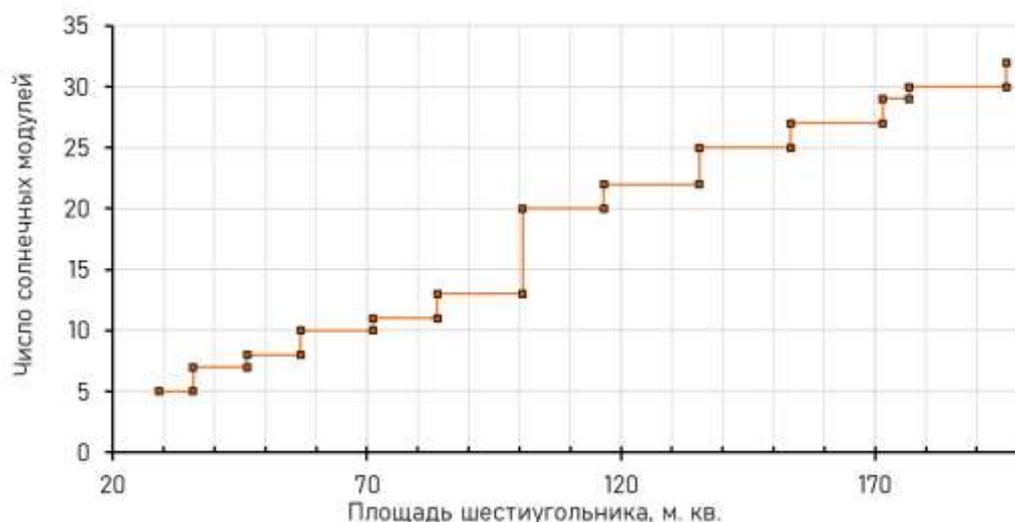


Рис. 3. График зависимости числа ФЭП от площади гексагональной поверхности

Как следует из диаграммы (рис. 3), изменение числа ФЭП с увеличением площади поверхности не является равномерным и не имеет явной закономерности. При этом, с ростом числа ФЭП плавучего модуля, пропорционально увеличивается установленная мощность генерации и суммарная годовая выработка (рис. 4).

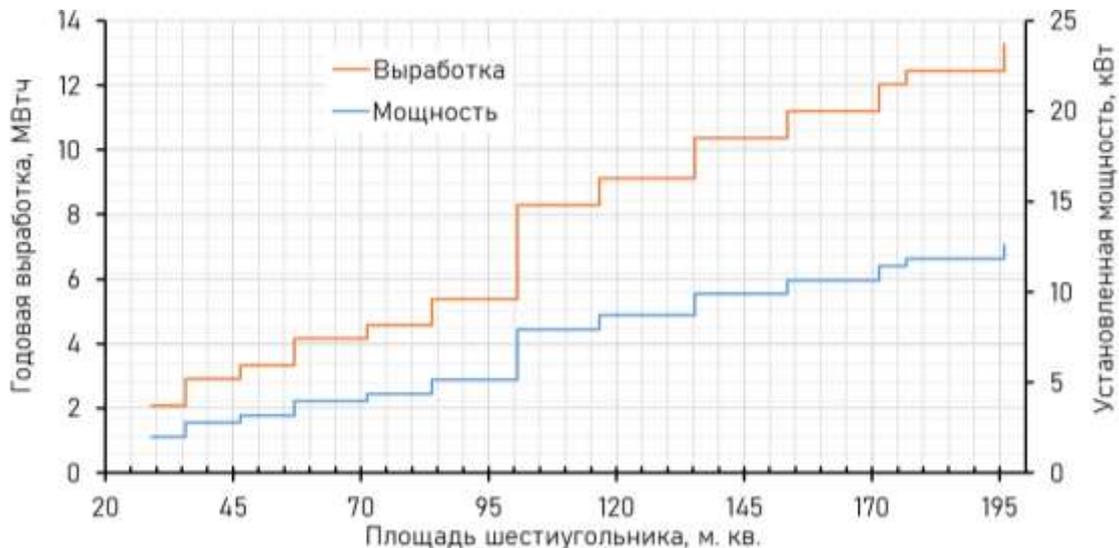


Рис. 4. График зависимости суммарной годовой выработки и мощности генерации от площади гексагональной поверхности

Стоит отметить, что, с увеличением площади гексагональной поверхности, растет и совокупная стоимость функционального модуля. Для окончательного выбора оптимального числа ФЭП и площади модуля введены коэффициенты удельной выработки и удельной стоимости.

Коэффициент удельной выработки показывает величину выработки на единицу площади и вычисляется как отношение суммарной годовой выработки модуля W , кВтч, заданной площади гексагональной поверхности S , м², по выражению:

$$k_W = \frac{W}{S} \quad (3)$$

Коэффициент удельной стоимости k_C , тыс. руб./кВтч, вычисляется по формуле (4). Стоимость ФЭП принята согласно коммерческому предложению производителя [3]. При этом удельная стоимость одного квадратного метра поверхности задается условно, так как не влияет на характер изменения функции $k_C(S)$.

$$k_C = \frac{n \cdot C_M + S \cdot C_S}{W} \quad (4)$$

где n – число ФЭП;

$C_M = 27,49$ тыс. руб. – стоимость ФЭП HVL-395/НЛТ;

$C_S = 10,00$ тыс. руб./м² – удельная стоимость поверхности.

Описанные выше коэффициенты рассчитаны для значений площади гексагональной поверхности, а затем представлены в виде графика (рис. 5). Из графика видно, что характер изменения коэффициентов имеет пилообразную форму. При этом максимальная величина коэффициента удельной выработки 82,39 кВтч/м² и минимальное значение коэффициента удельной стоимости 187,67 тыс. руб./кВтч соответствуют значению площади, равному 100,64 м². Данное значение площади является минимально достаточным для размещения двадцати ФЭП. На основе оптимальных значений коэффициентов была принята конфигурация плавучего модуля, характеристики которой представлены в таблице 2.

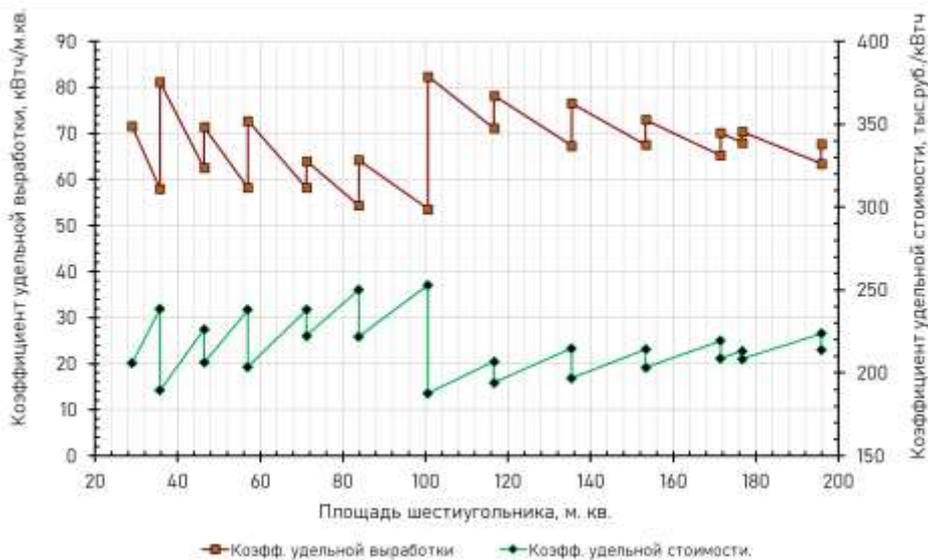


Рис. 5. График зависимости коэффициентов удельной годовой выработки и удельной стоимости от площади шестиугольной поверхности

Таблица 2

Конфигурация модульной плавучей электростанции

Параметр	Значение
Число фотоэлектрических панелей HVL-395/HJT	20
Установленная мощность фотоэлектрических панелей	7,9 кВт
Угол наклона фотоэлектрических панелей	38°
Минимальная площадь шестиугольной поверхности, м ²	100,64 м ²
Число рядов фотоэлектрических панелей	5
Интервал между рядами	1,694 м

Оптимальное разделение фотоэлектрических панелей на группы

Ввиду разделения ФЭП на две группы из соображений надежности и особенностей используемого оборудования, выполнено обоснование такого способа разделения, при котором электрическое соединение ФЭП будет наиболее эффективным. В рассматриваемом случае, в качестве наиболее эффективного соединения рассматривается вариант, при котором расстояния от центров генерации обеих групп до граней гексагональной поверхности будут минимальными.

Для расчета центров генерации были сформированы возможные варианты распределения ФЭП по группам, которые с цветовым выделением групп представлены на рис. 6.

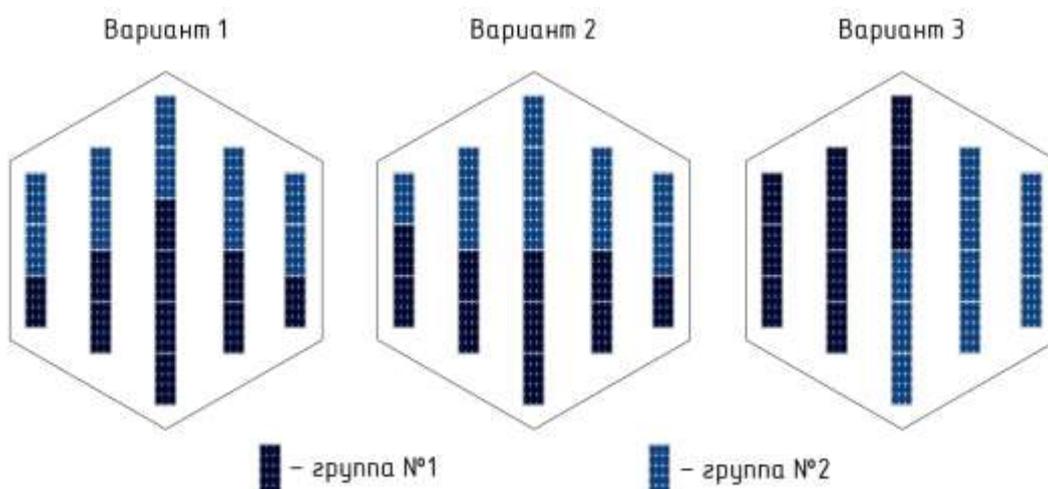


Рис. 6. Варианты распределения фотоэлектрических панелей по группам

Расчет координат центров генерации группы ФЭП производится по формулам (5) и (6) соответственно. На рис. 7 показано расположение центров генерации групп солнечных модулей для сформированных вариантов.

$$X_0 = \frac{P_{\text{СМ}} \sum x_i}{n \cdot P_{\text{СМ}}} \quad (5)$$

$$Y_0 = \frac{P_{\text{СМ}} \sum y_i}{n \cdot P_{\text{СМ}}} \quad (6)$$

где $P_{\text{СМ}}$ – мощность одной ФЭП;
 x_i, y_i – координаты центра i -той ФЭП;
 $n = 10$ – число ФЭП в группе.

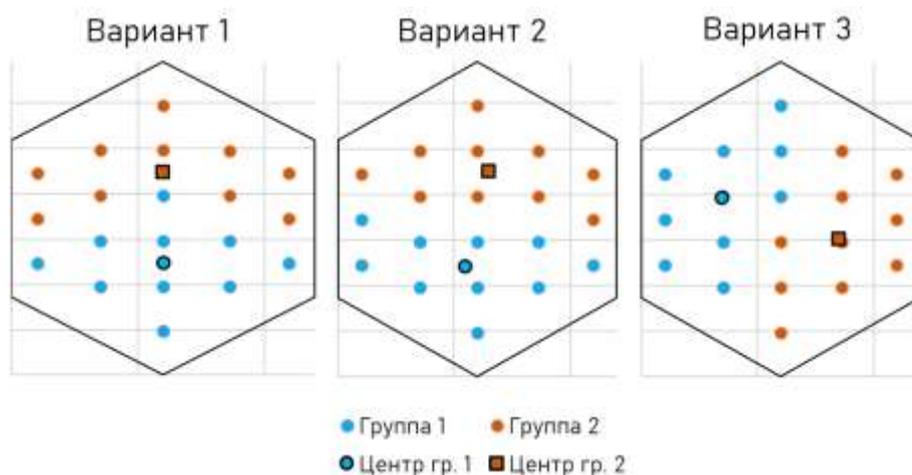


Рис. 7. Результаты расчета центров генерации групп фотоэлектрических панелей

Из графических построений (рис. 7) следует, что наименьшее максимальное расстояние от центров генерации групп панелей до вершин шестиугольника достигается при первом варианте распределения ФЭП по группам. Выбор этого варианта компоновки обусловлен, в первую очередь, возможностью электрического соединения нескольких плавучих модулей через любое из ребер гексагональной поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ahmad L. et al. Recent advances and applications of solar photovoltaics and thermal technologies //Energy. – 2020. – Т. 207. – С. 118254.
2. Дебрин А. С., Бастрон А. В., Урсегов В. Н. Обзор солнечных панелей и фотоэлектрических станций отечественных производителей //Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2018. – №. 6 (141). – С. 136-141.
3. Солнечный модуль HVL-395/HJT [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.hevelsolar.com/catalog/solnechnye-moduli/modul-fotoelektricheskii-hvl-395hjt/> (Дата обращения: 12.06.2023)
4. World - Optimum Tilt to Maximize Yearly Yield (OPTA) GIS Data, (Global Solar Atlas) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://energydata.info/dataset/world-optimum-tilt-maximize-yearly-yield-opta-gis-data-global-solar-atlas> (Дата обращения: 14.06.2023)
5. Global Solar Atlas [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://globalsolaratlas.info/map> (Дата обращения: 17.07.2023)
6. D. Passias, B. Källbäck. Shading effects in rows of solar cell panels. Sol. Cell., 11(1984), pp. 281-291
7. Значение солнечной инсоляции в г. Калининград [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.betaenergy.ru/insolation/kaliningrad/> (Дата обращения: 25.02.2023)

DEVELOPMENT OF LAYOUT SOLUTIONS FOR A MODULAR FLOATING POWER PLANT BASED ON PHOTOVOLTAIC PANELS

¹Zubavichius Roman, master student of the Department of Energy;

²Kharitonov Maxim, Dr.-Ing., Associate Professor of the Department of Energy

^{1,2}Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia, e-mail: zubavichus.rv@yandex.ru

The article considers the issue of calculating the parameters of floating modules for placing photovoltaic power plants on the surface of water bodies. Taking into account the conditions of insolation, the optimal angle of inclination and overall dimensions of photovoltaic panels, the requirements for the mutual arrangement of panels to exclude shading are substantiated. An approach is proposed to determine the optimal dimensions of the floating module and the equipment configuration is determined, which has the best specific indicators for the production of electricity.

УДК 621.3.064

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДУГОВЫХ И ИСКРОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЯХ В НИЗКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРОСЕТЯХ С КОМПЕНСИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

¹Кажекин Илья Евгеньевич, канд. техн. наук, доцент кафедры энергетики

¹Калининградский государственный технический университет,
Калининград, Россия, e-mail: kazhekin@mail.ru

Описаны результаты исследований дуговых процессов при однофазных замыканиях в электросетях с компенсированной нейтралью напряжением 380 В. Показано влияние степени расстройки реактора на такие характеристики дуговых процессов как интенсивность разрядов, мощность, подводимая к разряду. Продемонстрирована способность повысить безопасность низковольтных электросетей путем поддержания точной настройки заземляющего нейтраль реактора в резонанс с фазной емкостью. Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального агентства по рыболовству (контракт № 122030900054-0).

Замыкание одной фазы на корпус является наиболее распространенным видом повреждения судового электрооборудования. Такие замыкания не отключаются защитой и могут существовать длительное время до выявления места повреждения. Время, затрачиваемое на поиск и устранение однофазного замыкания, может достигать нескольких суток. Традиционно безопасность низковольтных судовых электросетей при однофазных замыканиях обеспечивается за счет защитного заземления металлических корпусов оборудования; непрерывного контроля состояния изоляции; режима изолированной нейтрали. Несмотря на эти мероприятия, длительное существование замыкания может привести к развитию повреждения оборудования в более опасные последствия, такие как взрыв, возгорание и т.д.

Известно два основных пути снижения тяжести последствий однофазных замыканий: уменьшение длительности его существования; уменьшение амплитуды протекающего тока замыкания. Первый путь требует отключения поврежденного участка электросети, что может быть связано с нарушением электроснабжения потребителей. Поэтому применение такого подхода в судовых условиях ограничено. Второй способ позволяет повысить безопасность электросети за счет снижения тока в месте замыкания. Это не требует отключения поврежденного электрооборудования. Как правило, принцип действия, реализующих этот способ устройств, основывается на заземлении нейтрали через реактор. Такое техническое решение широко применяется в береговых электросетях.

тросетях средних классов напряжения [1]. Для низковольтных судовых электроустановок этот подход практически не используется, несмотря на то, что формально возможность его применения существует [2].

Выбор способа заземления нейтрали носит комплексный характер [3], поскольку затрагивает множество факторов. В литературе достаточно подробно описывается влияние перевода электросетей в режим компенсированной нейтрали на ток глухого однофазного замыкания [4], включая его действие на дуговые процессы в сетях средних классов напряжения [5], на перенапряжения в электросетях [6-8]. Однако, остается открытым вопрос оценки эффективности повышения безопасности низковольтных электросетей в режиме дугового замыкания фазы путем заземления их нейтралей через реакторы.

В работе представлены результаты экспериментальных исследований дуговых процессов при однофазных повреждениях кабельной изоляции при различных степенях отклонения реактора от резонансной настройки с фазной емкостью электрической сети.

Описание методики исследования

Исследования проводились на физической модели, схема которой представлена рисунке 1.

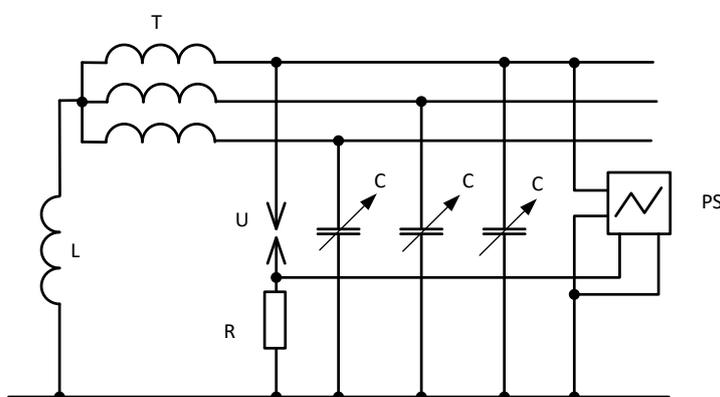


Рис. 2. Схема экспериментальной установки
L – реактор, *T* – вторичные обмотки трансформатора, *U* – разрядный промежуток,
R – измерительный шунт, *C* – емкость, *PS* – осциллограф.

В качестве реактора использована катушка индуктивности, настроенная в резонанс с фазной емкостью электросети 8 мкФ. V-образная характеристика такого реактора в сети напряжением 380 В представлена на рисунке 2.

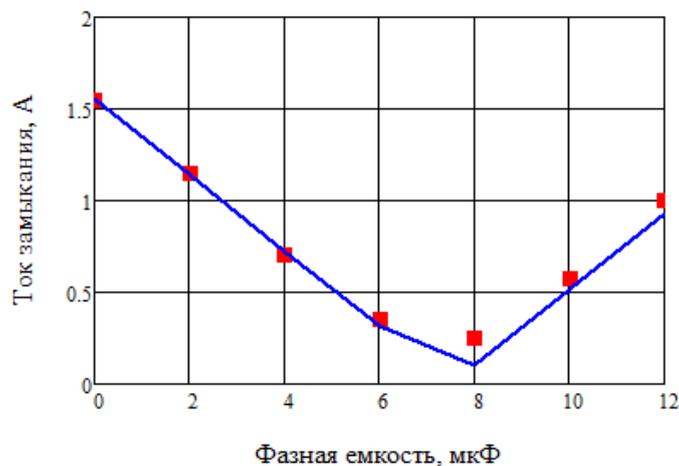


Рис. 2. V-образная характеристика дугогасящего реактора

Первичные обмотки трансформатора Т подключены к трехфазному ЛАТРу, позволяющему варьировать напряжение установки. Предварительные эксперименты показали, что на напряжении 220 В дуговые процессы в электросети с компенсированной нейтралью практически отсутствуют, поэтому все регистрации процессов осуществлялись на наиболее распространенном напряжении в судовых электроустановках 380 В.

В [9] представлены результаты регистрации параметров заземляющей дуги в низковольтных электроустановках, полученные при ее возникновении в воздухе. В большинстве случаев замыкания возникают при повреждении кабеля. Поэтому в качестве разрядного промежутка использован участок кабеля с искусственно поврежденной изоляцией.

Фазная емкость электросети варьировалась в диапазоне от 0 до 12мкФ, что значительно превосходит степени расстройки, ограничиваемые нормативными документами для сетей средних классов напряжения [10]. При этом для облегчения условий возбуждения дуговых процессов емкость поврежденной фазы всегда задавалась нулевой. Регистрация осуществлялась при помощи осциллографа с возможностью сохранения осциллограмм в виде файлов формата .CSV, что позволило проводить их дальнейшую обработку и расчет параметров, характеризующих дуговые процессы.

Примеры зарегистрированных осциллограмм тока и напряжения дуги представлены на рисунке 3.

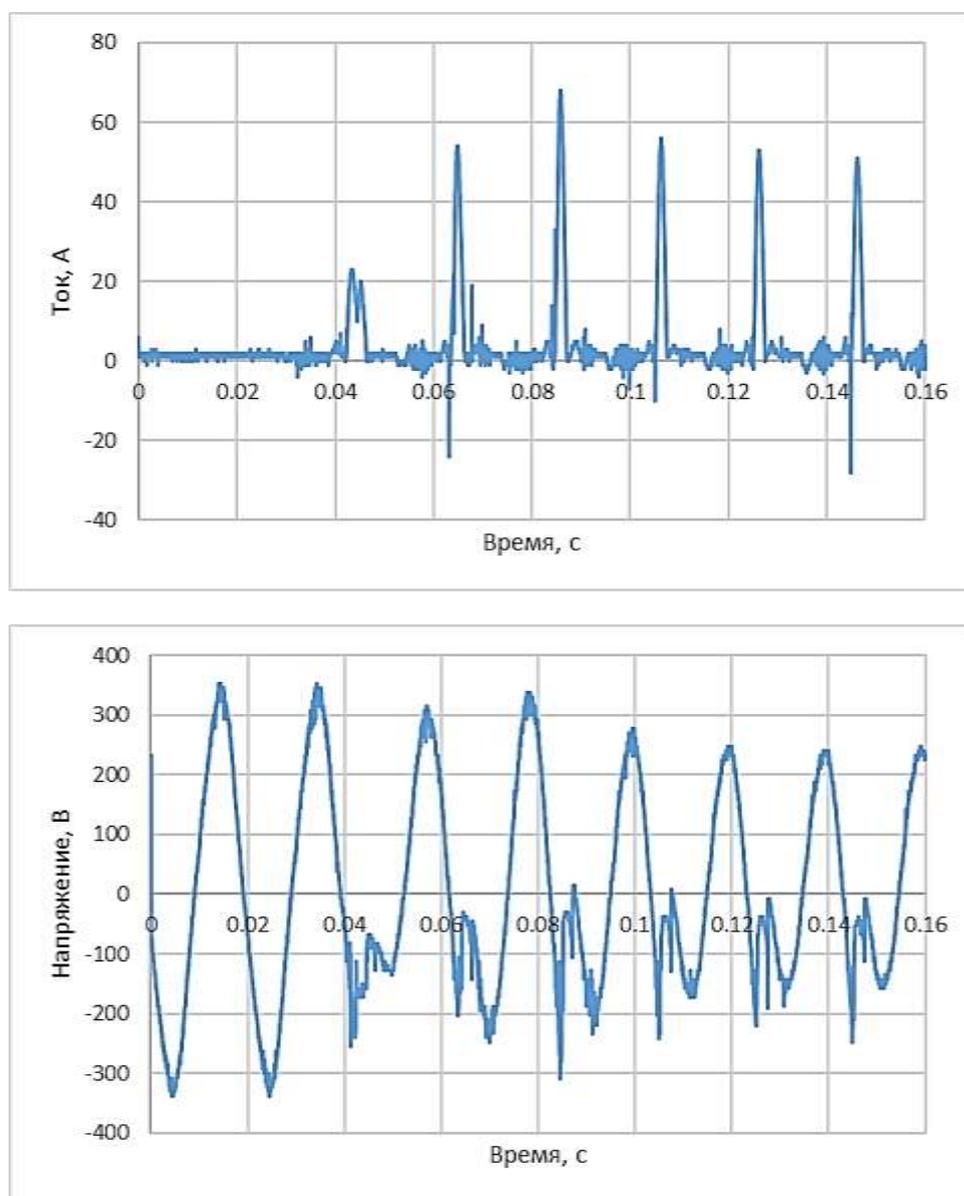


Рис. 3. Осциллограммы тока дуги и напряжения на поврежденной фазе при неустойчивом однофазном замыкании

Разряды, возникающие при однофазных замыканиях, характеризовались двумя показателями: интенсивностью и максимальной мощностью тепловыделений. Под первым показателем обычно понимается величина, связанная с длительностью разрядов, например [11]. Однако, как видно из рисунка 3 дуговые процессы имеют неустойчивый характер и длительность одного дугового разряда ограничивается полупериодом свободной составляющей тока замыкания. Поэтому более информативным выглядит характеристика интенсивности разрядов величиной частоты их возникновения. В проводимом исследовании использована величина, равная среднему количеству разрядов зарегистрированных за несколько осциллограмм. Количество учитываемых осциллограмм, промежутков регистрируемого времени и условия протекания разрядов не изменялись с переходом от одного значения фазной емкости к другому. Мощность дуги оценивалась как произведение ее тока на напряжение.

Результаты экспериментальных исследований

Как видно из рисунка 3, разряды не всегда имели дуговой характер. Результаты подсчетов их интенсивности приведены на рисунках 4 и 5. При этом отдельно выделена интенсивность дуговых разрядов.

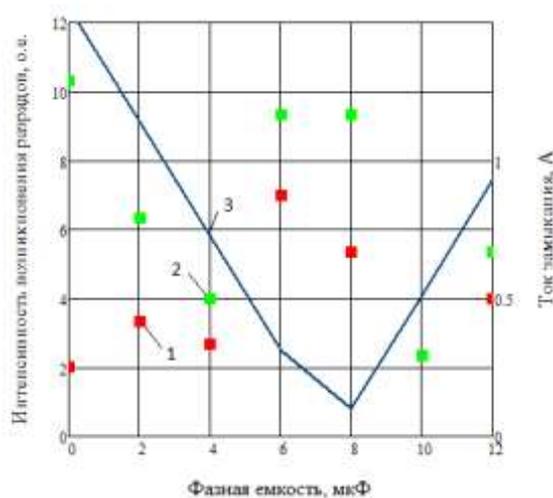


Рис. 4. Влияние фазной емкости и тока замыкания на интенсивность разрядов между фазой и корпусом судна
1 — интенсивность дуговых разрядов; 2 — интенсивность всех разрядов;
3 — ток глухого однофазного замыкания

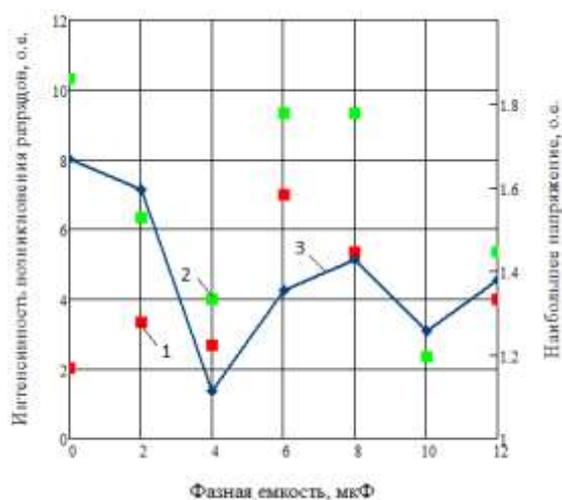


Рис. 5. Влияние фазной емкости и наибольшего напряжения поврежденной фазы на интенсивность разрядов между фазой и корпусом судна
1 — интенсивность дуговых разрядов; 2 — интенсивность всех разрядов;
3 — наибольшее напряжение поврежденной фазы

Как видно из рисунков 4 и 5 влияние на интенсивность разрядов таких факторов как ток глухого однофазного замыкания и наибольшее напряжение поврежденной фазы, которое регистрировалось в процессе эксперимента, не очевидно. Оценка взаимосвязи исследуемых величин проведена по коэффициенту корреляции Пирсона:

$$r_{xy} = \frac{\sum_i x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sqrt{\sum_i x_i^2 - n \bar{x}^2} \sqrt{\sum_i y_i^2 - n \bar{y}^2}} \quad (1)$$

где x_i , y_i – данные сопоставляемых переменных; \bar{x} , \bar{y} – их средние значения; n – размер выборки. Результаты расчетов коэффициента приведен в таблице 1.

Таблица 1

Оценка влияния факторов на интенсивность разрядов

Сопоставляемые данные	Значения коэффициента корреляции Пирсона
Интенсивности дуговых разрядов и всех разряды	0,465
Интенсивность дуговых разрядов и ток металлического замыкания	-0,66
Интенсивность всех разрядов и ток металлического замыкания	0,114
Интенсивность дуговых разрядов и наибольшее напряжение поврежденной фазы	-0,07
Интенсивность всех разрядов и наибольшее напряжение поврежденной фазы	0,658

Как видно из таблицы 1 заметная связь имеется между током и дуговыми разрядами, а также между наибольшим напряжением поврежденной фазы и общим количеством всех разрядов. Влияние этих факторов на максимальную мгновенную мощность, выделяющуюся при разряде продемонстрировано на рисунке 6.

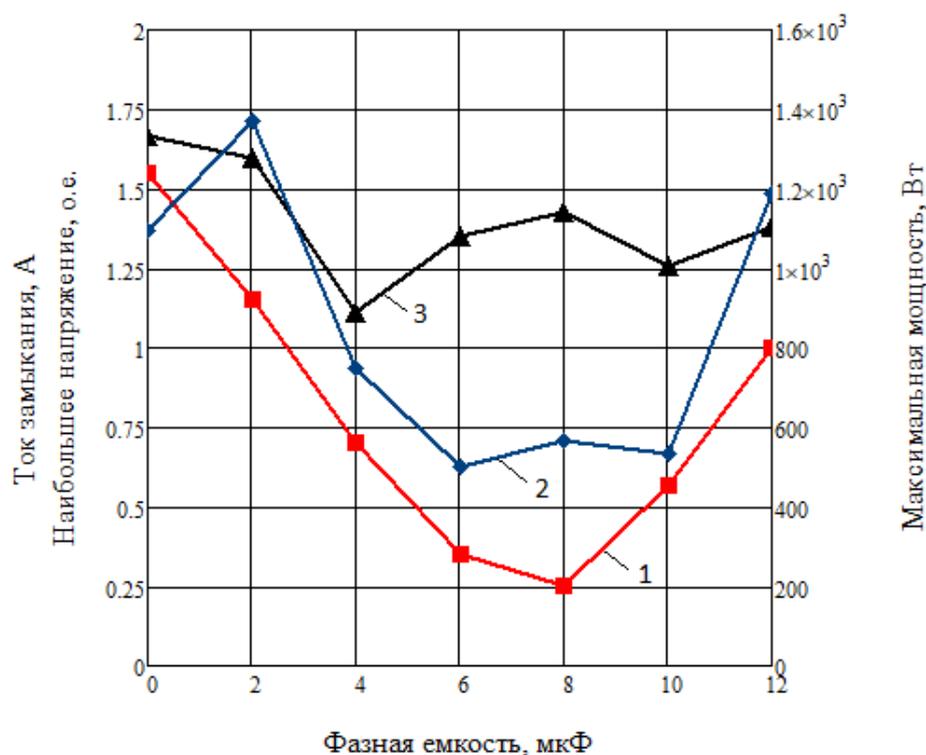


Рис. 6. Влияние факторов на максимальную мощность разряда
 1 – ток глухого однофазного замыкания; 2 – максимальная мгновенная мощность разряда;
 3 – наибольшее напряжение поврежденной фазы

Оценка влияния факторов на мощность тепловыделений при разрядах

Факторы	Значения коэффициента корреляции Пирсона
Ток глухого однофазного замыкания	0,839
Наибольшее напряжения поврежденной фазы	0,035

Как видно из таблицы 1 наибольшая связь мощности разряда имеется с величиной тока глухого однофазного замыкания.

Выводы

Проведенные исследования подтвердили, что опасность дуговых процессов при однофазных замыканиях в низковольтных электросетях может быть значительно снижена путем их перевода в режим компенсированной нейтрали.

Оценка влияния различных факторов на интенсивность и мощность разрядов показала необходимость точной настройки заземляющего реактора для обеспечения безопасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. XI. Электрическое оборудование. - СанктПетербург: Российский морской регистр судоходства, 2016. - 130 с.
2. Правила устройства электроустановок : по состоянию на 1 мая 2005 г. / утв. М-вом энергетики Рос. Федерации от 8 июля 2002г. № 204, введ. в действие с 1 янв. 2003 г.. – 7-е изд., изм. и доп.. – Новосибирск : Сиб. университет. изд-во, 2005.
3. Кажекин, И. Е. Определение требований к защите судовых электроэнергетических систем от однофазных замыканий / И. Е. Кажекин // Электрика. – 2011. – № 3. – С. 35-38.
4. Ахрюков, М. Н. Режимы заземления нейтрали в сетях среднего напряжения: отечественная и зарубежная практика / М. Н. Ахрюков, С. О. Фатьянов, А. С. Терентьев // Global science. Development and novelty : Collection of scientific papers on materials VII International Scientific Conference, Madrid, 28 февраля 2018 года. Том Part 1. – Madrid: Научно-издательский центр "Л-Журнал", 2018. – С. 62-66. – DOI 10.18411/gdsn-28-02-2018-16.
5. Fuchs E., Fickert L. The self-extinguishing current limit and the arc-burning time of compensated 20-kV-power-grids //2012Electric Power Quality and Supply Reliability. – IEEE, 2012. – С. 1-6.
6. 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.
7. Бохан, А. Н. Снижение перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в сетях 6-10 КВ / А. Н. Бохан, В. В. Кротенок // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. – 2004. – № 1. – С. 47-55.
8. Кажекин И.Е. Управление феррорезонансным контуром в низковольтных судовых электросетях с компенсированной нейтралью/И.Е. Кажекин// Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4-3 (58). С. 59-64.
9. Кажекин И.Е. Описание процессов при дуговых однофазных замыканиях в низковольтных судовых электросетях с компенсированной нейтралью. Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 4-4 (46). С. 83-87.
10. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации : приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 19 июня 2003 г. № 229 "Об утверждении Правил технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации". – Москва : Омега-Л, 2012.

11. Алексеев, В. Ф. Зависимость интенсивности протекания электростатического разряда бесконтактного типа от параметров среды / В. Ф. Алексеев, В. В. Варфоломеев, Г. А. Пискун // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015. – Т. 3, № 7-1(18-1). – С. 58-61. – DOI 10.12737/14802.

RESULTS OF EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF ARC AND SPARK PROCESSES IN SINGLE-PHASE FAULT IN LOW-VOLTAGE POWER NETWORKS 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 describes the results of studies of arc processes during single-phase faults in electric networks with a compensated neutral voltage of 380 V. The influence of the degree of reactor detuning on such characteristics of arc processes as the intensity of discharges, the power supplied to the discharge is shown. The ability to improve the safety of low-voltage power networks by maintaining a fine tuning of the grounding neutral reactor in resonance with the phase capacitance has been demonstrated. The work was carried out with the financial support of the Federal Agency for Fisheries (contract no. 122030900054-0).

УДК 620.1.05

ОБЗОР ЛАБОРАТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ОБМОТОЧНЫХ ПРОВОДОВ

¹Липовцев Иван Станиславович, студент (группа 21-ЭЭ-2);

²Кажекин Илья Евгеньевич, канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергетика»

^{1,2}Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия, e-mail: ¹lipovtsev02@gmail.com; ²kazhekin@mail.ru

Значительная доля электрооборудования повреждается и выходит из строя из-за дефектов изоляции, часть этих дефектов возникает еще на стадии изготовления. В работе сделан обзор оборудования, необходимого для проведения испытаний изоляции в соответствии с требованиями ГОСТ IEC 60851-5-2017. Выявлено отсутствие на сегодняшний день предложений готовых комплексов испытательного оборудования, удовлетворяющих в полной степени требованиям этого стандарта.

Испытания изоляции являются частью её общей профилактики, обеспечивающей надёжную работу электрооборудования в процессе эксплуатации. В большинстве случаев эти дефекты не могут быть обнаружены в результате простого осмотра изоляции, поэтому для их выявления необходима определённая система испытаний. Испытания резко снижают аварии в энергетических системах из-за своевременного выявления дефектной изоляции.

Повреждения изоляции представляют собой основную причину выхода из строя электрооборудования. Например, по статистике для трансформаторов напряжением 110–500 кВ и мощностью 63 МВ×А и более на предприятиях электрических и межсистемных сетей России около 30% общего числа отключений оборудования связано с внутренними замыканиями [1]. Распределение причин повреждения силовых трансформаторов представлено на рисунке 1.

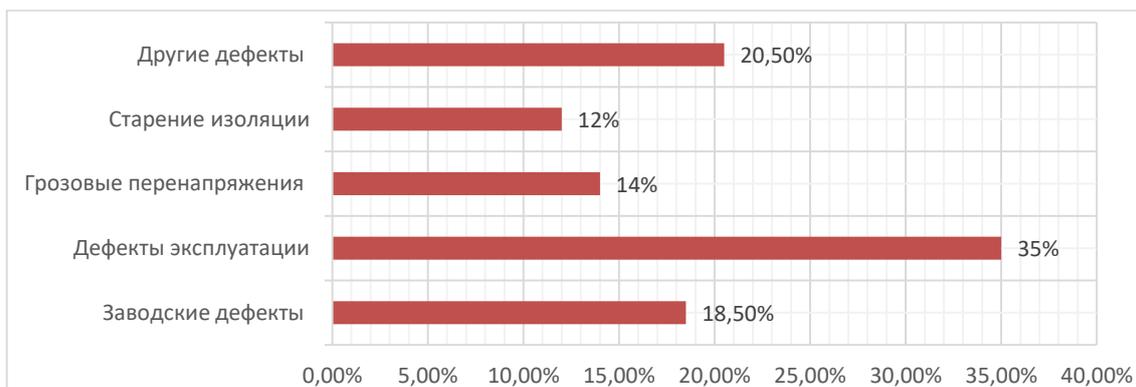


Рис. 1. Причины повреждений трансформаторов [2]

Из приведенной на рисунке 1 диаграммы следует, что значительная часть дефектов, возникает на стадии изготовления электрооборудования.

Дефекты изоляции играют большую роль и в аварийности измерительных трансформаторов. По данным [3] витковые замыкания, возникающие в том числе из-за дефектов изоляции, являются одним из наиболее частых видов повреждения измерительных трансформаторов тока, что может привести к отказу в функционировании устройств релейной защиты и автоматики. Выход из строя трансформаторов напряжения, установленных на электростанциях или подстанциях, опасен повреждениями соседнего оборудования, возможностью рассинхронизации генератора с сетью [4].

Из представленной на рисунке 2 диаграммы, отражающей статистику основных причин повреждений асинхронных двигателей, видно, что и для этого вида электрооборудования повреждения изоляции обмоток представляют собой основную причину неисправностей [5].



Рис. 2. Основные причины и источники возникновения и развития повреждений асинхронного двигателя [5]

Дефекты изоляции электрооборудования может привести к самым разным негативным последствиям от неисправности и выхода из строя самого электрооборудования до крупных аварий [6]. Одним из направлений решения этой проблемы является своевременное выявление дефектов изоляции обмоточных проводов электроустановки на стадии её изготовления. Цель статьи – провести анализ оборудования, необходимого для проведения данных испытаний согласно ГОСТ IEC 60851-5-2017.

Виды испытаний изоляции в соответствии с ГОСТ ИЕС 60851-5-2017

Стандарт устанавливает требования к методам испытаний обмоточных проводов для определения их электрических свойств. Стандартом предусмотрены несколько видов испытаний: определение электрического сопротивления провода, напряжения пробоя изоляции, числа её точечных повреждений, тангенса угла диэлектрических потерь, а также испытания по обнаружению микротрещин.

Сопротивление провода постоянному току измеряется при температуре 20 °С. Если измерение сопротивления R_t проводят при температуре t , отличной от 20 °С, то сопротивление R_{20} при температуре 20 °С определяют по формуле (1).

$$R_{20} = \frac{R_t}{1 + \alpha(t+20)}, \quad (1)$$

где α – температурный коэффициент, K^{-1} ;

t – фактическая температура во время измерения, °С.

Испытание на пробой осуществляется на переменном напряжении. В ходе испытания его повышают от нуля с постоянной скоростью. Целью данного испытания является определение максимального допустимого напряжения, которое рассматриваемая изоляция способна выдерживать.

Целостность изоляции определяется числом точечных повреждений на проводе определённой длины, зафиксированных электрическим испытательным устройством.

Для определения тангенса угла диэлектрических потерь испытания проводят на одном образце. В физическом смысле тангенс угла диэлектрических потерь характеризует потери энергии электрического поля, рассеиваемой в электроизоляционном материале.

Испытание по обнаружению микротрещин проводится с целью обнаружения дефектов изоляции после её выдержки в солевом растворе. В качестве результата данного испытания фиксируется число микротрещин, видимых при внешнем осмотре [7]. Основная информация о каждом из испытаний изоляции представлена в таблице 1.

Таблица 1

Виды испытаний изоляции и цели их проведения

Испытание изоляции	Определение Электрического сопротивления провода	Определение напряжения пробоя	Определение количества локальных повреждений	Определение тангенса угла диэлектрических потерь	Испытание по обнаружению микротрещин
Измеряемые величины	Электрического сопротивления при температуре 20 °С	Пробивное напряжение	Количество точечных повреждений изоляции	Электрическое сопротивление и ёмкость изоляции	Число микротрещин после его термохимической обработки
Цель проведения испытания	Установление соответствия электрического сопротивления провода заявленному производителем	Определение максимального напряжения, допустимого для изоляции	Оценка целостности изоляции	Оценка потерь энергии электрического поля, рассеиваемой в электроизоляционном материале	Оценка целостности изоляции

Требования к источникам подаваемого напряжения

Согласно стандарту для создания испытательных воздействий требуется трансформатор номинальной мощностью не менее 500 В·А. Кроме того, для данного испытания необходимо устройство фиксации пробоя, срабатывающее при прохождении тока 5 мА и более, а также устройство, обеспечивающее подъём испытательного напряжения с установленной постоянной скоростью [7]. Из известного оборудования для такого испытания стоит отметить приборы «РЕТОМ-6000», «УПУ-10М», которые способны выдавать выходное постоянное, а также синусоидальное напряжение до 6 кВ и 10 кВ соответственно. Микропроцессорное управление прибора позволяет зафиксировать на индикаторе

значения напряжения, тока утечки и времени подачи повышенного напряжения до момента пробоя, выбрать режим работы с мгновенным отключением при наступлении пробоя.

Для определения числа точечных повреждений при низком напряжении следует использовать реле со счётчиком. Счётчик должен срабатывать при сопротивлении изоляции провода только менее 10 кОм в течение не менее 0,04 с. Для определения числа точечных повреждений изоляции используется высоковольтный источник постоянного напряжения. Кроме того, необходимо устройство, предназначенное для выявления повреждений, которое срабатывает при токе, указанном в таблице 2 и имеет счётчик повреждений, обеспечивающий регистрацию с частотой (500 ± 25) повреждений в минуту при испытании провода без изоляции [7]. Однако на данный момент отечественном рынке отсутствуют подобные приборы, позволяющие провести такое испытание в отдельности.

Таблица 2

Ток срабатывания при точечных повреждениях при высоком напряжении для автономного режима

Испытательное напряжение постоянного тока, В	Ток срабатывания при повреждении, мкА	Испытательное напряжение постоянного тока, В	Ток срабатывания при повреждении, мкА
3000	16	1000	8
2500	14	750	7
2000	12	500	6
1500	10	350	5

Для определения угла диэлектрических потерь следует использовать измеритель импеданса, работающий на частоте, установленной в нормативном документе или технической документации на провод конкретного типа, а также генератор, имеющий на выходе синусоидальное напряжение соответствующей частотой [7]. Примером такого измерителя импеданса является прибор LCR-76002(измеритель импеданса прецизионный).

Требования к электромеханической части стендов

Помимо требований к источникам электрических сигналов, стандарт также определяет механическое оснащение стенда. В испытании пробивного напряжения к одному из концов закреплённого провода должно быть приложено определяемое номинальным диаметром жилы провода усилие, значение которого нужно контролировать, следовательно для данного испытания необходим динамометр. При этом так как силовое воздействие на конец провода сильно зависит от типа и номинального диаметра жилы исследуемого образца провода, динамометр должен обладать достаточно большим пределом измерения от 0 до 108 Н, однако поскольку измерительный прибор также должен фиксировать и довольно малые значения силовых воздействий с точностью до 0,001Н, разумным решением будет использовать в зависимости от параметров исследуемого образца провода два прибора – первый для проведения измерений усилий от 0 до 2Н, второй – для измерений от 2 до 108 Н. Первый прибор должен проводить прямые измерения в соответствии со стандартом с точностью до 0,001Н, этим требованиям удовлетворяет динамометр – МЕГЕОН 53002. Для измерений усилий от 2 до 108 Н необходимо использовать другой динамометр, способный проводить прямые измерения с точностью до 0,1Н. В качестве такого прибора можно использовать динамометр – МЕГЕОН 53500, способный проводить измерения силовых воздействий до 500 Н и обладающий разрешением 0,1Н, а также точностью $\pm 5\%$.

В испытании пробивного напряжения в зависимости от типа и номинального диаметра жилы провода должна быть подготовлена соответствующая установка, позволяющая зафиксировать образец провода в конкретном положении, а также оказывать на него определённое механическое воздействие. Провода с жилой номинальным диаметром до 0,1мм включительно должны быть намотаны одним витком на полированный металлический цилиндр диаметром (25 ± 1) мм, присоединённый к одному из выводов источника напряжения питания. После намотки провода на цилиндр к одному из его концов для более плотного прилегания следует приложить некоторое уси-

лие, контролируемое с помощью одного из вышеупомянутых динамометров. Для проведения испытания над образцами с номинальным диаметром жилы свыше 0,1 до 2,5 мм включительно следует использовать специальное механическое устройство, с использованием которого скручивают два отрезка провода на длине 125 мм. Чертеж данного устройства представлен на рисунке 3. В то время, как устройство скручивает образец, к одному из его концов также прикладывается усилие, контролируемое с помощью динамометра.

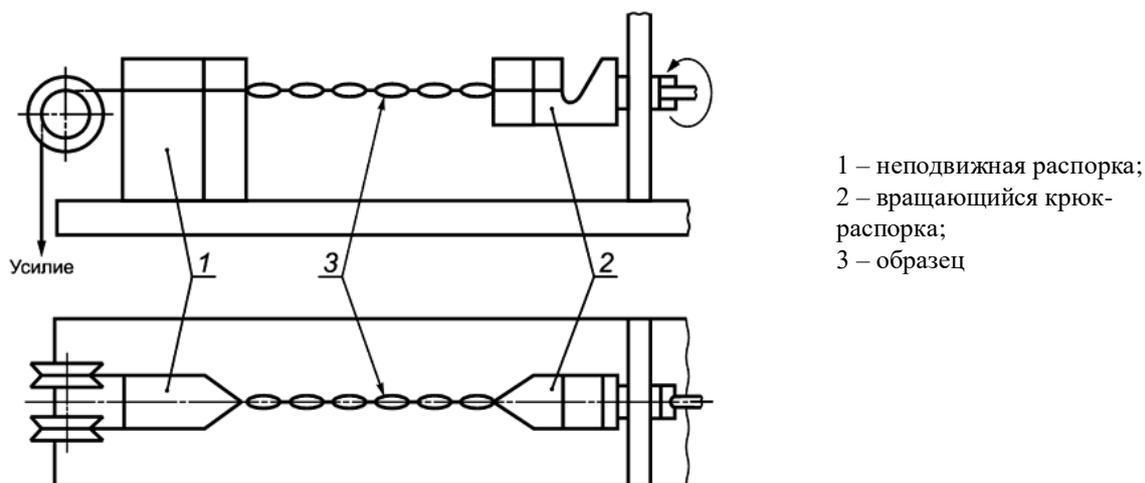


Рис. 3. Устройство для скручивания образца для испытания пробивным напряжением

Заключение

Проведенный обзор показал, что на сегодняшний день отсутствует готовое предложение по оборудованию, реализующему ГОСТ ИЕС 60851-5-2017. В настоящее время отсутствует промышленное решение датчика числа точечных повреждений в изоляции проводов. Кроме того, создание лаборатории для проведения испытаний в соответствии с рассматриваемым стандартом потребует разработки механической части станков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хренников, А.Ю. Классификация основных видов дефектов и повреждений трансформаторно-реакторного оборудования и факторов, приводящих к их возникновению / А. Ю. Хренников, В. Г. Гольдштейн // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2008. – № 1(21). – С. 166-171.
2. Бутко В.Н. Анализ работы и статистика основных повреждений трансформатора / В. Н. Бутко, С. С. Акишев, К. К. Жусупов, Б. У. Баянбаева // Актуальные научные исследования в современном мире. – 2020. – № 11-1(67). – С. 38-43.
3. Литвинов И.И. Применение амплитудно-фазного анализа тока намагничивания для выявления повреждений трансформаторов тока / И.И. Литвинов, О.В. Танфильев, А.А. Марченко, Д.В. Корнилович, В.А. Титов // Вестник КГЭУ. 2020. №4 (48).
4. Рысев П.В. Исследование отказов однофазных трансформаторов напряжения распределительных сетей вследствие разрядных явлений в изоляции / П.В. Рысев, А.А. Бурым, Д.В. Рысев // ОмГТУ. 2018. №3.
5. Беляев, П.В. Повреждения обмоток статора асинхронных двигателей и их диагностика / П.В. Беляев, А.П. Головский // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность. – 2019. – № 1. – С. 33-37.
6. Кажекин И.Е., Описание процессов при дуговых однофазных замыканиях в низковольтных судовых электросетях с компенсированной нейтралью./И.Е. Кажекин//Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 4-4 (46). С. 83-87.
7. ГОСТ ИЕС 60851-5-2017. Межгосударственный стандарт. Провода обмоточные. Методы испытаний часть 5. Электрические свойства.

OVERVIEW OF LABORATORY EQUIPMENT FOR TESTING WINDING WIRES

¹Lipovtsev Ivan Stanislavovich, student;

²Kazhekin Ilya Evgenievich, candidate of technical sciences, associate professor

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

e-mail: lipovtsev02@gmail.com; kazhekin@mail.ru

A significant proportion of electrical equipment is damaged and fails due to insulation defects; some of these defects arise at the manufacturing stage. The article provides an overview of the equipment necessary to carry out insulation tests in accordance with the requirements of IEC 60851-5-2017. It was revealed that there is no ready-made set of testing equipment that fully satisfies the requirements of this standard.

УДК 537.613

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАГНИТНОЙ МАТРИЦЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

¹Молчанов Сергей Васильевич, канд. физ.-мат. наук, доцент,

доцент образовательно-научного кластера «Институт высоких технологий»;

²Яковлев Александр Сергеевич, аспирант образовательно-научного кластера «Институт высоких технологий»;

³Чижма Сергей Николаевич, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры электрооборудования и автоматики судов;

⁴Савин Валерий Васильевич, д-р техн. наук, профессор образовательно-научного кластера «Институт высоких технологий»;

⁵Марухин Артем Олегович, аспирант образовательно-научного кластера «Институт высоких технологий»

^{1,2,4,5}Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия,

e-mail: ¹smolchanov@kantiana.ru; ²aiakovlev@kantiana.ru;

⁴vvsavin@kantiana.ru; ⁵amarukhin@kantiana.ru

³Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ», Калининград, Россия, e-mail: chisn@yandex.ru

Магнитные матрицы, состоящие из набора постоянных магнитов с особым образом направленной осью намагниченности, обеспечивают необходимые характеристики магнитного поля в месте расположения датчика и предназначены для контроля дефектов сварных швов стальных труб. Проведено моделирование распределения магнитного потока в воздушном зазоре. Показана возможность использования объемных датчиков для регистрации нормальной и тангенциальных составляющих при обнаружении дефектов трубопроводной продукции с помощью магнитных матриц.

Введение. Контроль качества продукции обеспечивают средства измерений магнитного поля высокой чувствительности, используемые при поиске и обнаружении магнитных аномалий при производстве ферромагнитных и неферромагнитных металлов [1]. Традиционно в датчиках средств измерения магнитного поля используются источники магнитного поля на основе постоянных магнитов и электромагнитов [2]. С целью повышения чувствительности методов измерений предложено использовать магнитную матрицу, состоящую из набора постоянных магнитов с особым образом направленной осью намагниченности, обеспечивающая необходимые характеристики магнитного поля в месте расположения датчика и экономию магнитных материалов. Такой

подход позволяет расширить возможности магнитометра используя микромагнитное сканирование или неразрушающий контроль с применением высокочувствительного спин-туннельного магниторезистивного (СТМР) датчика.

Учитывая, что поиске и обнаружении микро-нано магнитных аномалий в условиях производства металлопродукции наиболее важным фактором для повышения чувствительности метода уровня отношения сигнал/шум, является применение нескольких СТМР датчиков позволит использовать методы цифровой обработки: накопление сигналов, Фурье – анализ, корреляционный анализ [3].

Метод обнаружения и регистрации магнитных потоков рассеяния (MFL), возникающих в следствии изменения магнитной проницаемости в местах расположения дефектов предварительно намагниченных объектов применяется для сварных швов, трещин и пор трубопроводной продукции при оценке качества изделий [4]. Поскольку сварной шов имеет четкую структуру, существуют различия в способах намагничивания и контроля напряженности поля рассеяния при разных направлениях намагничивания. Таким образом, подходящее направление и величина уровня намагничивания может значительно повысить чувствительность обнаружения дефектов небольшого размера за счет стимуляции более сильного полевого сигнала магнитных потоков рассеяния. Традиционно для создания внешнего поля намагничивания используют электромагниты и постоянные магниты, учитывая материальную и геометрическую неоднородность возможных дефектов в разных изделиях применение одиночных источников магнитного поля в датчиках не позволяет обеспечить высокую чувствительность и минимизировать время регистрации в методе (MFL). Основная особенность магнитных потоков рассеяния – неопределенность составляющих $\vec{B}_{p\text{ мат.}}$ и $\vec{B}_{p\text{ геом.}}$ характеристик: направления и величины вектора магнитной индукции \vec{B}_p (рис.1):

$$\vec{B}_p = \vec{B}_{p\text{ мат.}} + \vec{B}_{p\text{ геом.}} \quad (1)$$

где $\vec{B}_{p\text{ геом.}}$ – вектор индукции магнитного поля рассеяния, обусловленный геометрическими неоднородностями материала, поры, трещины и т.д., $\vec{B}_{p\text{ мат.}}$ – вектор индукции магнитного поля рассеяния, зависящий от неоднородности ферромагнитных свойств материала.

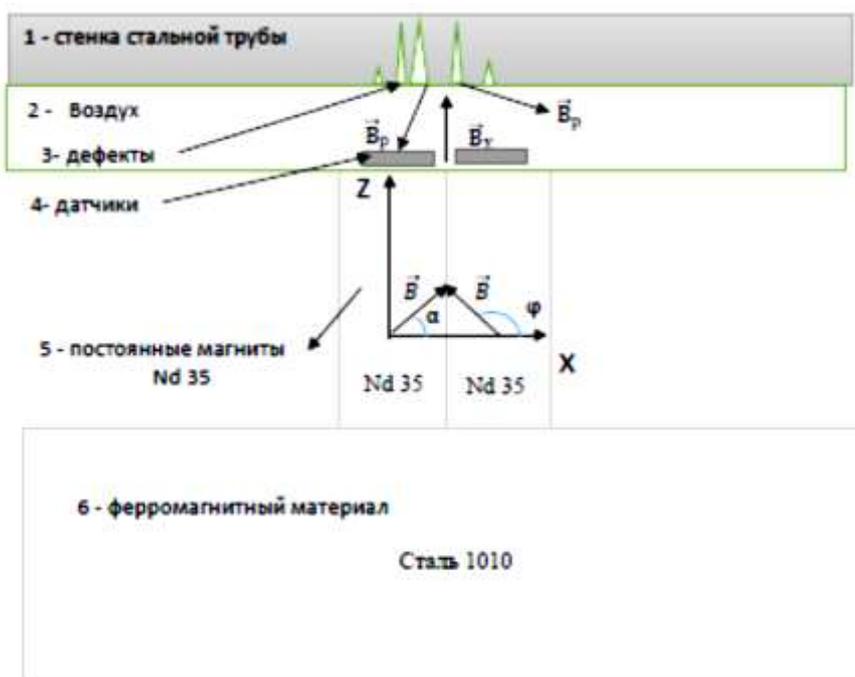


Рис. 1. Схема регистрации магнитных потоков рассеяния \vec{B}_p от дефектов сварной трубы с помощью объемных датчиков при намагничивании магнитной системой результирующим магнитным полем \vec{B}_r .

Подавляющее большинство современных постоянных магнитов обладают квазиоднородной намагниченностью, что идеально подходит для ситуаций, когда магнитный поток от магнита может создаваться с помощью магнитомягких материалов, которые направляют поток в область регистрации измерительной системы, например, подковообразные постоянные магниты. В случаях, когда используется магнит в «разомкнутой цепи» большие части потока будут находиться в областях, где не происходит регистрации. Этот нежелательный поток можно минимизировать, введя пространственно изменяющуюся направление намагничивания. Самый яркий пример этого принципа можно найти в конфигурации «Хальбаха» [5,6], которые максимизируют магнитный поток на одной стороне массива из прямоугольных магнитов, практически устраняя поток на другой стороне. Учитывая успешные результаты по производству анизотропных спеченных магнитов с возможностью задания произвольного направления намагниченности с использованием сложных оптимизированные схемы намагничивания в работе предложено использовать подобные материалы для моделирования магнитной системы регистрации в методе (MFL) [7].

На рис.1 предложена магнитная система представляющая источник внешнего магнитного поля состоящая из пары постоянных магнитов 5 марки Nd 35 с осью намагниченности зависящей от углов α , φ и пластины 6 из ферромагнитной стали. Данная конструкция позволяет обеспечить экономию дорогостоящих магнитных материалов при построении магнитной матрицы, состоящей из 24 и более датчиков, необходимых для трехмерного сканирования и обнаружения потоков рассеяния магнитного поля на дефектах исследуемого материала.

Проведено моделирование распределения магнитного потока в центральной части магнитной системы в воздушном зазоре при внешнем намагничивании показано на рисунке 2.

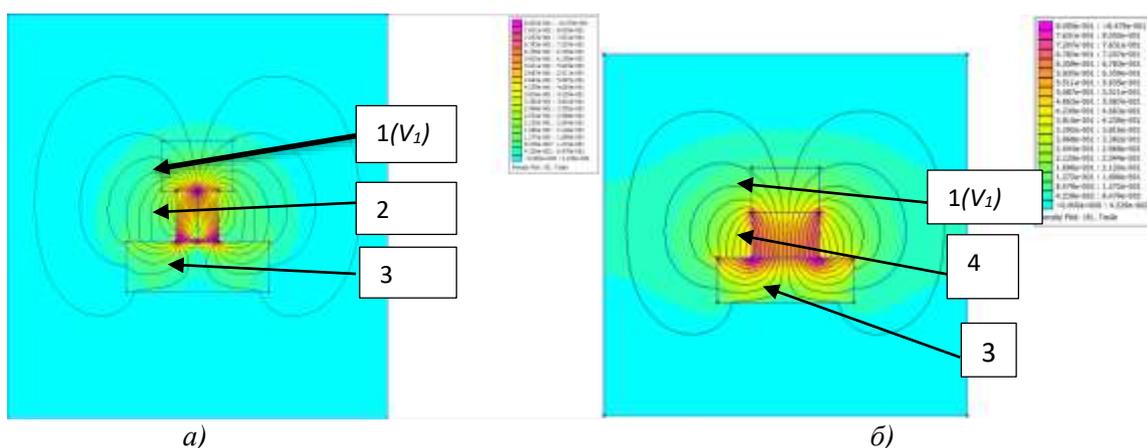


Рис. 2. Распределение линий индукции магнитного поля для двух вариантов магнитной системы вне материала магнитной системы $1(V_1)$ и внутри материала: а) 2 – пара постоянных магнитов марки Nd 35, 3 – ферромагнитный материал (сталь 1010) и 1 – область воздушного зазора, используемого для создания внешнего магнитного поля в методе (MFL), б) 4 – одиночный постоянный магнит марки Nd 35.

В процессе моделирования магнитной системы основным критерием для выбора конструкции системы – выполнение требования по максимизации величины энергии магнитного поля в фиксированной по объему области воздушного зазора (рис.2) – 1, обозначенный V_1 . Причем энергия магнитного поля, локализованная в заданном объеме определялась как следствие из общеизвестных уравнений Максвелла:

$$E_{V_1} = \int_0^{V_1} \left[\int_0^B H(B) dB \right] dV \quad (2)$$

Таким образом в процессе исследования по выбору оптимальной конфигурации применен подход по вариации геометрических значений размеров постоянных магнитов: от одиночного магнита с шириной равной области V_1 (30мм), и последующем уменьшении размеров магнитов до 9 мм (рис.3) и углов остаточного намагничивания α , $\varphi = 180^\circ - \alpha$ (рис.4). Для оценки оптимизации конструкции магнитной системы применен показатель энергоэффективности - E_n равный отношению энергии магнитного поля сосредоточенной в объеме V_1 от источника – одиночного по-

стоянного магнита с максимальной шириной к значению энергии магнитного поля сосредоточенной в том же объеме но от пары магнитов с уменьшенным количеством магнитного материала и угла остаточного намагничивания:

$$E_{\Pi} = \frac{\int_0^{V_1} [\int_{B_0}^{B_n} H(B) dB] dV}{\int_0^{V_1} [\int_{B_k}^{B_M} H(B) dB] dV} \times 100\%, \quad (3)$$

где, B_n, B_0 - максимальное и минимальное значения величины индукции магнитного поля созданное одиночным постоянным магнитом в объеме V_1 , и B_M, B_k - максимальное и минимальное значения величины индукции магнитного поля созданное парой постоянных магнитов в объеме V_1 при изменении количества магнитного материала и угла остаточного намагничивания (рис.3, 4).

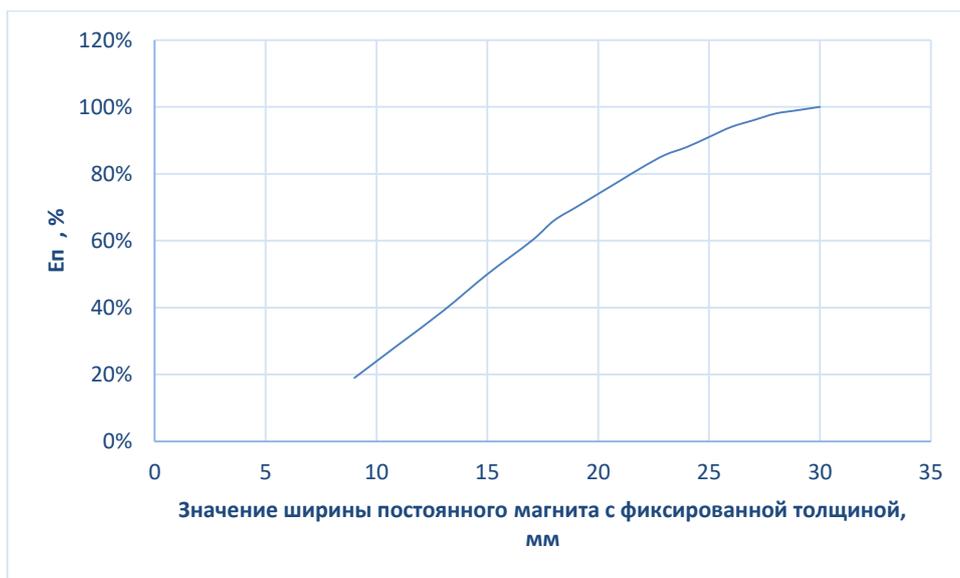


Рис.3. Зависимость показателя энергоэффективности E_{Π} от изменения ширины двух постоянных магнитов в диапазоне от 30 до 9 мм, при угле $\alpha = \varphi = 90^{\circ}$.

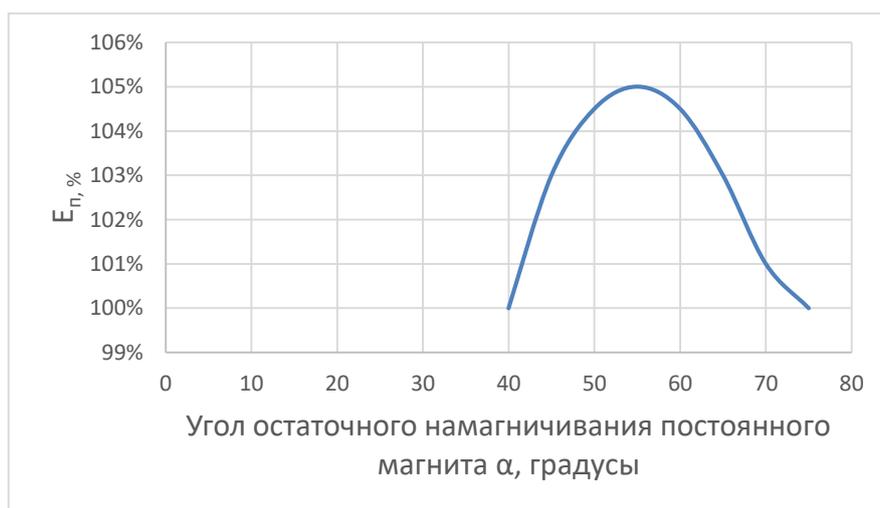


Рис. 4 Зависимость показателя энергоэффективности E_{Π} от изменения угла α остаточного намагничивания пары постоянных магнитов от 40 до 75 градусов.

Учитывая полученные результаты можно оценить суммарную характеристику магнитной системы при выбранном оптимальном значении угла $\alpha = 55^{\circ}$, как экономия магнитного материала в зависимости от формы и объемных размеров постоянных магнитов (рис.5), влияющих на величину показателя энергоэффективности.

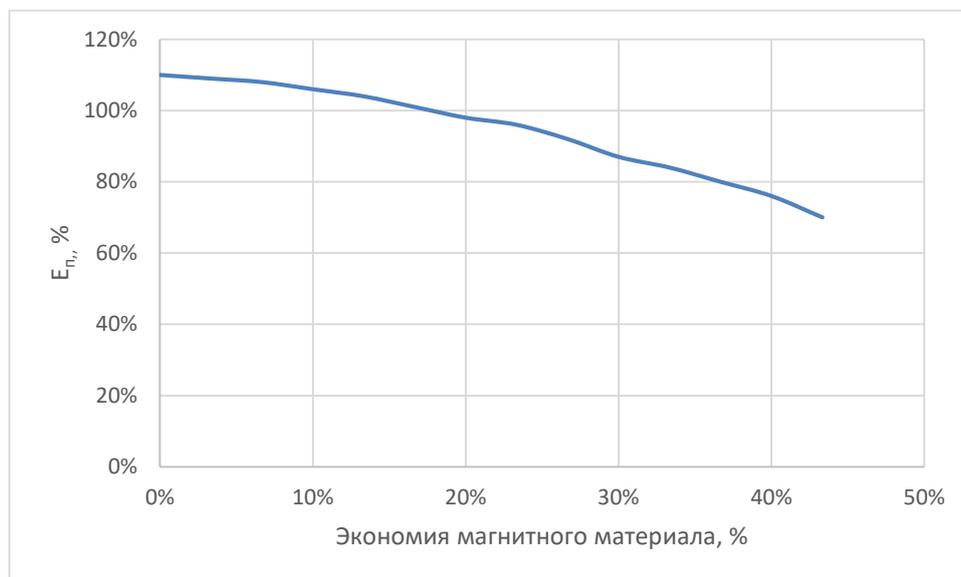


Рис. 5 Зависимость показателя энергоэффективности от экономии магнитного материала.

Учитывая сложную форму распределения полей рассеяния после наложения внешнего магнитного поля, что является следствием модуляции магнитной проницаемости материала при обнаружении дефектов трубопроводной продукции, необходимо использовать объемные датчики для регистрации нормальной и тангенциальных составляющих при однократном прохождении с помощью магнитной матрицы (рис. 6).

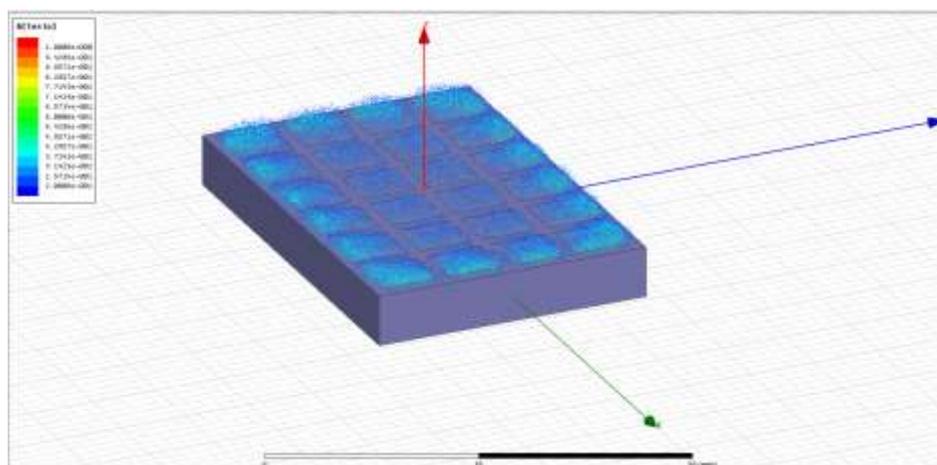


Рис. 6 Результат моделирования распределения индукции магнитного поля матрицей 4x6 элементов на постоянных магнитах.

Выводы. Очевидно, что магнитные системы, используемые при регистрации магнитных полей рассеивания построенные на принципах оптимизации угла намагниченности магнитного поля и размеров геометрической конструкции, позволяют повысить показатель энергоэффективности магнитного поля до 10% и более, по сравнению с одиночным магнитом с теми же размерами и материалом. Необходимо отметить, что вместо использования одиночного постоянного магнита можно уменьшить размеры магнитной системы при конструировании магнитной матрицы, сохранив прежние расстояние от датчика с уменьшением до 20% объема магнитного материала при той же производительности. Такое решение позволит обеспечить одновременное измерение 3-д составляющих полей магнитного рассеяния и повысить чувствительность метода (MFL) [8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Y. Sun and Y. Kang. Magnetic mechanisms of the magnetic flux leakage nondestructive testing. *Appl. Phys. Lett.* 2013; 103184104.
2. Ramsden, Edward. Hall-effect sensors: theory and applications. – 2, illustrated. – Elsevier, 2006.
3. Kang YH, Wu XY, Yang SZ (2000) Signal processing technology for magnetic nondestructive testing. *Nondestruct Test* 22(4):255–259.
4. Wang, Z.S. Research on image detection and recognition for defects on the surface of the steel plate based on magnetic flux leakage signals. In *Proceedings of the 29th Chinese Control and Decision Conference, Chongqing, China, 28–30 May 2017*; pp. 6139–6144.
5. J. C. Mallinson; *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 9, No. 4, Dec. 1973.
6. K. Halbach; *Nuclear Instruments and Methods* 169 (1980), pp. 1-10.
7. Сафин А.Р., Ranjan Kumar Behera. Аддитивное производство и оптимизация топологии магнитных материалов для электрических машин / Проблемы энергетики. 2021. № 3. С. 14-33.
8. Dutta, S.M.; Ghorbel, F.H.; Stanley, R.K. Simulation and analysis of 3-D magnetic flux leakage. *IEEE Trans. Magn.* 2009, 45, 1966–1972.

Источник финансирования: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-20157 (<https://rscf.ru/project/22-19-20157/>) и гранта в форме субсидии из бюджета Калининградской области №06-С/2022.

WAYS TO INCREASE THE ENERGY EFFICIENCY OF THE MAGNETIC MATRIX OF MEASURING SYSTEMS

¹Molchanov Sergey Vasilievich, PSD of physical and mathematical sciences, docent, docent educational and scientific cluster «Institute of high Technologies»;

²IAkovlev Aleksandr Sergeevich, post-graduate student educational and scientific cluster «Institute of high Technologies»;

³Chizhma Sergey Nikolaevich, doctor of engineering, docent, professor of the department of electrical equipment and ship automation;

⁴Savin Valery Vasilievich, doctor of technical sciences, professor, professor, Immanuel Kant Baltic Federal University;

⁵Marukhin Artem Olegovich, postgraduate student Immanuel Kant Baltic Federal University

^{1,2,4,5}FSBAI HE Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia, e-mail: ¹smolchanov@kantiana.ru; ²aiakovlev@kantiana.ru

³Baltic Fishing Fleet State Academy FSBEI HE «KSTU», Kaliningrad, Russia, e-mail: chisn@yandex.ru

Magnetic matrices consisting of a set of permanent magnets with a specially directed magnetization axis provide the necessary characteristics of the magnetic field at the location of the sensor and are designed to control defects in welded seams of steel pipes. The magnetic flux distribution in the air gap is modeled. The possibility of using volume sensors to register normal and tangential components when detecting defects in pipeline products using magnetic matrices is shown.

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЫБОПРОМЫСЛОВЫХ СУДОВ

¹Русаков Сергей Михайлович, канд. техн. наук, доцент

¹Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ», Калининград, Россия, e-mail: rusakov.sm@bgarf.ru

Цель работы заключается в анализе возможностей использования на рыбопромысловых судах современных технических решений в области источников, накопителей электроэнергии и устройств повышения качества электроэнергии. Новизна работы заключается в предложении комплекса современных технических решений, обеспечивающих повышение эффективности электроэнергетических систем. Использование на рыбопромысловых судах комбинаторного принципа управления главной энергоустановкой совместно с валогенераторами, работающими с переменной частотой вращения ротора, позволит получить ощутимый экономический эффект.

Повышение эффективности судовых электроэнергетических систем (СЭЭС) связано со снижением эксплуатационных расходов на выработку электроэнергии. Одним из способов решения этой задачи является применение на судах валогенераторов (ВГ), приводимых в движение от главных двигателей (ГД). Это целесообразно не только по причине более дешевой электроэнергии и меньшими по сравнению с вспомогательными дизель-генераторами (ВДГ) эксплуатационными затратами, но и из-за возможности обеспечить аварийный ход судна при выходе из строя ГД [1].

Кроме этого, использование ВГ на рыбопромысловых судах дает возможность питания мощных потребителей, работающих только в промышленном режиме (траловые лебедки), не используя более затратные в эксплуатации вспомогательные ВДГ.

Типовая структура судовой энергетической установки (СЭУ) рыбопромыслового судна состоит из следующих главных элементов: пропульсивного комплекса с двумя среднеоборотными двигателями (СОД), работающими в режиме постоянной частоты вращения (ЧВ) на винт регулируемого шага (ВРШ) и судовой электростанции с двумя ВГ и несколькими ВДГ. Необходимость работы с постоянной ЧВ объясняется требованиями постоянства частоты вырабатываемой ВГ традиционной конструкции электроэнергии.

Недостатки работы в режиме постоянной ЧВ заключаются в следующем:

- энергоэффективность ГД резко снижается при ходе судна с малым углом разворота лопастей (шагом) ВРШ;
- возможность кавитационной эрозии поверхности винта при продолжительной работе с малым шагом ВРШ и высокой ЧВ;
- ограничение нагрузки ГД (путем уменьшения шага ВРШ) при работе с подключенными ВГ для исключения значительных изменений ЧВ ГД и, соответственно, частоты тока в судовой сети;
- при ходе на волнении повышенные колебания частоты тока в судовой сети и напряженный режим работы механизма изменения шага (МИШ) ВРШ при ограничении нагрузки ГД;
- невозможность длительной параллельной работы ВГ и ВДГ без специальных устройств.

Избавиться от указанных недостатков и повысить энергоэффективность и надежность СЭУ и СЭЭС позволяют следующие технические решения:

- комбинаторный принцип управления ГД, при котором ход судна определяется оптимальным соотношением между ЧВ ГД и шагом (углом разворота лопастей) ВРШ;
- валогенераторы, работающие при изменяющейся в широких пределах ЧВ.

Эти ВГ могут быть выполнены следующим образом:

- на основе синхронного генератора (СГ) стандартной конструкции, причем стабилизация частоты и напряжения электроэнергии обеспечивается посредством полупроводниковых преобразователей (ПП) и синхронных компенсаторов (СК);

- с использованием машины двойного питания (МДП) на основе асинхронного генератора с фазным ротором (АГ с ФР) или асинхронизированной синхронной машины (АСМ).

Принцип стабилизации частоты тока, вырабатываемой ВГ электроэнергии при переменной ЧВ ротора ВГ с помощью ПП для ГД, работающих на винт фиксированного шага (ВФШ), используется с конца восьмидесятых годов прошлого века [2]. Современная реализация этого принципа заключается в применении в ПП вместо тиристорных IGBT-транзисторов.

Схема судовой электростанции (СЭС) с двумя ВГ и ВДГ, ПП и СК представлена на рис. 1, где обозначены: ГРЩ – главный распределительный щит, QF1, QF2, QF5, QF7 – автоматические выключатели генераторов, QF3, QF6 – автоматические выключатели, QF4 – переключатель, УВ1, УВ2 – тиристорные управляемые выпрямители для питания систем возбуждения ВГ1 и ВГ2, П1, П2 – автоматические переключатели с электроприводом, Д – приводные двигатели дизель-генераторов ДГ1 и ДГ2, Р – редуктор, МИШ – механизм изменения шага.

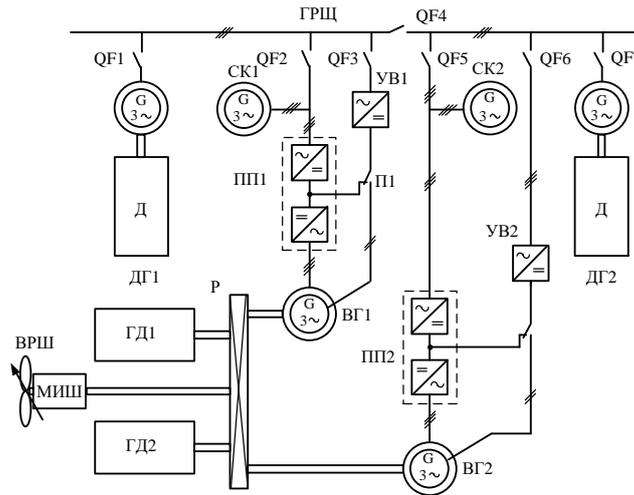


Рис. 1. Схема СЭС рыбопромыслового судна с валогенераторами, работающими с переменной ЧВ

В качестве СК используется стандартный синхронный генератор. ПП выполнены по схеме управляемый выпрямитель – ведомый инвертор на двух мостовых схемах с 12 тиристорами. Для возбуждения ВГ1 и ВГ2 используются УВ1 и УВ2. Запуск СК осуществляется без использования электродвигателей. На время пуска синхронный компенсатор СК1(СК2) с помощью автоматического переключателя с электроприводом П1(П2) подключается к цепи преобразования: переменное напряжение судовой сети – постоянное напряжение – переменное напряжение с управляемой частотой. После разгона СК1(СК2) до 50% номинальной ЧВ УВ1(УВ2) подключается к обмотке возбуждения ВГ1(ВГ2) и дальнейшее увеличение ЧВ до номинальной осуществляется при питании от ВГ1(ВГ2).

Активная мощность, поступающая в судовую сеть, и частота тока в судовой сети регулируются за счет изменения углов открытия тиристорных управляемых выпрямителей ПП.

Система автоматического регулирования напряжения и возбуждения ВГ поддерживает постоянство подводимого к ПП напряжения. В рассматриваемой схеме СК используется для коммутации тиристорных полупроводниковых преобразователей и является регулируемым источником реактивной мощности в СЭС. Так как ВГ в этой схеме подключаются через управляемый выпрямитель-инвертор, то без СК невозможна устойчивая параллельная работа с ВДГ. Поэтому важным достоинством рассматриваемой системы является возможность длительной параллельной работы вало- и дизель-генераторов. Реактивная мощность распределяется между СК и ВДГ в соответствии с характеристиками регуляторов напряжения ВГ и ВДГ. Активная мощность распределяется в соответствии с настройкой регуляторов частоты ВГ и ВДГ, однако задавать частоту тока в СЭС будет ВГ.

Недостатками рассмотренной системы являются необходимость использования синхронного компенсатора, мощность которого соизмерима с мощностью ВГ и высокий коэффициент нелинейных искажений вырабатываемой электроэнергии. Высшие гармонические составляющие вы-

ходного напряжения полупроводниковых преобразователей влияют на работу асинхронных электродвигателей, приводя к пульсации вращающего момента, вибрации и нагреву электродвигателей. Для снижения влияния этих явлений необходимо использовать фильтры, рассчитанные на полную мощность ВГ.

Использование машины двойного питания на основе асинхронного генератора с фазным ротором или асинхронизированной синхронной машины позволяет стабилизировать частоту вырабатываемой электроэнергии посредством преобразователя установленного в цепи возбуждения.

В установившемся режиме по двух- или обмотке трехфазной обмотке ротора протекают токи частоты скольжения. Они формируются преобразователем частоты, подключенным к обмотке возбуждения машины. В результате через статор ВГ проходит магнитный поток с постоянной частотой. Магнитное поле ротора АСМ должно вращаться согласно с валом, когда ЧВ меньше синхронной и встречно, когда ЧВ больше синхронной. При равенстве частот магнитное поле остается неподвижным относительно ротора.

На рис. 2 представлена схема включения асинхронизированного валогенератора (АСВГ) с приводом от ГД, работающего на ВФШ и переменной ЧВ.

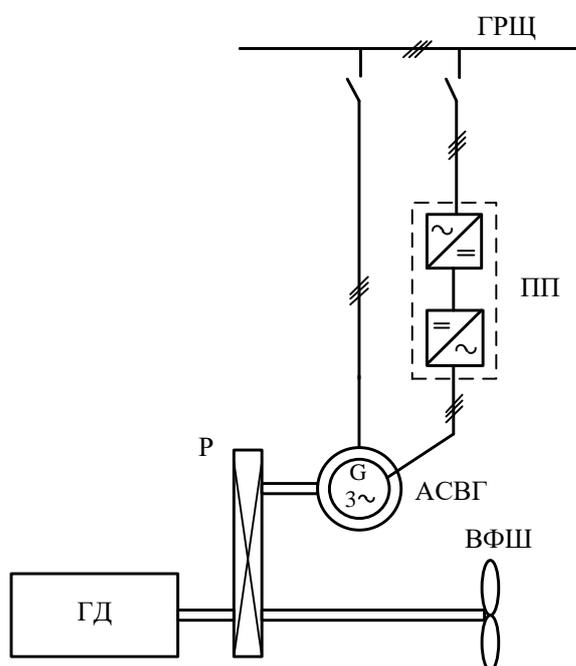


Рис. 2. Схема включения асинхронизированного валогенератора

Полупроводниковый преобразователь ПП состоит из управляемого выпрямителя и автономного инвертора, подключенного непосредственно к шинам ГРЩ.

Первоначально в валогенераторных установках рассматриваемого типа использовались АСМ с контактными кольцами. Предложены также варианты с бесщеточными АСМ с преобразователями частоты, установленными непосредственно на роторе машины. На рис.3 представлена схема асинхронизированного бесщеточного валогенератора с преобразователем частоты, установленном на роторе машины.

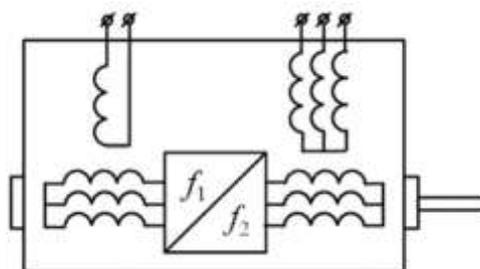


Рис. 3. Схема асинхронизированного бесщеточного валогенератора

Валогенераторная установка этого типа поддерживает постоянство частоты вырабатываемой электроэнергии в пределах изменения частоты ГД 70 – 100% от номинальной величины. кратковременно до 110% при номинальной нагрузке ВГ.

Преимущества такого способа стабилизации частоты выходного напряжения ВГ заключаются в возможности длительной параллельной работы с ВДГ и в повышении качества вырабатываемой электроэнергии.

Из недостатков отмечаются следующие: используется электрическая машина специального исполнения, значительная мощность необходимая для работы системы возбуждения, зависимость мощности от величины скольжения. Однако совершенствование конструкции АСМ и использование вместо тиристоров IGBT-транзисторов позволило существенно улучшить характеристики асинхронизированных генераторов.

Использование мощных полупроводниковых преобразователей в системе выработки электроэнергии существенно ухудшает форму напряжения. Для ослабления гармоник в электроэнергетических системах стали широко использовать активные фильтры [3].

Совместное использование валогенераторов, работающих с переменной частотой вращения ротора, с активными фильтрами позволит получить ощутимый экономический эффект.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов А.П. Судовые автоматизированные электроэнергетические системы. – СПб.: Судостроение, 2005. – 528 с.
2. Иванов А.В. Современные валогенераторные установки. Методическое пособие. – СПб.: Издательство ГМА им. адм. С.О. Макарова, 1997. – 45 с.
3. Григорьев А. В., Зайнуллин Р. Р. Анализ режимов эксплуатации судовых валогенераторных установок с преобразователями частоты и синхронными компенсаторами. - Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – 2016. – № 3 (27). – С. 164 – 171.

MODERN TECHNOLOGIES FOR INCREASING EFFICIENCY ELECTRIC POWER SYSTEMS FISHING VESSELS

¹Rusakov Sergey Mikhailovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

¹Baltic Fishing Fleet State Academy FSBEI HE «KSTU»,
Kaliningrad, Russia, e-mail: rusakov.sm@bgarf.ru

The purpose of the work is to analyze the possibilities of using modern technical solutions in the field of sources, energy storage devices and devices for improving the quality of electricity on fishing vessels. The novelty of the work lies in the offer of a complex of modern technical solutions that ensure an increase in the efficiency of electric power systems. The use on fishing vessels of the combinatorial principle of controlling the head of the power plant together with the generators operating with variable rotor speed will allow to obtain a tangible economic effect.

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ САВС И САПВ НА ПРИМЕРЕ УЧАСТКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

¹Старостин Егор Сергеевич, аспирант кафедры энергетики

¹Калининградский государственный технический университет,
Калининград, Россия, e-mail: starostin-es@list.ru

Рассматривается способ повышения надежности электрических распределительных сетей на примере участка сети 15 кВ. Проведен расчет основных показателей надежности применения САВС и селективного АПВ на примере реального сетевого участка. Проведено сравнение результатов расчетов показателей надежности SAIDI и SAIFI при существующей конфигурации сети, после внедрения САВС и после внедрения САВС и селективного АПВ. Показана эффективность использования САВС и селективного АПВ для снижения средней продолжительности прекращения передачи электроэнергии.

С целью внедрения системы автоматического восстановления сети с селективным АПВ кабельно-воздушных линий, исходя из опыта эксплуатации выбраны линии сетевого участка, обеспечивающие наличие большого количества кабельных участков (рис. 1).

Нормативным документом, устанавливающим методику расчета показателей надежности в электроэнергетике, является Приказ Минэнерго России от 29.11.2016 г. №1256 «Об утверждении Методических указаний по расчету уровня надежности и качества поставляемых товаров и оказываемых услуг для организации по управлению единой национальной (общероссийской) электрической сетью и территориальных сетевых организаций» [1]. Документом устанавливается два индикативных показателя надежности оказываемых услуг – средняя продолжительность прекращения передачи электроэнергии (SAIDI) и средняя частота прекращения передачи электроэнергии потребителям (SAIFI).

Система автоматического восстановления сети направлена на уменьшение времени восстановления передачи электроэнергии потребителям путем автоматизации процессов. Таким образом, применение САВС не повлияет на частоту прекращения передачи электроэнергии потребителям, но сделает перерывы в электроснабжении менее продолжительными. Основным индикативным показателем надежности тогда будет считаться средняя продолжительность прекращения передачи электроэнергии P_{saidi} , рассчитываемая по выражению:

$$P_{saidi} = \frac{\sum T_j \cdot N_j}{N_t} \quad (1)$$

где T_j – продолжительность j -го прекращения передачи электрической энергии, час;

N_j – количество точек поставки потребителей услуг сетевой организации, в отношении которых произошло j -ое прекращение передачи электроэнергии, шт.;

N_t – максимальное за год число точек поставки потребителей услуг сетевой организации за t -й расчетный период регулирования, шт.

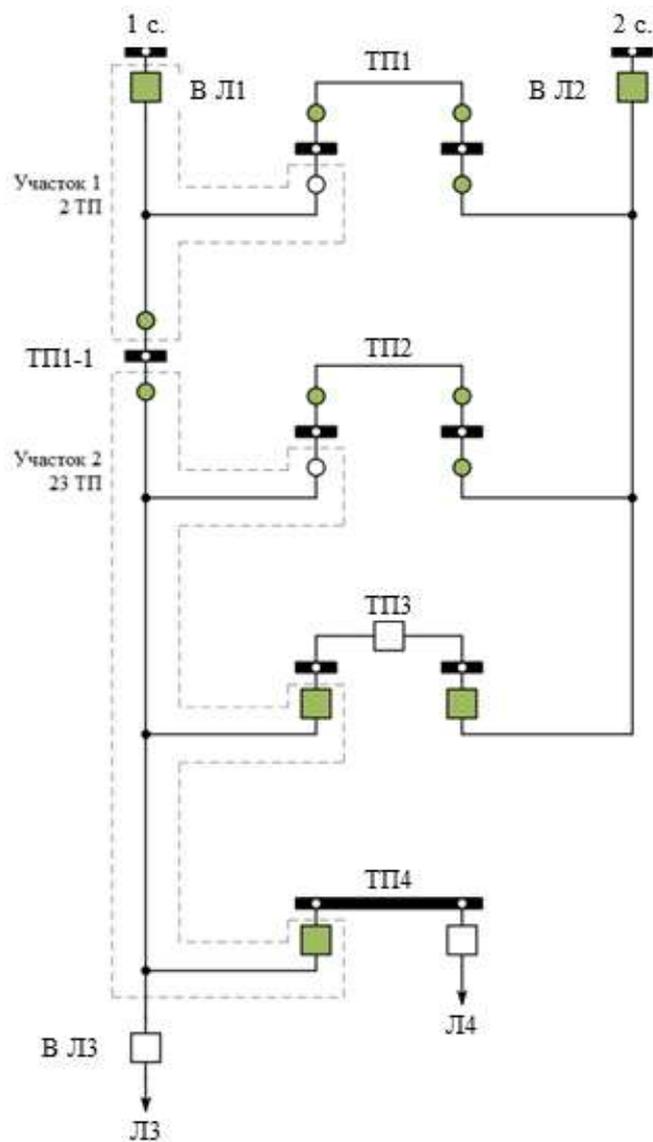


Рис. 1. Схема модернизируемого участка сети для расчета показателей надежности

Продолжительность прекращения передачи электроэнергии T_j определяется по выражению:

$$T_j = \omega_i \cdot T \quad (2)$$

где T – среднее время восстановления одного повреждения, ч;

ω_i – число отключений потребителей -го участка фидера, откл/год.

Число отключений потребителей -го участка ω_i определяется по выражению:

$$\omega_i = 0,01 \cdot \omega_0 \cdot (1 - k_{\text{ну}}) \cdot L_i \quad (3)$$

где ω_0 – удельная частота повреждений на 100 км линии, 1/год·км;

$k_{\text{ну}}$ – коэффициент, учитывающий наличие АПВ;

L_i – суммарная длина участков фидера, при повреждении на которых происходит отключение потребителей -го участка, км.

Значение удельной частоты повреждений ω_0 определяется по формуле:

$$\omega_0 = \frac{n_{\text{откл}} \cdot 100}{L} \quad (4)$$

где $n_{\text{откл}}$ – количество отключений фидера в год, 1/год;

L – длина фидера, км.

В соответствии с [2] в сетях 6-20 кВ в среднем в год происходит до 30 отключений на 100 км линии. В таблице 1 сведены значения среднего времени восстановления основных элементов рассматриваемого участка сети в соответствии с [3].

Таблица 1

Время восстановления элементов сети

№ п/п	Элемент	Среднее время восстановления элемента, ч
1	Трансформатор 15/0,4 кВ	6
2	Выключатель 15 кВ	10
3	ЛЭП	5
4	Линейный разъединитель	6

Однако на показатель SAIFI будет оказывать влияние внедрение системы селективного АПВ на линии Л1, так как на данный момент АПВ на данном фидере не реализовано вовсе. Статистика показывает, что применение однократного АПВ позволяет снизить количество отключений потребителей примерно на 60% [4]. Значение показателя SAIFI определяется по выражению:

$$P_{saifi} = \frac{\sum(\omega_i \cdot N_i)}{N_t} \quad (5)$$

где ω_i - число отключений потребителей -го участка, откл/год;

N_i - количество точек поставки потребителей услуг сетевой организации, в отношении которых произошло -ое прекращение передачи электроэнергии, шт.;

N_t – максимальное за год число точек поставки потребителей услуг сетевой организации за -й расчетный период регулирования, шт.

Рассмотрим три этапа модернизации анализируемого участка сети:

- 1) Существующая конфигурация сети;
- 2) Внедрение на участке сети САВС;
- 3) Внедрение системы селективного АПВ.

Расчет показателей надежности

1.1. Расчет показателей надежности существующей сети

В настоящее время анализируемый участок сети представляет собой два фидера: Л1(протяженность прилегающей сети 18,919 км) и Л2(протяженность прилегающей сети 10,399 км). В данном случае повреждение на фидере ведет к потере всех потребителей на время равное среднему времени восстановления.

Значение количества отключений потребителей ω по выражению (3) для фидера Л1:

$$\omega_i = 0,01 \cdot 30 \cdot (1 - 0) \cdot 18,919 = 5,676 \text{ откл/год}$$

В данном случае коэффициент $k_{\text{ну}}$ принят равным 0, так как на линии отсутствует АПВ.

Аналогично для фидера Л2:

$$\omega_i = 0,01 \cdot 30 \cdot (1 - 0,6) \cdot 10,399 = 1,248 \text{ откл/год}$$

В данном случае коэффициент $k_{\text{ну}}$ принят равным 0,6, так как на линии используется однократное АПВ, статистически снижающее количество отключений потребителей на 60%.

По выражению (2) определим значение продолжительности прекращения передачи электроэнергии T_j для фидера Л1:

$$T_j = 5,676 \cdot 6 = 34,054 \text{ ч/год}$$

Аналогично для фидера Л2:

$$T_j = 1,248 \cdot 6 = 7,487 \text{ ч/год}$$

По выражению (1) общее значение показателя SAIDI составит:

$$P_{sai di} = \frac{34,054 \cdot 25 + 7,487 \cdot 9}{25 + 9} = 27,022 \text{ ч/год}$$

По выражению (5) значение показателя SAIFI:

$$P_{sai fi} = \frac{5,676 \cdot 25 + 1,248 \cdot 9}{25 + 9} = 4,504 \text{ откл/год}$$

В таблице 2 сведены расчеты показателей SAIDI и SAIFI для данного случая в соответствии с ранее приведенными формулами.

Таблица 2

Расчеты показателей SAIDI и SAIFI для существующей сети

Линия	Л1	Л2
Общая протяженность L , км	18,919	10,399
Общее количество питаемых ТП N_t , шт	25	9
Среднее время восстановления повреждения T , ч	6	6
Число отключений потребителей ω , откл/год	5,676	1,248
Продолжительность прекращения передачи электроэнергии T_j , ч/год	34,054	7,487
SAIDI, ч/год	27,022	
SAIFI, откл/год	4,504	

1.2. Расчет показателей с учетом САВС

Использование системы автоматического восстановления сети (САВС) позволит автоматически восстановить питание неповрежденного участка сети. В соответствии с информацией от производителей, максимальное время восстановления примем равным 2 минутам с учетом времени запаса. Сеть фидера Л1 может быть разделена на два участка: до ТП1-1и после (рис. 1). Повреждение на любом из данных участков приведет к отключению всего фидера, однако с помощью САВС в течение короткого времени участок может быть локализован за счет выключателей нагрузки на ТП1-1, а неповрежденные потребители могут быть запитаны от фидера Л2 посредством переключения коммутирующих устройств на ТП1, ТП2 или ТП3. Таким образом, при повреждении на фидере Л1 на участке до ТП1-1, будут обесточены всего 2 ТП на время равное среднему времени восстановления и оставшиеся 23 ТП на время работы САВС. При повреждении на участке после ТП1-1 аналогично всего 2 ТП будут перезапитаны через время работы САВС, а оставшиеся 23 ТП потеряют электроснабжение на среднее время восстановления.

Рассмотрим участок 1 (до ТП1-1). Протяженность данного участка составляет 4,06 км. Тогда, с учетом протяженности участка значение количества отключений потребителей, рассчитанное по выражению (3) составит:

$$\omega_i = 0,01 \cdot 30 \cdot (1 - 0) \cdot 4,06 = 1,218 \text{ откл/год}$$

Для $N_1 = 2$ ТП среднее время восстановления повреждения составляет $T_{cp1} = 6$ ч. Для $N_2 = 23$ ТП среднее время восстановления составит $T_{cp2} = 0,03$ ч. Определим значения продолжительности прекращения передачи электроэнергии T_j :

$$T_1 = 1,218 \cdot 6 = 7,308 \text{ ч/год}$$

$$T_2 = 1,218 \cdot 0,03 = 0,041 \text{ ч/год}$$

Аналогично для участка 2(после ТП1-1), протяженность которого составляет 14,859 км:

$$\omega_i = 0,01 \cdot 30 \cdot (1 - 0) \cdot 14,859 = 4,458 \text{ откл/год}$$

В данном случае $N_3 = 23$ ТП, $N_4 = 2$ ТП.

$$T_3 = 4,458 \cdot 6 = 26,746 \text{ ч/год}$$

$$T_4 = 4,458 \cdot 0,03 = 0,149 \text{ ч/год}$$

Для фидера Л2 значения аналогичны расчетам подраздела 1.1. Рассчитаем показатели SAIDI и SAIFI участка сети с учетом CABС:

$$P_{saidi} = \frac{7,308 \cdot 2 + 0,041 \cdot 23 + 26,746 \cdot 23 + 0,149 \cdot 2 + 7,487 \cdot 9}{25 + 9} = 20,541 \text{ ч/год}$$

$$P_{saifi} = \frac{1,218 \cdot 2 + 1,218 \cdot 23 + 4,458 \cdot 23 + 4,458 \cdot 2 + 1,248 \cdot 9}{25 + 9} = 4,504 \text{ откл/год}$$

В таблице 3 сведены расчеты показателей SAIDI и SAIFI для модернизируемого участка сети с учетом внедрения CABС.

Таблица 3

Расчеты показателей SAIDI и SAIFI для участка сети с учетом CABС

Линия	Л1		Л2
	Уч. 1	Уч. 2	
Общая протяженность L , км	4,06	14,859	10,399
Общее количество питаемых ТП N_t , шт	2	23	9
Среднее время восстановления повреждения T , ч	6 (0,03)	6 (0,03)	6
Число отключений потребителей ω , откл/год	1,218	4,458	1,248
Продолжительность прекращения передачи электроэнергии T_j , ч/год	7,308 (0,041)	26,746 (0,149)	7,487
SAIDI, ч/год	20,541		
SAIFI, откл/год	4,504		

1.3. Расчет показателей с учетом селективного АПВ

В настоящий момент на линии Л1 не используется АПВ. Применение селективного АПВ позволит сократить количество отключений потребителей ориентировочно на 60% [4], что позволит значительно снизить показатели SAIDI и SAIFI.

Аналогично расчетам подраздела 1.2 рассчитаем данные показатели с учетом использования АПВ. Для участка 1 фидера Л1:

$$\omega_i = 0,01 \cdot 30 \cdot (1 - 0,6) \cdot 4,06 = 0,487 \text{ откл/год}$$

$$T_1 = 1,218 \cdot 6 = 2,923 \text{ ч/год}$$

$$T_2 = 1,218 \cdot 0,03 = 0,015 \text{ ч/год}$$

Для участка 2:

$$\omega_i = 0,01 \cdot 30 \cdot (1 - 0,6) \cdot 14,859 = 1,783 \text{ откл/год}$$

$$T_3 = 1,783 \cdot 6 = 10,698 \text{ ч/год}$$

$$T_4 = 1,783 \cdot 0,03 = 0,053 \text{ ч/год}$$

Для фидера Л2 значения аналогичны расчетам подраздела 1.1. Рассчитаем показатели SAIDI и SAIFI участка сети с учетом САВС и селективного АПВ:

$$P_{saidi} = \frac{2,923 \cdot 2 + 0,015 \cdot 23 + 10,698 \cdot 23 + 0,053 \cdot 2 + 7,487 \cdot 9}{25 + 9} = 9,404 \text{ ч/год}$$

$$P_{saifi} = \frac{0,487 \cdot 2 + 0,487 \cdot 23 + 1,783 \cdot 23 + 1,783 \cdot 2 + 1,248 \cdot 9}{25 + 9} = 1,999 \text{ откл/год}$$

В таблице 4 сведены расчеты показателей SAIDI и SAIFI для модернизируемого участка сети с учетом внедрения САВС и селективного АПВ.

Таблица 4

Расчеты показателей SAIDI и SAIFI для участка сети с учетом САВС и САПВ

Линия	Л1		Л2
	Уч. 1	Уч. 2	
Общая протяженность L , км	4,06	14,859	10,399
Общее количество питаемых ТП N_t , шт	2	23	9
Среднее время восстановления повреждения T , ч	6 (0,03)	6 (0,03)	6
Число отключений потребителей ω , откл/год	0,487	1,783	1,248
Продолжительность прекращения передачи электроэнергии T_j , ч/год	2,923 (0,015)	10,698 (0,053)	7,487
SAIDI, ч/год	9,404		
SAIFI, откл/год	1,999		

Таким образом, применение всех предложенных мер позволит снизить показатель SAIDI в 2,87 раз, а показатель SAIFI в 2,25 раза. В таблице 5 сведены результаты расчетов показателей надежности.

Таблица 5

Результаты расчетов показателей SAIDI, SAIFI

	До модернизации	После внедрения САВС	После внедрения САВС и селективного АПВ
SAIDI, ч/год	27,022	20,541	9,404
SAIFI, откл/год	4,504	4,504	1,999

На рис. 2 проиллюстрирована динамика снижения рассчитанных показателей после принятия предложенных мер в соответствии с таблицей 5.

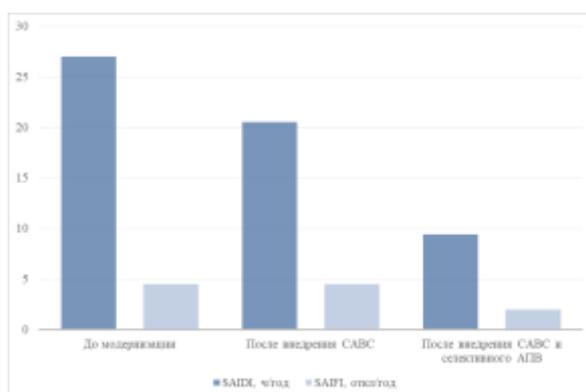


Рис. 2. Динамика снижения SAIDI, SAIFI после модернизации

Таким образом, на примере данного сетевого участка подтверждается эффективность внедрения САВС (снижение показателя SAIDI в 1,3 раза) и в целом автоматизации работы, связанной с реконfigurацией сети. Использование системы селективного АПВ на данном сетевом участке вносит большой вклад в снижение показателей SAIDI и SAIFI (снижение SAIDI в 2,18 раз, SAIFI – в 2,25 раз), поскольку внедрение селективного АПВ позволяет использовать данный вид автоматики на кабельно-воздушных линиях, где ранее АПВ не использовалось вовсе в силу значительной общей протяженности кабельных участков. В сравнении с показателями надежности до модернизации применение всех предложенных мер позволит снизить показатель SAIDI в 2,87 раз, а показатель SAIFI в 2,25 раза. Таким образом, была проведена оценка эффективности предложенных мероприятий по показателям надежности в соответствии с методикой Министерства энергетики Российской Федерации, результаты расчетов показали, что внедрение САВС и селективного АПВ может рассматриваться как эффективное мероприятие по повышению надежности распределительных электрических сетей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 29.11.2016 г. №1256 «Об утверждении методических указаний по расчету уровня надежности и качества поставляемых товаров и оказываемых услуг для организации по управлению единой национальной «общероссийской» электрической сетью и территориальных сетевых организаций»
2. СТО 34.01-2.2-032-2017. Линейное коммутационное оборудование 6-35 кВ - секционизирующие пункты (реклоузеры). ПАО «Россети», 2017
3. ГОСТ Р 52735-2007 Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1кВ.
4. Анализ работы системы автоматического восстановления электроснабжения в распределительных сетях 6-20 кВ / Х. Б. Юнусов // Международная научно-практическая конференция «Уральская горная школа - регионам», 16-17 апреля 2018. – Екатеринбург, 2018. - С. 324-325.

ASSESSMENT OF THE RELIABILITY OF THE APPLICATION OF FLISR AND SELECTIVE AUTOMATIC RECLOSING ON THE EXAMPLE OF THE PART OF THE ELECTRICAL NETWORK

¹Starostin Egor Sergeevich, post-graduate student of the Department of Energy

¹Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,
e-mail: starostin-es@list.ru

The paper considers a method for improving the reliability of electrical distribution networks using the example of a 15 kV network section. In the article, the calculation of the main indicators of the reliability of the use of FLISR and selective automatic reclosing is carried out using the example of the real network section. Comparison of the results of calculations of the reliability indicators of SAIDI and SAIFI with the existing network configuration, after the introduction of FLISR and after the implementation of FLISR and selective auto-reclosing is carried out. The effectiveness of the use of FLISR and selective auto-reclosing to reduce the average duration of power transmission interruption is shown

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ПОКАЗАТЕЛЯМИ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНЫХ АГРЕГАТОВ ВО ВРЕМЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ

¹Филиппов Евгений Анатольевич, помощник технического суперинтенданта;

²Сивуха Марина Эрнстовна, доцент кафедры «Энергетика»

¹Bulkship Management AS, Калининград, Россия, e-mail: flirt2302@gmail.com

²Калининградский государственный технический университет,
Калининград, Россия, e-mail: marina.sivukho@klgtu.ru

Приводятся результаты наблюдений за диагностическими параметрами дизель-генераторных агрегатов. Выявлено, что наиболее информативными из них является давление. Впервые показано изменение этих параметров в процессе эксплуатации действующей установки. Проведен корреляционный анализ, который позволил оценить коэффициенты корреляции для различных диагностических параметров с наработкой силовых агрегатов.

Последствия повреждений элементов судовой энергетической системы не всегда ограничиваются самым вышедшим из строя оборудованием. Их тяжесть может определяться ценой всего судна и жизнью его экипажа. В частности, повреждение фазной изоляции судовых электроэнергетических систем считается событием, которое не требует немедленного устранения. Однако их длительное существование способно привести к возникновению судовых пожаров, электротравм, нарушению электроснабжения ответственных потребителей [1, 2].

Безопасность морского судоходства во многом полагается на поддержание высокой вероятности безотказной работы судовых технических средств и систем, которая в свою очередь, обеспечивается применением планово-предупредительной системой технического обслуживания (ТО). К основным недостаткам данного подхода можно отнести: невозможность прогнозирования состояния узлов и агрегатов, большая вероятность проведения необоснованных регламентных работ, значительные трудовые и финансовые затраты. Поэтому все большее распространение получают методики, основывающиеся на техническом обслуживании по состоянию. Примером такого подхода может служить «Condition-Based Overhaul (CBO) strategy» от компании производителя двухтактных судовых дизелей MAN B&W [3].

Двигатель внутреннего сгорания (ДВС) является едва ли не главным агрегатом судовой энергетической установки на большинстве современных морских судов. Работая непосредственно на гребной вал, либо в составе дизель-генераторной (ДГ) установки ДВС обеспечивает способность судна исполнять свое фактическое назначение, а также определяет безопасность судоходства и экипажа. Если говорить о надежности ДГ агрегата, то количество отказов дизеля на порядок, больше отказов вызванных неисправностью генератора. Поэтому в данном исследовании уделим внимание именно дизельному двигателю. Одним из основных узлов дизеля является топливный насос высокого давления (ТНВД). Основным же компонентом, определяющим функциональность ТНВД считается плунжерная пара (ПП). Существуют довольно множество способов диагностирования состояния ПП, которые можно разделить на две группы. Первая группа – это стендовые испытания, например описанные в данной работе [4]. Методы, которые позволяют производить диагностику непосредственно на дизеле без разборки или с частичной разборкой ТНВД, относятся ко второй группе. Наиболее распространенными являются диагностика сигналу давления в трубке высокого давления (ТВД) и диагностика по сигналу вибрации ТВД у форсунки [5]. Все упомянутые способы практически не применимы на судах ввиду высокой трудоемкости, отсутствия соответствующего оборудования и квалификации персонала. Поэтому вопрос объективной диагностики состояния ПП экипажем остается открытым.

На сегодняшний день большое распространение получили электронные диагностические комплексы судовых дизелей, позволяющие регистрировать быстроизменяющиеся за цикл показатели рабочего процесса. Причем, к давно представленными на рынке системам периодического контроля, таким как «Kuma Diesel Analyser», «EPM XP plus», добавились системы непрерывного

контроля, например, «ССМ Marine». Например, в комплект системы фирмы «Autronic» входят: – персональный компьютер с программным обеспечением по обработке индикаторных диаграмм и принтером; – переносной или стационарно устанавливаемые тензодатчики давления газов с пределами измерения до 10...15 или 20 МПа и точностью 1%; – переносной тензодатчик измерения давления топлива с пределами измерения 0–100 или 200 МПа и точностью 1%. Допустимая температура 150 °С; – тензодатчик давления наддувочного воздуха; – индуктивный датчик для точного определения положения рабочего поршня и скорости вращения коленчатого вала. Результат измерений в виде кривых давлений и цифровых значений измеренных параметров выводятся на цветной дисплей и печатающее устройство. Встроенный в систему микропроцессор позволяет сохранять в памяти данные измерений, а также сопоставлять новые данные с прежними или эталонными. Привлекательность таких систем в получении максимального количества рабочих параметров при использовании минимального числа измерительных каналов. С другой стороны, зачастую, интерпретация полученных данных остается за обслуживающим персоналом, хотя это является вовсе не тривиальной задачей.

На рис. 1 представлен стандартный табличный отчет, генерируемый программно-измерительным комплексом в формате pdf.

	Cylinder 1 04 Jan 2022 - 00.02	Cylinder 2 04 Jan 2022 - 00.02	Cylinder 3 04 Jan 2022 - 00.02	Cylinder 4 04 Jan 2022 - 00.02	Cylinder 5 04 Jan 2022 - 00.02	Cylinder 6 04 Jan 2022 - 00.02	Cylinder 7 04 Jan 2022 - 00.02	Cylinder 8 04 Jan 2022 - 00.02	Mean	Variation	Total
Ballast 1-Loaded 2 (1-2)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	
Speed (RPM)	749.4	749.7	749.4	752.3	751.8	752.4	750.7	752.1	751.0	3.0	
Speed Knots (Knots)	11	11	11	11	11	11	11	11	11	0	
% MCR (%)	83.4	81.4	73.7	74.2	78.3	77.1	72.9	82.9	78.0	10.4	
Indicated Power (kW) (kW)	417	407	368	371	391	386	365	415	390	52	3120
MIP (bar)	20.75	20.24	18.34	18.40	19.42	19.11	18.12	20.57	19.37	2.62	
Peak Press (bar)	144	144	140	137	137	140	138	132	139	12	
Press at TDC (bar)	115	108	110	109	109	110	110	108	110	7	
Ignition Angle (°)	-2.4	-1.8	-2.2	-2.2	-1.8	-1.8	-1.0	-12.0	-3.2	11.0	
Load (%)	77.0	77.0	77.0	77.0	77.0	77.0	77.0	77.0	77.0	0.0	
Angle of Peak Press (°)	13.6	14.2	13.6	13.8	14.2	13.4	14.6	15.0	14.1	1.8	
Fuel Pump Index (°)	32.0	29.0	28.0	30.0	30.0	30.0	28.0	30.0	29.6	4.0	
Gov Index (°)	49.0	49.0	49.0	49.0	49.0	49.0	49.0	49.0	49.0	0.0	
Texh (Deg C)	415	415	415	410	405	405	410	405	410	10	
Turbo In (Deg C)	560	560	560	560	560	560	560	560	560	0	
Turbo Out (Deg C)	445	445	445	445	445	445	445	445	445	0	
Turbo (RPM)	17500	17500	17500	17500	17500	17500	17500	17500	17500	0	
Scavenge Press (bar)	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	0.00	
Air Charge Temp. (Deg C)	36.9	36.9	36.9	36.9	36.9	36.9	36.9	36.9	36.9	0.0	
Seawater Temp (Deg C)	20	20	20	20	20	20	20	20	20	0	
Cyl Jacket WC Out (Deg C)	82	82	82	82	82	82	82	82	82	0	
Fuel Visc (cSt)	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	0.0	
Fuel Temp (Deg C)	75.7	75.7	75.7	75.7	75.7	75.7	75.7	75.7	75.7	0.0	
Fuel consumption (ml/day)	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0	0.0	
Receiver (Deg C)	47	47	47	47	47	47	47	47	47	0	
Tot Running (Hrs)	56353	56353	56353	56353	56353	56353	56353	56353	56353	0	

Рис. 1. Электронный отчет программного комплекса «Doctor Diesel» после индицирования двигателя

Рассмотрим возможность оценить техническое состояние плунжерной пары двигателя MAN B&W 8L32/40 диагностической системой «Doctor Diesel» компании Icon Research ltd. Данная система состоит: пьезоэлектрического датчика давления, устанавливаемого на индикаторный клапан цилиндра во время индицирования двигателя; индуктивный датчик угла поворота коленчатого вала, стационарно установленный на маховике; переносное регистрирующее устройство, непосредственно к которому подключаются датчики и программного обеспечения на основе ОС Windows.

Так же в результате обработки сигналов строятся свернутые и развернутые индикаторные диаграммы. Из представленных в отчете показателей: частота вращения, нагрузка двигателя в процентах от максимальной, индикаторная мощность (N_i), среднее индикаторное давление (P_i), максимальное давление сгорания (P_z), давления в конце сжатия (P_c), угол опережения зажигания ($\varphi_{оз}$), угол максимального давления (φ_z) регистрируются и выводятся системой. Все остальные параметры вводятся вручную. Для анализа были взяты данные с января 2022 года по настоящий момент, измерения при этом проводились раз в месяц.

Для установления количественной связи между состоянием плунжерной пары и параметрами рабочего процесса рассчитаем коэффициенты корреляции. Расчетная формула при парной корреляции имеет вид:

$$r = \frac{\overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\sigma_x \sigma_y}, \quad (1)$$

где $\bar{x} = \frac{\sum x}{n}$, $\bar{y} = \frac{\sum y}{n}$ - среднее значение факторного и результативного признаков;

$\overline{xy} = \frac{\sum xy}{n}$ - среднее значение произведений факторного и результативного признаков;

$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum x^2}{n} - (\bar{x})^2}$, $\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum y^2}{n} - (\bar{y})^2}$ - средние квадратические отклонения факторного и результативного признаков.

Нужно признать, что количественной оценки состояния плунжерной пары нет и в данном случае мы принимаем – чем больше наработка, тем хуже состояние, и 15000 часов – максимальная наработка на отказ, требующая замены.

Проверка на корреляцию методом квадратов всех параметров, регистрируемых самой диагностической системой с временем наработки плунжерных пар, показала слабую связь, коэффициент корреляции $|r| < 0,55$.

В диагностике судовых многоцилиндровых дизелей известны методы, основанные на использовании так называемых симплексов, то есть вычисляемых критериев, зависящих от совокупности значений определенного набора параметров рабочего процесса двигателя. В нескольких работах, например в [6], обоснована целесообразность применения в качестве такого симплекса отношения давления в конце сжатия P_c к температуре отработавших газов на выходе из цилиндра $T_{ог}$. В процессе анализа имеющихся данных было выявлено, что температура выхлопных газов с течением времени имеет тенденцию к уменьшению вне зависимости от цилиндра и времени наработки. Возможная причина - деградация измерительного канала. Поэтому температура выхлопных газов была исключена из набора рассматриваемых параметров. Так же, в рамках данного исследования не рассматривались параметры, вводимые вручную, так как, во-первых, калибровка измерительных приборов не проводилась, во-вторых, документальных подтверждений объективности зарегистрированных показаний нет.

В же самое время, такой производный параметр, как разность максимального давления и давления в конце сжатия ($P_z - P_c$) показал на нескольких цилиндрах однозначную сильную обратную корреляцию $|r_{xy}| > 0,7$. Исходя из формы зависимости рассчитано линейное уравнение регрессии с помощью решения системы уравнений:

$$\begin{cases} \sum y = na_0 + a_1 \sum x \\ \sum xy = a_0 \sum x + a_1 \sum x^2 \end{cases} \quad (2)$$

На рис.2 представлены зависимости для цилиндров с сильной обратной связью и графики уравнений регрессии.

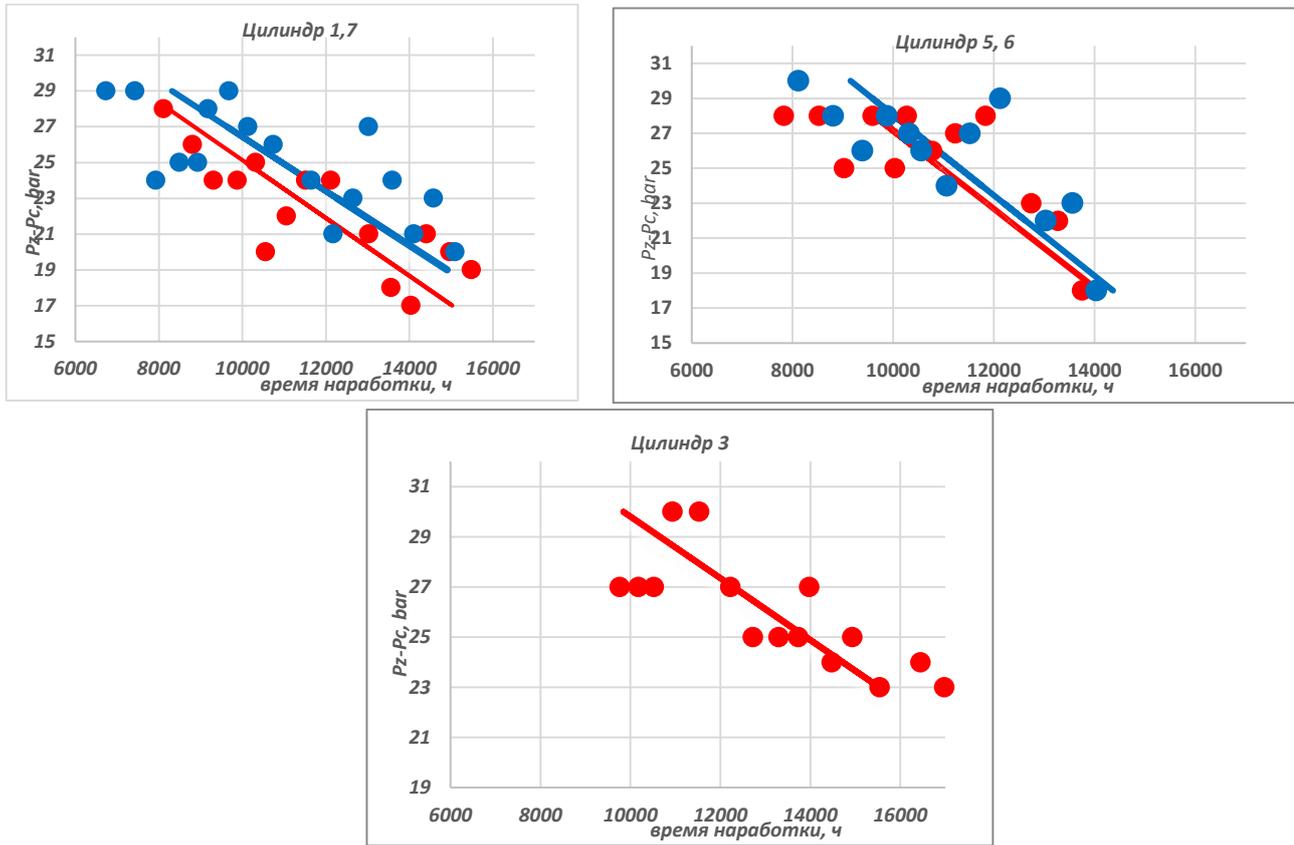


Рис. 2. Графики зависимости ($P_z - P_c$) от наработки плунжерной пары и уравнение регрессии для цилиндра 1,3,5,6 и 7

Расчеты показывают, что сужение рассматриваемого диапазона в сторону увеличения наработки часов значительно увеличивает коэффициент корреляции и наоборот. В некоторых исследованиях говорится, что воздействие износа ПП на процесс впрыскивания имеет нелинейную зависимость и до определенного момента не оказывает влияния. Однако при превышении определенной границы последствия изнашивания значительно возрастают [7]. В подтверждение к этому значимых значений коэффициента корреляции после замены плунжерных пар на обозначенных цилиндрах не наблюдается. Сама разность P_z и P_c увеличивается.

Для трех остальных цилиндров значимых зависимостей не было выявлено. На представленных на рис.3 графиках видно, что со увеличением времени наработки плунжерной пары направленных изменений, обозначенного показателя ($P_z - P_c$) не наблюдается.

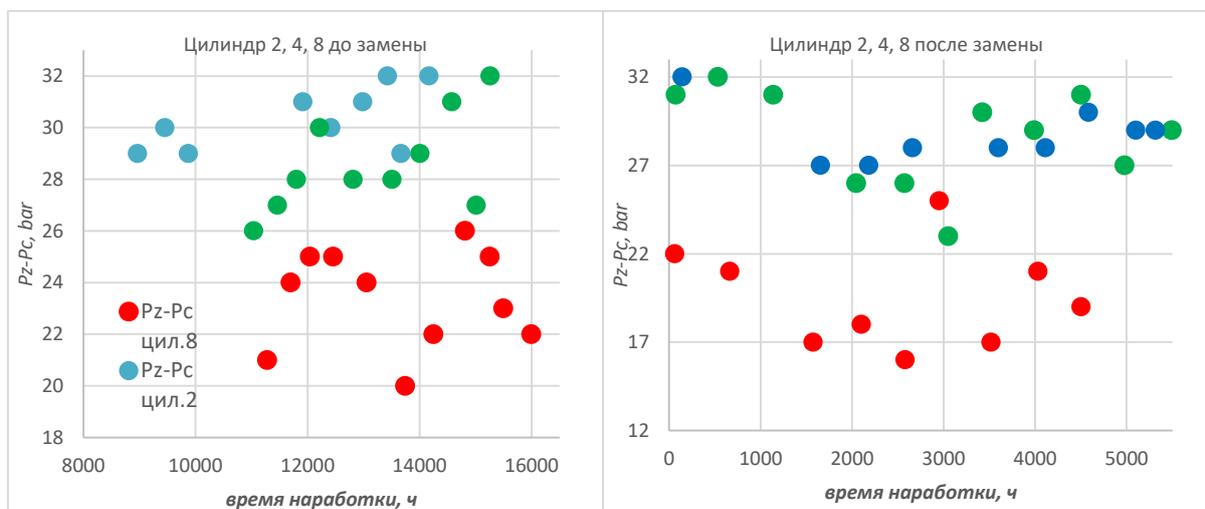


Рис. 3. Графики зависимости ($P_z - P_c$) от наработки плунжерной пары для цилиндра 2,4,8

Для цилиндров 2и 4 его среднее значение момент замены составляет 31bar и 29 bar соответственно, что много выше, чем для других цилиндров. После замены ПП разность давлений

практически остается на том же уровне. На цилиндре 8 рассматриваемая нами характеристика находилась на уровнях, близких с третьим цилиндром, но после замены не только не увеличилась, но даже наблюдается незначительная деградация.

Выводы

На основании проведенного анализа показателей индикаторной диаграммы четырехтактного двигателя MAN B&W 8L32/40 было выявлено:

1. Сильная обратная корреляционная связь между наработкой часов плунжерной пары и разности максимального давления и давления сжатия на пяти цилиндрах из восьми.
2. Вид этих зависимостей говорит о нелинейной взаимосвязи показателей процесса впрыска от износа плунжерной пары.
3. Наличие цилиндров с неподтвержденной корреляционной зависимостью, рассматриваемой разности давлений с наработкой ПП, пока не может гарантировано подтвердить или опровергнуть наблюдения.
4. Для дальнейших исследований будут взяты параметры индицирования двигателей такого же типа на однотипных судах, за более широкий промежуток времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. MAN Diesel A/S. Condition-based Piston overhaul MC/MC-C and ME/ME-C type engines Container Vessels, Bulk Carriers and vessels with similar trade pattern. SL07-483/HHR, 2007.
2. 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.
3. Кажекин И.Е. Управление феррорезонансным контуром в низковольтных судовых электросетях с компенсированной нейтралью / И.Е. Кажекин // Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 4-3 (58). С. 59-64.
4. Лебедев А. Т. Закономерности изменения параметров топливоподачи от технического состояния плунжерных пар ТНВД / А. Т. Лебедев, П. А. Лебедев, Р. А. Магомедов и др. // Сборник научных трудов Sworld. – 2012. – Т.7. - №4. – С. 58
5. Коньков А. Ю., Яранцев М. В. Диагностика износа плунжерной пары насоса высокого давления на рабочих режимах дизеля // Ученые заметки ТОГУ. – 2014. – Т. 5. – №. 1. – С. 338-344.
6. Диагностические параметры главных судовых малооборотных дизелей / Л. Л. Грицай, В. Ф. Горбунов, В. Н. Калугин, Б. М. Левин // Труды ЦНИИМФа. – 1973. – Вып. 174. – С. 3–19.
7. Ильин А. И. Расчет величины предельно допустимого износа плунжерных пар / А. И. Ильин, В. М. Савин // Московский институт инженеров железнодорожного транспорта. Усовершенствование конструкций тепловозов, 1970. - №332. – С. 39-42.

THE RESULTS OF MONITORING THE PERFORMANCE OF DIESEL GENERATOR SETS DURING OPERATION

¹Filippov Evgeny Anatolievich, Technical Superintendent Assistant;

²Sivukho Marina Ernstovna, Associate Professor of the Department of "Energy"

¹Bulkship Management AS, Kaliningrad, Russia, e-mail: flirt2302@gmail.com

²Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia, e-mail: marina.sivukho@klgtu.ru

The article presents the results of the diagnostic parameters of diesel generator sets. It was found that the most informative of them is pressure. For the first time, changes in these parameters during the operation of the operating plant are shown. A correlation analysis has been carried out, which makes it possible to evaluate the coefficients of correspondence for various diagnostic parameters with the operation of power units.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТОДИОДНЫХ ЛАМП ПРИ ОТКЛОНЕНИИ ЧАСТОТЫ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

¹Харитонов Максим Сергеевич, канд. техн. наук, доцент кафедры энергетики;

²Дурманов Алексей Сергеевич, студент магистратуры кафедры энергетики

^{1,2}Калининградский государственный технический университет,
Калининград, Россия, e-mail: mskharitonov@mail.ru

Рассмотрен вопрос влияния отклонения частоты питающего напряжения на электропотребление светодиодных ламп. Представлена экспериментальная установка для исследования электроприемников при отклонении частоты питающего напряжения. Приведены результаты экспериментальных исследований ряда светодиодных ламп и дан анализ полученных статических характеристик нагрузки по частоте.

Системы искусственного освещения объектов морской индустрии обеспечивают безопасное протекание технологического процесса. В зависимости от типа объекта и режима его работы доля осветительной нагрузки в общем энергобалансе может быть значительной, при этом возрастает её влияние на режим функционирования системы электроснабжения. Распространенным подходом к описанию взаимосвязи между режимом работы осветительной нагрузки и параметрами электрической сети является использование статических характеристик нагрузки по напряжению и частоте. В условиях перехода от ламп накаливания и газоразрядных ламп к более эффективным светодиодным источникам света актуальной является задача исследования статических характеристик нагрузки (СХН) по частоте для светодиодных осветительных приборов.

В синхронных и изолированных электроэнергетических системах уровень напряжения определяется балансом реактивной мощности, а значение частоты – балансом активной мощности. При этом на процесс регулирования оказывают влияние СХН потребителей. В большей степени это влияние характерно для автономных береговых и плавучих объектов морской индустрии, для которых ГОСТ 32144-2013 [1] и Правилами регистра [2] установлены допустимые отклонения частоты 10%. В условиях отклонения частоты питающего напряжения СХН светодиодных осветительных приборов (ОП) могут существенно отличаться от СХН типового комплексного узла нагрузки (рис. 1а) [3], поскольку электрические характеристики светодиодных ОП во многом определяются конструкцией драйвера (рис. 1б) [4], обеспечивающего питание светодиодов.

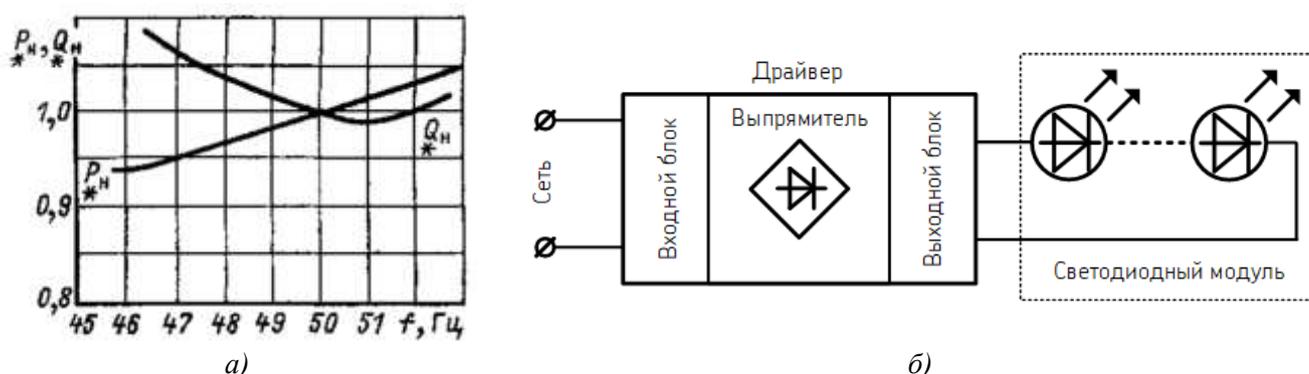


Рис. 1. Статическая характеристика типового комплексного узла нагрузки по частоте (а), структурная схема светодиодного осветительного прибора (б)

Для исследования светодиодных ламп в условиях отклонения частоты питающего напряжения была разработана экспериментальная установка (рис. 2). В качестве источника переменного тока регулируемой частоты использован электромашинный преобразователь, состоящий из двигателя постоянного тока (ДПТ) и синхронного генератора (СГ). Регулирование частоты вращения

ротора генератора осуществляется изменением напряжения на якоре ДПТ. Для поддержания неизменного напряжения на зажимах генератора при изменении частоты выполняется коррекция тока возбуждения СГ. Контроль частоты осуществляется с помощью многофункционального измерительного прибора ЩМ120, а измерение электрических характеристик – с помощью анализатора качества электроэнергии Fluke 434.

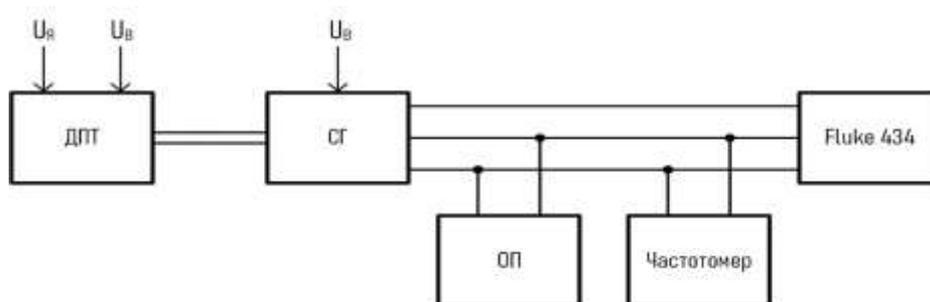


Рис. 2. Структурная схема экспериментальной установки для регистрации СХН по частоте

С учетом упомянутых особенностей драйверов светодиодных ОП для целей исследования приняты два образца светодиодных ламп мощностью 6 Вт (образец 1) и 9 Вт (образец 2) с различным характером зависимости электрических характеристик от параметров питающего напряжения. В частности, на рис. 3 приведены статические характеристики исследуемых ламп по напряжению, имеющие очевидные различия (единицы по оси напряжения рассчитаны относительно номинального значения 230 В).

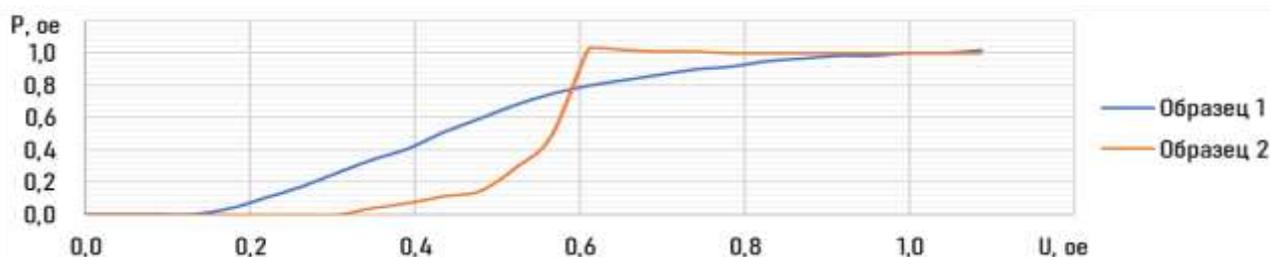


Рис. 3. Статические характеристики исследуемых ламп по напряжению

Результаты экспериментальных исследований характеристик светодиодных ламп при отклонении частоты питающего напряжения приведены на рис. 4 и рис. 5. На диаграммах относительные единицы по оси частоты рассчитаны относительно значения 50 Гц, по оси электрических характеристик – относительно номинальных значений при частоте 50 Гц.

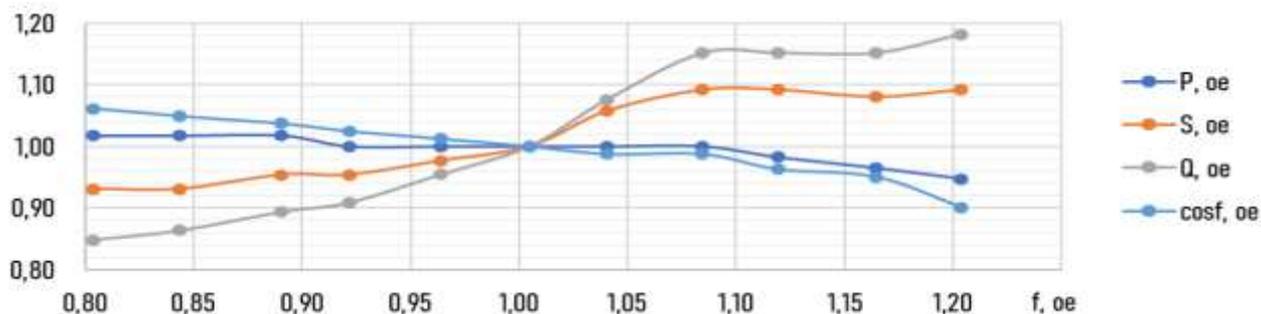


Рис. 4. Зависимость электрических характеристик от частоты для образца № 1

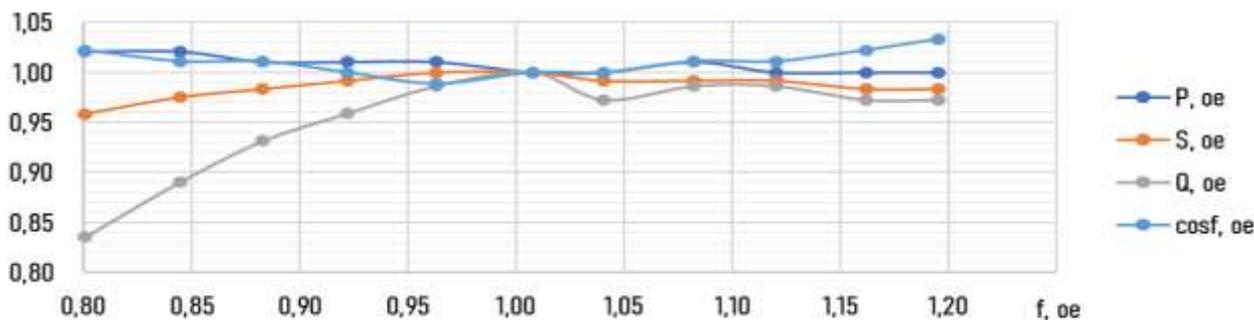


Рис. 5. Зависимость электрических характеристик от частоты для образца № 2

Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что характер зависимости потребляемой активной и реактивной мощности исследуемых образцов от изменения частоты в пределах от 40 до 60 Гц значительно отличается от статических характеристик комплексного узла по частоте (рис. 1). В частности, для обоих образцов наблюдается непрерывное снижение активной мощности при увеличении частоты на всем исследуемом диапазоне и увеличение реактивной мощности при увеличении частоты в диапазоне от 40 до 51 Гц. При увеличении частоты свыше 51 Гц характер изменения реактивной мощности у исследуемых образцов различается.

Таким образом, статические характеристики нагрузки по частоте для светодиодных ОП могут отличаться от зависимостей для комплексного узла нагрузки. Несмотря на то, что ОП не являются преобладающей нагрузкой по установленной мощности, на некоторых объектах в определенных режимах работы доля осветительной нагрузки в общей структуре потребления может быть значительна, что подтверждает актуальность данного направления исследований для оценки перспектив изменения характеристик комплексной нагрузки при масштабном переходе систем освещения на новых технологический базис.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [Текст]. – Введ. 01-07-2014. – 19 с.
2. Правила классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства. Часть XI Электрическое оборудование. НД № 2-020101-174. – Санкт-Петербург, 2023.
3. Идельчик В.И. Электрические системы и сети: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.
4. Белей, В. Ф. Результаты исследований энергетических параметров и характеристик светодиодных ламп / В. Ф. Белей, М. С. Харитонов, Г. В. Коцарь // Светотехника. – 2023. – № 1. – С. 59-64.

RESEARCH OF LED LAMPS CHARACTERISTICS UNDER CONDITIONS OF SUPPLY VOLTAGE FREQUENCY DEVIATION

¹Kharitonov Maxim, Dr.-Ing., Associate Professor of the Department of Energy;

²Durmanov Alexey, master student of the Department of Energy

^{1,2}Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia, e-mail: mskharitonov@mail.ru

The article considers the issue of supply voltage frequency deviation influence on the power consumption of LED lamps. An experimental unit is presented for studying electrical equipment when the frequency of the supply voltage deviates. The results of experimental studies of a number of LED lamps are presented and an analysis of the obtained static characteristics of the load by frequency is given.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНЫХ И ВАЛОГЕНЕРАТОРНЫХ УСТАНОВОК НА МОРСКИХ СУДАХ

¹Шабалин Леонид Дмитриевич, канд. техн. наук, доцент;

²Савенко Александр Евгеньевич, канд. техн. наук, доцент;

³Савенко Павел Станиславович, аспирант

¹Калининградский государственный технический университет,
Калининград, Россия, e-mail: shabalin44@mail.ru

^{2,3}ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», Республика Крым, Керчь, Россия, e-mail: savenko-70@mail.ru

Рассмотрено применение параллельной работы дизель-генераторных и валогенераторных установок в электротехнических комплексах морских судов. Отмечено влияние инерционности регуляторов оборотов дизель генераторных и валогенераторных установок с синхронными генераторами, а также регуляторов вырабатываемого напряжения на распределение активной и реактивной мощностей. Такие явления вызывают выпадение синхронного генератора из синхронизма и обесточивание судна. Приведены результаты математического моделирования, подтверждающие влияние инерционности регуляторов на параллельную работу синхронных генераторов. Методами математического моделирования установлена возможность снизить провалы напряжения в судовой сети и осуществлять параллельную работу валогенератора и дизель-генераторов при помощи дополнительной экспертной системы и инверторного преобразования выпрямленного напряжения валогенератора.

Введение

В качестве дизель-генераторного агрегата понимается комплекс дизельного двигателя и жестко соединенного с его выходным валом синхронным генератором. Если генератор приводится во вращение от главного двигателя судна, то он называется валогенератором [1,2]. Системы автоматического управления воздействуют на регуляторы оборотов генераторных установок и на их регуляторы напряжения от самого начала переходного процесса при подготовке параллельной работы и до ее окончания [3]. В течение всего этого времени параллельной работы системы управления, воздействуя на регуляторы, распределяет активную и реактивную нагрузки [4].

Разработаны и применяются системы судовой автоматики, которые достаточно успешно, с учетом требований Морского Регистра, справляются с возложенными на них задачами, однако, регуляторы частоты вращения и напряжения синхронных генераторов, а также объекты управления, на которые они воздействуют, обладают инерционностью, серьезно влияющей на распределение активной и реактивной мощностей [5]. Существует необходимость создания такой системы автоматического управления, которая бы компенсировала неравномерное распределение мощности, возникающее вследствие наличия инерционности [6]. Для анализа такой возможности необходимо провести исследования параллельной работы генераторных агрегатов при помощи математического моделирования.

Общие сведения о математическом моделировании электротехнических комплексов морских судов

Основными источниками электрической энергии в судовых электростанциях являются синхронные генераторы. При математическом моделировании целесообразно использовать уравнения синхронного генератора в относительных единицах величин. Так как нас интересует работа генератора в переходных режимах, то составляем уравнения по законам Кирхгоффа всех его цепей. Кроме того, описываем взаимное влияние потокоцеплений обмоток генератора с токами, протекающими в его обмотках, представленными во вращающихся осях координат [7].

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{f1} = \frac{h_{f1} - \frac{x_{ad1}}{x_{f1}} \cdot \psi_{D1} + \left[\frac{(x_{ad1})^2}{x_{f1}} - \frac{(x_{ad1})^3}{x_{f1} \cdot x_{rd1}} \right] \cdot i_{d1}}{\frac{(1 - x_{ad1})^2}{x_{f1} - x_{rd1}}}; \\ i_{D1} = \psi_{D1} + \frac{(x_{ad1})^2}{x_{rd1}} \cdot i_{d1} - \frac{x_{ad1}}{x_{rd1}} \cdot i_{f1}; \\ i_{Q1} = \psi_{Q1} - \frac{(x_{aq1})^2}{x_{rq1}} \cdot i_{q1}; \\ \psi_{d1} = -x_{d1} \cdot i_{d1} + i_{f1} + i_{D1}; \\ \psi_{q1} = x_{q1} \cdot i_{q1} + i_{Q1}. \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{d1} = (1 + s_1) \cdot \psi_{q1} - r_1 \cdot i_{d1}; \\ u_{q1} = (1 + s_1) \cdot \psi_{d1} - r_1 \cdot i_{q1}; \\ m_1 = \psi_{d1} \cdot i_{q1} + \psi_{q1} \cdot i_{d1}; \\ p\psi_{f1} = \frac{1}{T_{do1}} \cdot (u_{f1} - i_{f1}); \\ p\psi_{D1} = -\frac{1}{T_{D1}} \cdot i_{D1}; \\ p\psi_{Q1} = -\frac{1}{T_{Q1}} \cdot i_{Q1}; \\ ps_1 = \frac{1}{T_{J1}} \cdot (m_{e1} - m_1). \end{array} \right.$$

Каждый синхронный генератор имеет регулятор напряжения. Описываем классический регулятор с амплитудно-фазовым компаундированием [7].

$$\left\{ \begin{array}{l} u_f = i_f \cdot E; \\ pE = \frac{1}{T_{кн}} \cdot [k_{кн} \cdot (u - u_{уст}) - E]; \\ 0 \leq u_f \leq u_{f \max}; \\ E_{\min} \leq E \leq E_{\max}. \end{array} \right.$$

Принимаем постоянную времени корректора напряжения $T_{кн}=0,1с$; коэффициент усиления корректора напряжения $k_{кн}=2$; диапазон изменения сигнала величины тока возбуждения $\Delta k_{кн}$ составляет $\pm 10\%$ от постоянного значения. Приведенные уравнения с достаточной степенью точности отражают действие регулятора напряжения.

В электроэнергетических системах статическая (трехфазная симметричная)

Моделируем активно-индуктивную нагрузку симметричную по трем фазам [7]:

$$\begin{cases} u_d = r_n \cdot i_{dn} - x_n \cdot i_{qn} + x_n \cdot \frac{1}{\omega} \cdot p i_{dn}; \\ u_q = r_n \cdot i_{qn} - x_n \cdot i_{dn} + x_n \cdot \frac{1}{\omega} \cdot p i_{qn}, \end{cases}$$

где индекс «н» означает параметр нагрузки генератора.

Уравнения асинхронного электродвигателя получены аналогично уравнениям синхронного генератора с выполнением тех же условий.

Уравнения связи для токов получаем в виде [7]:

$$\begin{cases} i_{d2} \cdot \cos \theta_{12} + i_{q2} \cdot \sin \theta_{12} + i_{d1} = \sum_{(1,2..n)} i_{d2}; \\ -i_{d2} \cdot \sin \theta_{12} + i_{q2} \cdot \cos \theta_{12} + i_{q1} = \sum_{(1,2..n)} i_{q2}. \end{cases}$$

Аналогично для напряжений имеем:

$$\begin{cases} u_{d2} \cdot \cos \theta_{12} + u_{q2} \cdot \sin \theta_{12} = u_{d1}; \\ -u_{d2} \cdot \sin \theta_{12} + u_{q2} \cdot \cos \theta_{12} = u_{q1}. \end{cases}$$

Уравнение динамики ГД имеет следующий вид в относительных единицах:

$$T_d \cdot \dot{\varphi} + \varphi = -a_1 \cdot \zeta + a_2 \cdot v_n + a_3 \cdot \mu + k_p \cdot \varphi_p + a_4 \cdot f(t),$$

где T_d – постоянная времени двигателя;

Регулятор скорости вращения дизеля описываем следующим образом

$$\begin{aligned} z_n \cdot \eta &= k_y \cdot \varphi - k_x \cdot x_{зад} - k_y \cdot y_{oc}, \\ \left[T_i T_s \delta_n p^2 + \left[T_c \delta_n + T_i (j k_\phi \delta_n + \delta_p) \right] p + \delta_p \right] \cdot \mu &= -(T_{ip} + 1), \\ T_c p \zeta + \zeta &= \zeta_{зад}, \end{aligned}$$

T_c – постоянная времени серводвигателя, с.

Введем ограничение угла разворота ВРШ

$$\zeta_{\min} \leq \zeta_{зад} \leq \zeta_{\max},$$

где ζ_{\min} , ζ_{\max} – относительный минимальный и максимальный шаг ВРШ.

Считаем, что изменение нагрузки на гребном валу судна представляет собой стационарный процесс, а параметры такой системы являются функциями времени. При этом учитываются только те нелинейности, которые оказывают существенное влияние на работу системы. В ходе математического моделирования рассматривается регулярное волнение морской воды.

Таким образом, характер изменения момента нагрузки на ВРШ, имеет вид [7]:

$$f(t, \varphi) = 2\varphi - \varphi^2 + (1 - \varphi) [\gamma_a (1 - m_a) - \gamma_a \varphi] \cdot \sin \omega t,$$

где γ_a – коэффициент момента ВРШ,

$$\gamma_a = h'_a \cdot \frac{C_{2h} \cdot \left(\frac{H}{D} \cdot \lambda_m \right)}{K_{2a}},$$

h'_a – степень погружения винта;

C_{2h} – коэффициент колебаний момента ВРШ;

$$K_{2a} = \gamma_a \cdot \left(1 - \frac{m_a}{n'} \right);$$

$$m_a = \frac{\lambda_{p0}}{n_a} \left[\frac{dh''}{d\lambda_p} - \frac{dC_{2h}}{dh_p} (h'_a - h'_n) \right] \lambda_{p0};$$

$$h'' = h'_n - h_0 + 2;$$

h_0 – степень погружения ВРШ в тихой воде;

h'_n – ограничение погружения ВРШ.

Уравнения динамики отдельных элементов машинно-двигательного комплекса судна образуют систему уравнений, описывающих работу привода валогенератора. В систему, описывающую привод валогенератора, входят следующие уравнения [7]:

$$\begin{cases} T_d p \varphi + \varphi = -a_1 \cdot \zeta + a_3 \cdot \mu + a_4 \cdot f(t); \\ T_i \cdot T_s \cdot \delta_n p^2 \mu + [T_c \cdot \delta_n + T_i (\gamma k_\phi \cdot \delta_n + \delta_p)] p \mu = -(T_i p + 1) \phi; \\ T_s \cdot p \zeta + \zeta = \zeta_{зад}; \\ f(t, \varphi) = 2\varphi - \varphi^2 + (1 - \varphi) [\gamma_a (1 - m_a) - \gamma_a \varphi] \sin \omega t; \\ \zeta_{\min} \leq \zeta_{зад} \leq \zeta_{\max}. \end{cases}$$

Судовая дизельная установка рассматривается мной с сосредоточенными параметрами, динамические свойства которых описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями.

Уравнение динамики приводного двигателя имеет вид [7]:

$$(T_a p + 1) \varphi = k_m \cdot \mu_{об} - k_\lambda \cdot \lambda,$$

где $\varphi = \Delta \omega / \omega_{ном}$;

$$\mu_{об} = \square h_T / \square h_{Тном};$$

$$\lambda = C_m / C_{ном};$$

$$T_a = I_{оном} / M_{ном};$$

$$k_m = k_h / z$$

$$k_h = dM_\phi / dh_m$$

h_T – ход рейки топливного насоса;

z – момент инерции масс вала дизеля;

M_ϕ – двигательный момент;

C – нормирующий коэффициент.

В относительных единицах это уравнение имеет вид:

$$[T_e T_s \delta_n p^2 + (T_e \delta_p + T_s \delta_n) p + \delta_p] \cdot \mu_p = -(T_e p + 1) \phi - k_\lambda \delta_n \lambda,$$

где T_e – постоянная времени усилителя корректирующего входа;

λ – характеристика нагрузки дизеля.

Система уравнений дизеля с регулятором частоты записывается в виде [7]:

$$\begin{cases} (T_a p + 1)\phi = k_m \mu_{ob} - k_\lambda \cdot \lambda; \\ \left[T_e T_s \delta_n p^2 + (T_e \delta_p + T_s \delta_n) p + \delta_p \right] \cdot \mu_p = -(T_e p + 1)\phi - k_\lambda \delta_n \lambda \end{cases}$$

Результаты исследования и обсуждение

В общем случае, валогенератор и дизель-генератор работают параллельно на общую судовую электрическую сеть. Судовая автоматика следит за режимом работы валогенератора, и выравнивает напряжение на дизель-генераторе в соответствии с генерируемым напряжением на валогенераторе, что позволяет валогенератору не выпадать из синхронизма в случае резкого изменения нагрузки на гребном валу.

Обменные (рис. 1) и синфазные (рис. 2) колебания мощности [8], возникающие при совместно-параллельной работе дизель-генераторных установок в судовом электротехническом комплексе, оказывают дополнительное отрицательное воздействие на системы автоматического управления и устойчивость параллельной работы. Совокупность переходных процессов при изменении нагрузки на валу гребного винта, а значит, на валогенераторной установке, а также обменных и синфазных колебаний мощности является наиболее тяжелым режимом параллельной работы, способным привести к обесточиванию судна и возникновению аварийной ситуации [9].

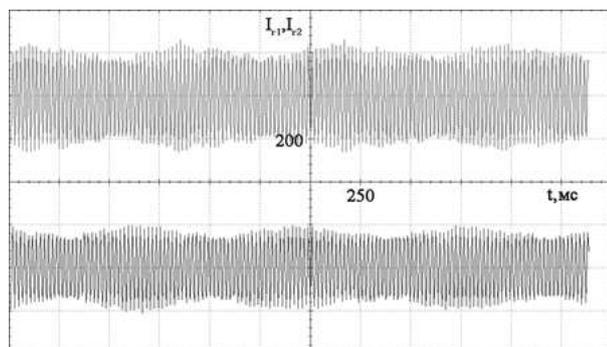


Рисунок 1 – Обменные колебания мощности

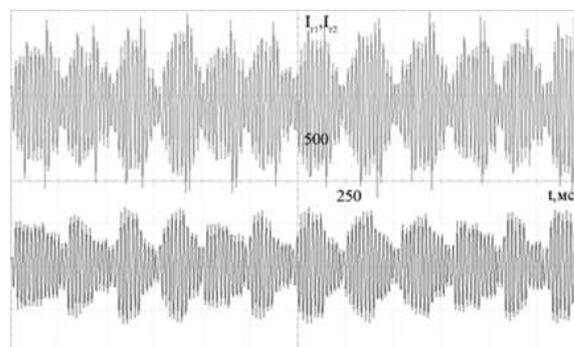


Рисунок 2 – Синфазные колебания мощности

Полученное математическое описание электротехнического комплекса морского судна состоит из элементов различной структуры. Для поиска решения совокупности дифференциальных уравнений при проведении исследований задействовано моделирование с переменным шагом обработки данных.

На рисунках 3 и 4 представлены результаты моделирования пускового режима мощной асинхронной нагрузки на судовую сеть, с параллельно работающими дизель-генераторной и валогенераторной установками. Здесь мы видим переходный режим тока, напряжения и активной мощности генераторов. Режим длится от 0 до 1сек.

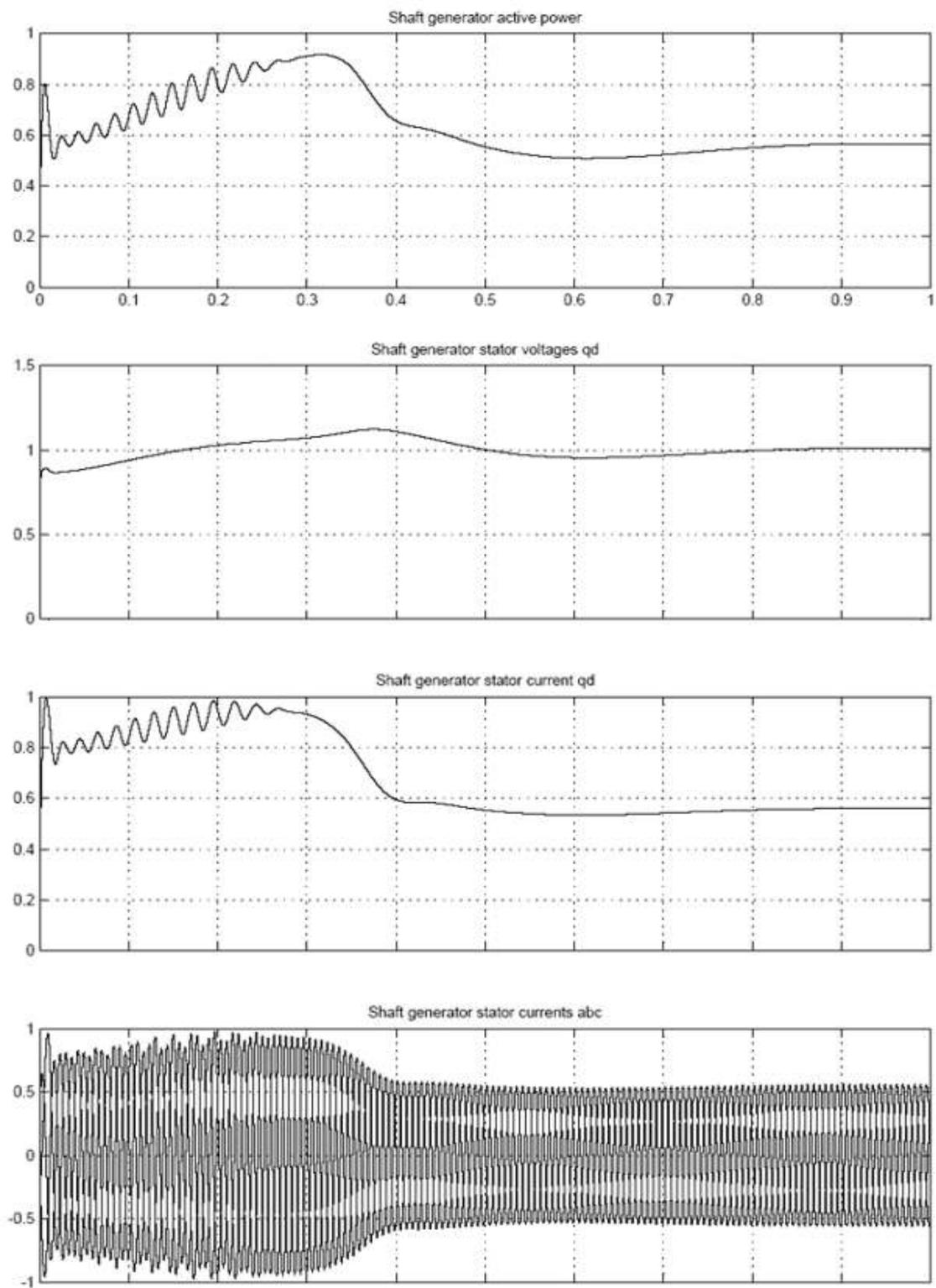


Рисунок 3 – Активная мощность, напряжение и ток валогенератора

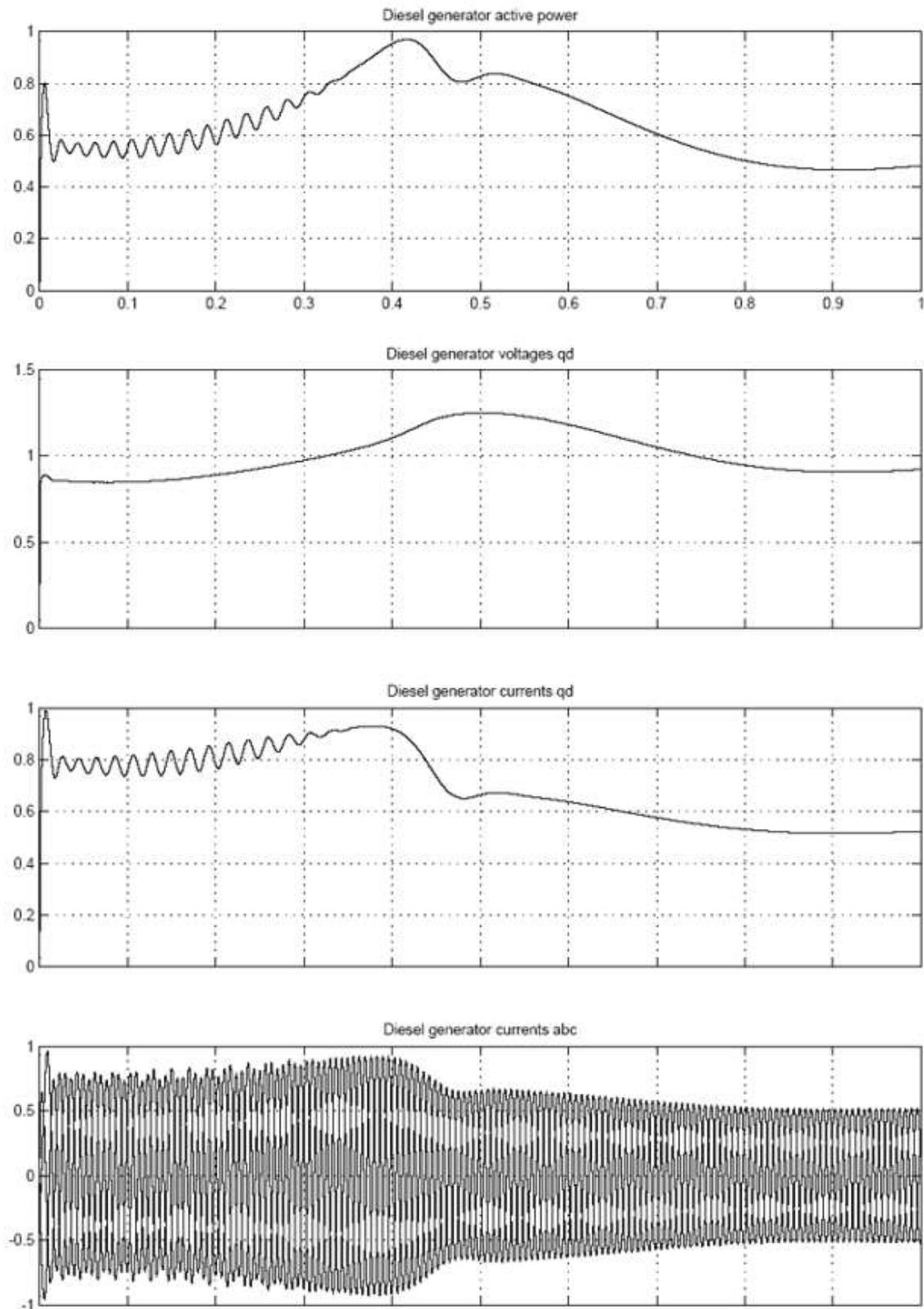


Рисунок 4 – Активная мощность, напряжение и ток дизель-генераторной установки

Полученные результаты исследования показывают выход дизель-генераторной и валогенераторной установок на номинальные параметры эксплуатации в течение 1сек.

При учете в модели неравномерности вращения гребного вала - генерируемое напряжение на валогенераторе резко «просядет», после чего регулятор напряжения начнёт выводить напряжение на прежнее номинальное значение (рис. 5). Однако, весь процесс стабилизации параметров валогенераторной установки занимает 2-3 секунды. Если в течение этого времени дизель-генераторный агрегат или несколько параллельно работающих таких установок продолжают рабо-

тать без изменения их настроек, то обменные и синфазные колебания мощности усилятся колебаниями длительного переходного процесса, что приведет к разбалансировке всей параллельно работающей системы синхронных генераторов, они начнут поочередно выходить из синхронизма и электротехнический комплекс судна окажется в аварийном режиме работы.

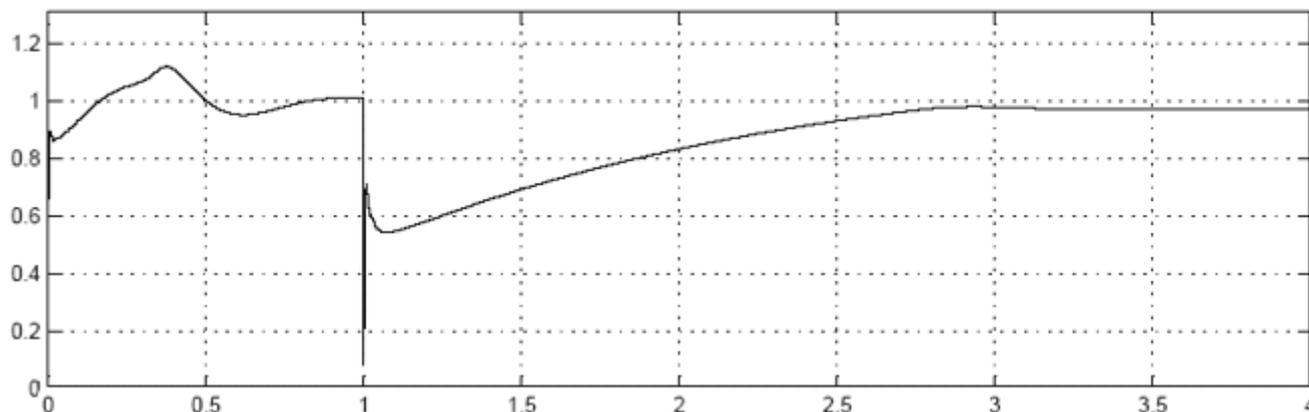


Рисунок 5 – Характеристика напряжения на валогенераторе при неравномерной скорости вращения гребного винта

Для предотвращения такой ситуации можно обеспечить максимальное приближение напряжений на дизель-генераторах к напряжению валогенераторной установки в течение всего времени стабилизации параметров валогенератора. Этого можно достичь, например, введением в работу корректирующего звена с необходимыми параметрами [10], результаты представлены на рисунке 6.

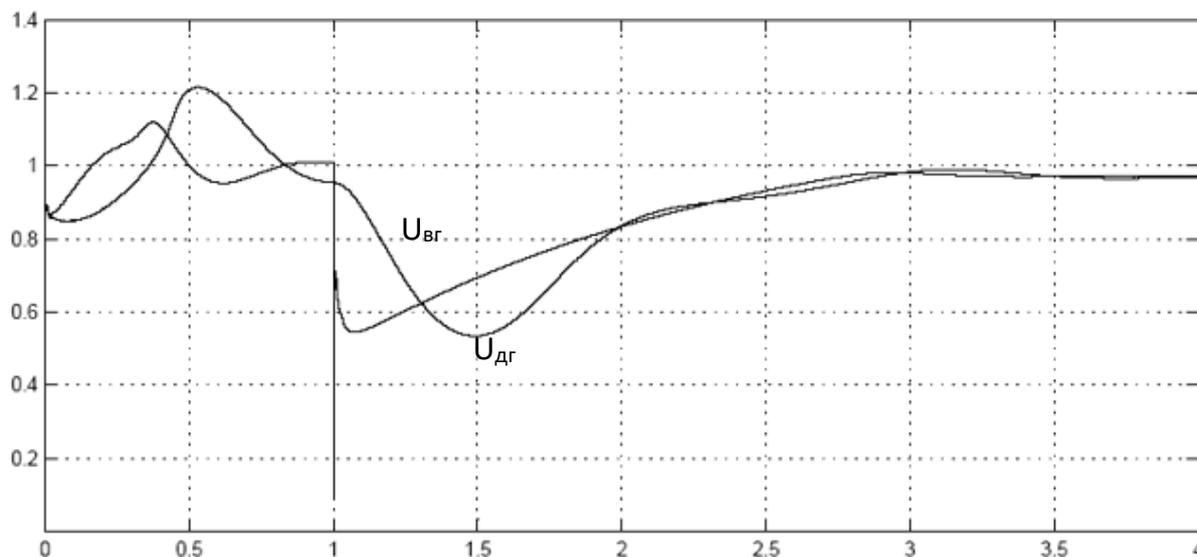


Рисунок 6 – Напряжения валогенератора $U_{вг}$ и дизель-генератора $U_{дг}$ при стабилизации параметров

Однако, это не исключает полностью, а лишь возможно сокращает время стабилизации переходного режима. Кроме того, даже непродолжительная работа на сниженной частоте вращения приведет к снижению частоты судового напряжения, что неблагоприятно сказывается на работе судовых потребителей, как двигательной асинхронной нагрузки, так и систем автоматического и электронного управления. Кроме того, блок устранения обменных колебаний мощности, в случае его установки на судно, не сможет полноценно выполнять свои функции в течение времени стабилизации переходного процесса. Очевидно, также, что такие провалы частоты, а значит и периоды стабилизации могут повторяться постоянно из-за волнения моря и режимов работы судна в целом.

Очевидно, что такой метод требует определенных затрат и дополнительных исследований в реальных электротехнических комплексах морских судов. Также необходимо еще раз отметить,

что блок устранения обменных колебаний мощности предусматривает работу в квазиустановившихся режимах работы. Поэтому, наиболее перспективным является преобразование переменного напряжения валогенераторной установки в постоянное напряжение, а затем обратное его преобразование в переменное при помощи инверторов. При таком методе параметры работы дизель-генераторных установок остаются неизменными, а параметры напряжения, получаемого с валогенераторной установки максимально близки к характеристикам судовой сети. Такой метод позволит исключить все риски, связанные с несовпадением частот при параллельной работе дизель-генераторов и валогенераторной установки. Кроме того, использование инверторов позволит дополнительно ограничить обменные и синфазные колебания мощности.

Заключение

Данные полученные в результате проделанной работы по моделированию совместно параллельной работы судовых дизель-генераторов и валогенератора позволяют при помощи дополнительной экспертной системы снизить провалы напряжения в судовой сети и осуществлять их параллельную работу в любых режимах, в том числе и критических, обеспечивая требуемые Морским Регистром показатели качества и параметры электрической энергии. Показано, что наиболее эффективным является применение на судне блока устранения обменных колебаний мощности и выпрямление напряжения валогенераторной установки с последующим инвертированием и приведением к параметрам максимально близким к общей системе параллельно работающих синхронных генераторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хватов О.С., Тарпанов И.А., Кузнецов П.В. Судовая электроэнергетическая система с обратимой валогенераторной установкой по схеме машины двойного питания и дизель-генератором переменной частоты вращения. Вестник Астраханского государственного технического университета, 2021, № 3. С. 93–100.
2. Хватов О. С., Дарьенков А. Б. Электростанция на базе дизель-генератора переменной частоты вращения // Электротехника. – 2014. – № 3. – С. 28-32.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Авдеев, Б. А. Интеллектуальные энергоэффективные системы морских судов / Б. А. Авдеев // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. – 2021. – № 4. – С. 99-113.
7. Токарев Л. Н. Математическое описание, расчет и моделирование физических процессов в судовых электростанциях / Л. Н. Токарев – Л. : Судостроение, 1980 г. – 119 с.
8. Савенко А.Е., Голубев А.Н. Обменные колебания мощности в судовых электротехнических комплексах /Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина. – Иваново, 2016. – 172с.
9. Савенко А. Е., Савенко П.С. Влияние постоянных времени регуляторов частоты на амплитуду обменных колебаний мощности в автономных дизельных электростанциях. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – Казань, 2020. – № 1. – С. 136–144.
10. Воронин А. И., Тютиков В. В. Методика синтеза регуляторов для независимого формирования статических и динамических показателей нелинейных объектов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 3(164). – С. 154-164.

RESEARCH OF PARALLEL OPERATION OF DIESEL GENERATORS AND SHAFT GENERATOR SETS ON SEA VESSELS

¹Shabalin Leonid, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor;

²Savenko Aleksandr, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor;

³Savenko Pavel, Postgraduate student

¹Kalininsrad State Technical University, Kaliningrad, Russia, e-mail: shabalin44@mail.ru

^{2,3}Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Crimea Republic, Russia,
e-mail: savenko-70@mail.ru

The application of parallel operation of diesel-generator and shaft-generator installations in electrical complexes of sea vessels is considered. The influence of the inertia of the speed and voltage regulators of synchronous generators, as well as the control objects on which they act, the distribution of active and reactive power is noted. Such phenomena cause the synchronous generator to fall out of synchronism and the vessel to be de-energized. The results of mathematical modeling are presented, confirming the influence of the inertia of the regulators on the parallel operation of synchronous generators. Using mathematical modeling methods, it has been established that it is possible to reduce voltage dips in the ship's network and carry out parallel operation of the shaft generator and diesel generators using an additional expert system.

**СЕКЦИЯ «СТАЦИОНАРНЫЕ И ТРАНСПОРТНЫЕ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ»
SECTION "STATIONARY AND TRANSPORT POWER PLANTS"**

УДК 536.22

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ПРИРОДНЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ АГЕНТОВ. ЦИКЛОПЕНТАН**

¹Беркова Елена Анатольевна, ст. преподаватель;

²Александров Игорь Станиславович, д-р техн. наук, доцент;

³Иванькова Виктория Александровна, магистр;

⁴Теринов Сергей Андреевич, магистр

^{1,2,3,4}Калининградский государственный технический университет,
Калининград, Россия, e-mail: igor.aleksandrov@klgtu.ru

Представлено новое уравнение состояния технически важного холодильного агента природного происхождения – циклопентана. Проведен сбор, анализ и компоновка массива надежных экспериментальных данных о термодинамических свойствах циклопентана для разработки уравнения состояния. С использованием нелинейной оптимизационной процедуры определены константы и оптимизирована форма уравнения. Результаты сравнения с экспериментальными данными и анализ диаграмм состояния позволяют сделать вывод о высокой точности и численной устойчивости нового уравнения.

Введение

При проектировании, разработке и эксплуатации систем кондиционирования микроклимата особое внимание уделяется энергосбережению и энергетической эффективности. Это связано со снижением запасов органического топлива, повышением энергопотребления, и, как следствие, с все нарастающими экологическими проблемами при производстве энергии.

В системах преобразования различных видов энергии в теплоту, а также в системах её дальнейшего использования важным составляющим является рабочее вещество (холодильный агент). Для обоснованного выбора оптимального рабочего вещества необходимо знать все его теплофизические свойства и иметь уравнения состояния, достоверно описывающие эти свойства. Поэтому изучение теплофизических свойств перспективных рабочих тел систем кондиционирования – актуальная и важная научная задача.

В системах с использованием тепловых насосов перспективными являются холодильные агенты природного происхождения. К одним из таких веществ относится циклопентан. Для проектирования энергоэффективных систем кондиционирования микроклимата, где в качестве рабочего вещества предполагается использовать данный углеводород, необходимо иметь уравнение состояния и корреляционные уравнения, описывающие основные коэффициенты переноса – теплопроводность и вязкость.

Уравнение состояния циклопентана

Единые фундаментальные уравнения состояния (ФУС) удобны тем, что позволяют в компактной форме хранить информацию о флюиде и хорошо интегрируются в специализированное программное обеспечение для выполнения автоматизированных расчетов. Уравнение представляется в виде:

$$\frac{a(T, \rho)}{RT} = \frac{a^0(T, \rho) + a^r(T, \rho)}{RT} = \alpha^0(\tau, \delta) + \alpha^r(\tau, \delta), \quad (1)$$

где $a(T, \rho)$ – изохорно-изотермический потенциал; $\alpha^0(\tau, \delta)$ – идеальная часть потенциала;

$\alpha^r(\tau, \delta)$ – избыточная часть потенциала; $\delta = \rho/\rho_r$; $\tau = T_r/T$ – приведенные плотность и температура;

ρ_r, T_r – параметры приведения (для циклопентана принимались критические значения, которые равны $T_c = 511,72\text{К}$ и $\rho_c = 3,82\text{кмоль/м}^3$);

$R = 8,314472\text{Дж/(моль}\cdot\text{К)}$ – универсальная газовая постоянная.

Критические константы циклопентана приняты по [1].

Идеальная часть потенциала описывается соотношением (2)

$$\alpha^0(\tau, \delta) = \frac{h_0^0 \tau}{RT_c} - \frac{s_0^0}{R} - 1 + \ln \frac{\delta \tau_0}{\delta_0 \tau} - \frac{\tau}{R} \int_{\tau_0}^{\tau} \frac{c_p^0}{\tau^2} d\tau + \frac{1}{R} \int_{\tau_0}^{\tau} \frac{c_p^0}{\tau} d\tau, \quad (2)$$

где $\delta_0 = \rho_0/\rho_c$ – приведенная плотность при давлении $p_0 = 101325$ Па и температуре $T_0 = 298,15$ К;

$\tau_0 = T_c/T_0$ – приведенная температура при p_0 и T_0 ;

h_0^0 – теплосодержание идеального газа; s_0^0 – энтропия идеального газа.

Для описания термодинамических свойств циклопентана получено уравнение индивидуальной формы

$$\alpha^r(\tau, \delta) = \sum_{i=1}^5 N_k \delta^{d_k} \tau^{t_k} + \sum_{i=6}^{10} N_k \delta^{d_k} \tau^{t_k} \exp(-\delta^{l_k}) + \sum_{i=11}^{14} N_k \delta^{d_k} \tau^{t_k} \exp[-\eta_k(\delta - \varepsilon_k)^2 - \beta_k(\tau - \gamma_k)^2] \quad (3)$$

Константы для уравнения (3) даны в таблице 1.

Таблица 1

Константы уравнения состояния (3)

i	N_k	t_k	d_k	l_k	η_k	β_k	γ_k	ε_k
1	0,05292443570608	1	4	-	-	-	-	-
2	1,606896772886	0,29	1	-	-	-	-	-
3	-2,430005305351	0,8	1	-	-	-	-	-
4	-0,4658160712966	1,14	2	-	-	-	-	-
5	0,2028865827053	0,5	3	-	-	-	-	-
6	-0,9939795660036	2	1	2	-	-	-	-
7	-0,3392323118349	1,5	3	2	-	-	-	-
8	0,3400235443541	1	2	1	-	-	-	-
9	-0,1852538311716	3,36	2	2	-	-	-	-
10	-0,03752954389874	0,95	7	1	-	-	-	-
11	0,8805641529353	1	1	-	0,82	1,15	1,08	0,68
12	-0,4341705726504	2,5	1	-	1,19	1,61	0,36	0,97
13	-0,1033426402165	2,5	3	-	0,79	0,66	0,09	0,84
14	-0,09061389263042	1,5	3	-	1,52	2,72	1,48	0,66

Теплоемкость идеального газа аппроксимирована зависимостью

$$\frac{c_p^0}{R} = c_0 + \sum_{k=1}^4 v_k \left(\frac{u_k}{T}\right)^2 \frac{\exp(u_k/T)}{[\exp(u_k/T)-1]^2}. \quad (4)$$

Значения коэффициентов уравнения (4) представлены в таблице 2.

Значения коэффициентов уравнения (4)

c_0	1,96		
v_1	3,34	u_1	120
v_2	18,6	u_2	1300
v_3	13,9	u_3	2700
v_4	4,86	u_4	5300

Набор подгоночных констант уравнения (коэффициентов и степеней при температуре), наиболее точно описывающих реальную поверхность состояния циклопентана, определялся на основе метода [2], который дает возможность решения задач многомерной оптимизации при достаточно ограниченном наборе данных.

Сравнение с экспериментальными данными

Результаты сравнения экспериментальных данных [3-20] с расчётными значениями, полученными по уравнению (1), представлены в таблице 3.

Таблица 3

Сравнение расчетных значений по ФУС (1) с экспериментальными данными

Год	Автор, источник	Точки	Диапазон параметров		Среднее относительное отклонение (COO), %	
			T, K	p, MPa	жидкость	газ
Плотность						
1969	Бразиер [3]	10	303,15	0,1-450	0,067	
1992	Гарсия [4]	210	192,8-298	0,1-104	0,078	
1970	Кусс [5]	22	298-353	0,1-196	0,338	
2022	Лиу [6]	107	293-363	0,1-70	0,065	
Давление насыщенных паров						
1943	Астон [7]	11	226-287			0,783
1985	Мэчет [8]	9	280-320			0,057
1995	Мокбел [9]	23	204-343			0,338
1991	Шах [10]	15	276-493			0,737
1945	Виллингхэм [11]	11	288-323			0,033
Плотность на линии насыщения жидкой фазы						
1992	Гарсия [4]	38	188-302		0,054	
1944	Гаррет [12]	6	275-298		0,022	
2004	Харрис [13]	5	278-298		0,033	
2014	Мацумото [14]	6	273-298		0,314	
Теплоемкость насыщенной жидкости C_s						
1934	Якобс [15]	21	186-293		0,387	
Теплоемкость при постоянном давлении C_p						
1943	Астон [7]	32	184-300		1,406	
1946	Доуслин [16]	29	186-300		0,902	
1959	Маккалаф [17]	6	329-463		0,157	
1946	Шпицер [18]	8	353-539		0,391	
Скорость звука						
2004	Перейро [19]	5	293-313	0,101	0,131	
2002	Такаги [20]	142	283-343	0,1-19	0,115	

Результаты сравнения в таблице 3 показывают хорошую сходимость эксперимента с расчетными данными, полученными по уравнению состояния. Однако следует отметить, что для циклопентана в однофазной области исследована только жидкая фаза. Это касается, прежде всего, плотности [3-6]. Данные о свойствах на линии равновесия «газ-жидкость» исследованы зарубежными авторами только в узком диапазоне. Исключение составляют данные Шаха [10] для давле-

ния насыщенных паров. Для плотности жидкости наиболее обширными являются данные Гарсии [4]. Теплоёмкость и скорость звука также исследованы только в жидкой фазе. При этом в работах Астона [7] и Дуслина [16] теплоёмкость исследована, в том числе, и вблизи тройной точки.

Для повышения численной устойчивости уравнения и его тестирования при сверхкритических параметрах возможно использование данных молекулярного моделирования. Такой подход возможен при наличии требуемых вычислительных мощностей и оптимизированных потенциалов межмолекулярного взаимодействия. Это является следующим этапом работы авторов доклада с данным уравнением состояния. Тем не менее, многоконстантное уравнение состояния (1) обладает мощными экстраполяционными возможностями. Это подтверждается диаграммами состояния, представленными на рисунках 1-3. На рисунке 1 ход изотерм имеет физически правильный характер. Что особенно важно, взаимных пересечений изотерм при высоких давлениях не наблюдается, кроме того выполняется правило прямолинейного диаметра. На рисунке 2 можно увидеть характерные максимумы теплоёмкости на различных изобарах, достигающие бесконечно большого значения на критической изобаре. На рисунке 3 изобары при низких температурах имеют гладкий вид и не меняют наклон, а значение скорости звука в критической точке стремится к минимуму.

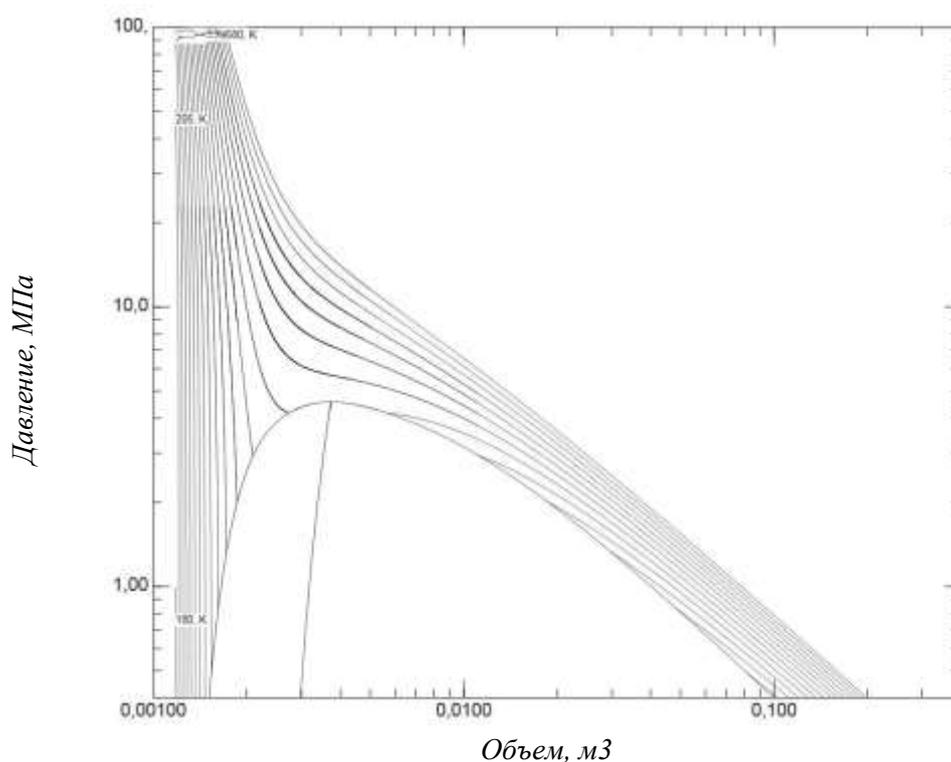


Рис. 1. Зависимость давления от удельного объема для циклопентана по уравнению (1)

Физически верное описание поверхности состояния циклопентана эмпирическим уравнением состояния при дефиците экспериментальных данных обеспечивалось применением современного математического алгоритма многомерной оптимизации, основанного на методе случайного поиска. Алгоритм имеет ряд преимуществ перед градиентными методами и активно применяется для решения такой комплексной задачи, как построение уравнения состояния оптимизированной формы. При этом численная реализация достаточно проста и дает возможность эффективно решать задачи нелинейной условной оптимизации. Говоря об условной оптимизации, имеется в виду применение многочисленных ограничений в виде неравенств, благодаря которым и достигается правильный ход изолиний, в частности, на рисунках 1-3. Таким образом, осуществляется поиск условного минимума целевой функции, при котором расчетная поверхность состояния максимально соответствует реальной поверхности.

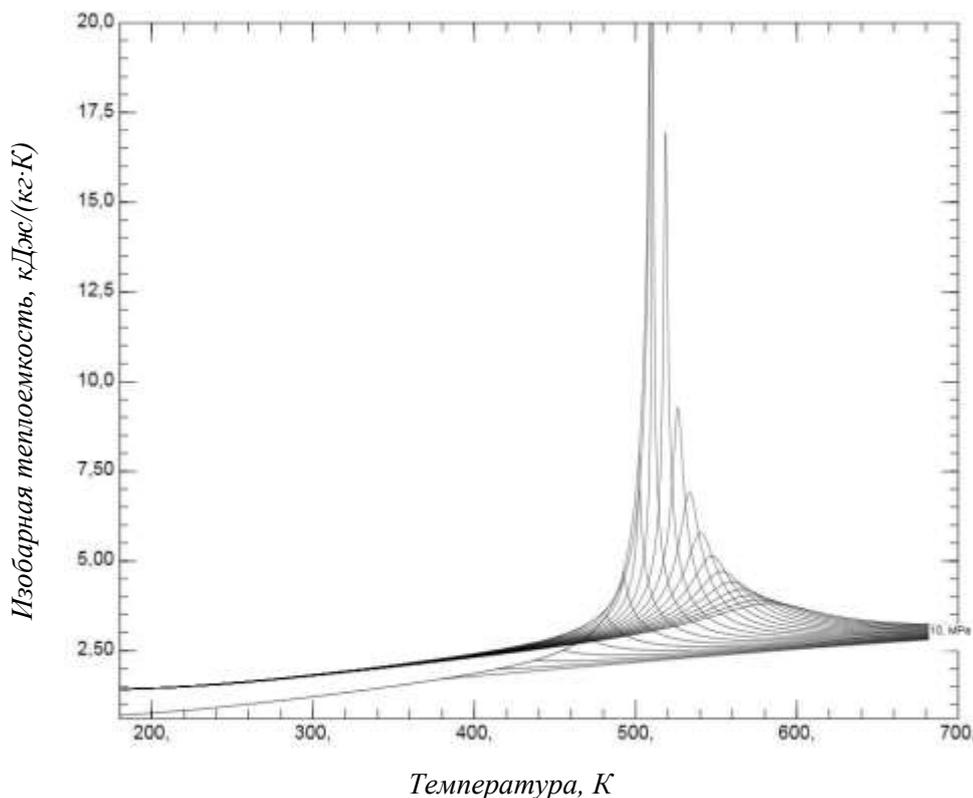


Рис. 2. Зависимость изобарной теплоемкости от температуры для циклопентана по уравнению (1)

Экспериментальные данные в критической области отсутствуют. Однако при разработке уравнения учитывались классические условия равенства нулю производных первого и второго порядков от давления по температуре на критической изотерме. Поэтому в широкой окрестности критической точки уравнение верно описывает поверхность состояния, но с большими неопределенностями. Что же касается описания критической аномалии непосредственно, то для этого применимы уравнения состояния, полученные в рамках масштабной теории, а эмпирические уравнения состояния здесь неприменимы по определению.

Наличие уравнения состояния для циклопентана дает возможность разработки корреляционных уравнения для свойств переноса в переменных «температура-плотность», что является наиболее эффективным подходом к описанию неравновесных свойств.

Еще одна важная сфера применимости предлагаемого уравнения состояния – это моделирование свойств многокомпонентных углеводородных смесей природного происхождения. К таким смесям относятся нефть и газовые конденсаты различных месторождений, их фракции, а также товарные нефтепродукты. Циклоалканы входят в виде компонентов в указанные смеси, и наличие надежного уравнения состояния для них позволяет моделировать свойства указанных промышленно важных смесей. В свою очередь, информация о теплофизических свойствах нефтепродуктов и пластовых флюидов необходима для проектирования разработки нефтегазовых месторождений. Также эта информация важна при транспортировке нефтепродуктов, хранении и осуществлении торговых операций.

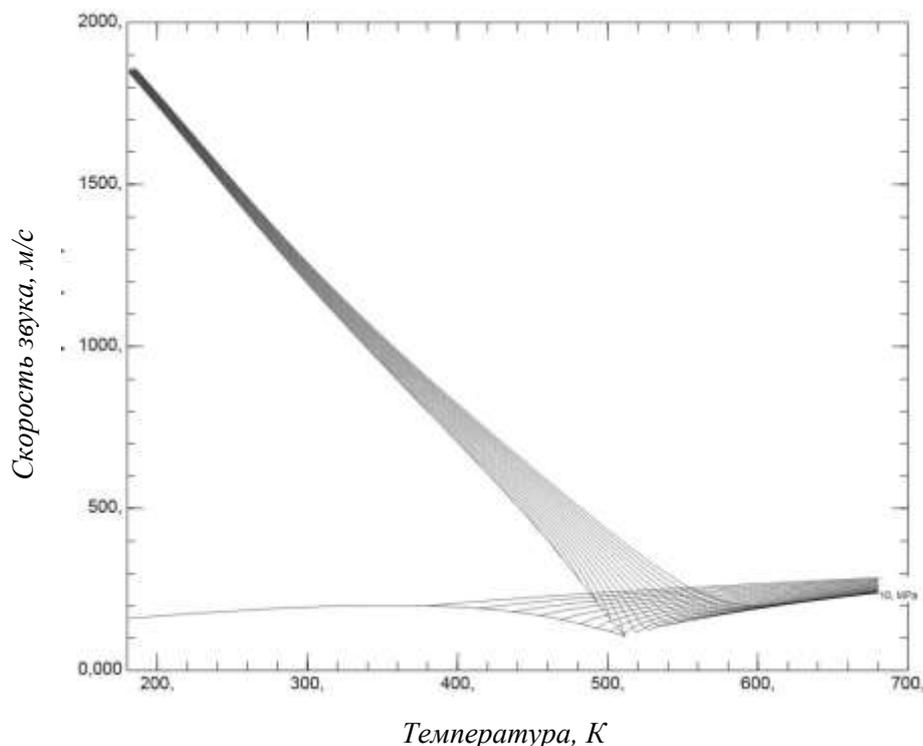


Рис. 3. Зависимость скорости звука от температуры для циклопентана по уравнению (1)

В завершение доклада следует сказать, что наблюдаемая тенденция к сокращению экспериментальных исследований определяет интерес к развитию прогнозных методов расчета и моделирования теплофизических свойств технически важных флюидов и их смесей. Это делает задачу поиска надежного уравнения состояния в совокупности с совершенствованием методов молекулярного моделирования весьма актуальной.

Заключение

На основе собранных и обобщенных авторами литературных экспериментальных данных получено уравнение состояния циклопентана. Точность описания термодинамических свойств исследуемого вещества новым уравнением высока и соотносится с погрешностями эксперимента. Несмотря на эмпирический характер предлагаемого уравнения, оно удовлетворяет всем современным требованиям к фундаментальным уравнениям состояния, то есть физически верно описывает термодинамическую поверхность и надежно экстраполируется за пределы экспериментально исследованного диапазона параметров.

Полученное уравнение может быть использовано как для прогнозирования свойств циклопентана – рабочего вещества в системах теплогазоснабжения и вентиляции, так и в нефтегазовом секторе для моделирования свойств углеводородных смесей, в которых в качестве компонента присутствует циклопентан.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lemmon E.W., Bell I.H., Huber M.L., McLinden M.O. NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP, Version 10.0, National Institute of Standards and Technology, Standard Reference Data Program, Gaithersburg, 2018.
2. Александров, И.С. Фундаментальные уравнения состояния углеводородов нефти: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2012. – 20 с.
3. Brazier, D.W., Freeman, G.R. The effects of pressure on the density, dielectric constant, and viscosity of several hydrocarbons and other organic liquids // Canadian Journal of Chemistry. – 1969. – Vol. 47. – P. 893-899.

4. Garcia B.V., Caceres A.M., Nunez D.J. Study of the equation of state of cyclopentane from 193 to 298 K and pressures up to 104 MPa // *Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie.* – 1992. – Vol. 96(12). – P. 1859-1868.
5. Kuss E., Taslimi M. p,V,T-measurements on twenty organic liquids (in German) // *Chemie Ingenieur Technik.* – 1970. – Vol. 42(17). – P. 1073-1081.
6. Liu Z., Ma Y., Wang X. Compressed liquid densities for cyclopentane/n-heptane mixtures from 293.15 K to 363.15 K at pressures up to 70 MPa // *The Journal of Chemical Thermodynamics.* – 2022.
7. Aston J.G., Finke H.L., Schumann S.C. The heat capacity and entropy, heats of transition, fusion and vaporization and the vapor pressures of cyclopentane. Evidence for a non-planar structure // *Journal of the American Chemical Society.* – 1943. – Vol. 65. – P. 341.
8. Machat V., Boublik, T. Vapour-liquid equilibrium and excess molar volume of (trans-1, 2-dichloroethene + cyclopentane) at 293.15 K // *The Journal of Chemical Thermodynamics.* – 1985. – Vol.17. – P. 887-891.
9. Mokbel I., Rauzy E., Loiseleur H., Berro C., Jose J. Vapor pressures of 12alkylcyclohexanes, cyclopentane, butylcyclopentane and trans-decahydronaphthalene down to 0.5 Pa. Experimental results, correlation and prediction by an equation of state // *Fluid Phase Equilibria.* – 1995. – Vol. 108. – P.103-120.
10. Shah N.N., Zollweg J.A., Streett W.B. Vapor-liquid equilibrium in the system carbon dioxide + cyclopentane from 275 to 493 K at pressures to 12.2MPa // *Journal of Chemical & Engineering Data.* – 1991. – Vol. 36(2). – P. 188-192.
11. Willingham C.B., Taylor W.J., Pignocco J.M., Rossini F.D. Vapor pressures and boiling points of some paraffin, alkylcyclopentane, alkylcyclohexane, and alkylbenzene hydrocarbons // *Journal of Research of the National Bureau of Standards.* – 1945. – Vol. 35. – P. 219-244.
12. Garrett A.B. No Title // *Am. Pet. Inst. Res. Proj.*, 45, The Ohio State University: unpublished. – 1944.
13. Harris K.R., Newitt P.J., Woolf L.A. Temperature and density dependence of the viscosity of cyclopentane // *Journal of Chemical & Engineering Data.* – 2004. – Vol. 49. – P. 138-142.
14. Matsumoto Y., Makino T., Sugahara T., Ohgaki K. Phase equilibrium relations for binary mixed hydrate systems composed of carbon dioxide and cyclopentane derivatives // *Fluid Phase Equilibria.* – 2014. – Vol. 362. – P. 379-382.
15. Jacobs C.J., Parks G.S. Thermal data on organic compounds. XIV. Some heat capacity, entropy and free energy data for cyclic substances // *Journal of the American Chemical Society.* – 1934. – Vol.56. – P. 1513-1517.
16. Douslin D.R., Huffman H.M. The heat capacities, heats of transition, heats of fusion and entropies of cyclopentane, methylcyclopentane and methylcyclohexane // *Journal of the American Chemical Society.* – 1946. – Vol. 68. – P. 173-176.
17. McCullough J.P., Pennington R.E., Smith J.C., Hossenlopp I.A., Waddington G. Thermodynamics of cyclopentane, methylcyclopentane and 1,cis-3-dimethylcyclopentane+ verification of the concept of pseudorotation // *Journal of the American Chemical Society.* – 1959. – Vol. 81. – P. 5880-5883.
18. Spitzer R., Pitzer K.S. The heat capacity of gaseous cyclopentane, cyclohexane and methylcyclohexane // *Journal of the American Chemical Society.* – 1946. – Vol. 68. – P. 2537-2538.
19. Pereiro A.B., Rodriguez A., Canosa J., Tojo J. Density, viscosity, and speed of sound of dialkyl carbonates with cyclopentane and methyl cyclohexane at several temperatures // *Journal of Chemical & Engineering Data.* – 2004. – Vol. 49. – P. 1392-1399.
20. Takagi T., Sakura T., Guedes H.J.R. Speed of sound in liquid cyclic alkanes at temperatures between (283 and 343) K and pressures up to 20 MPa // *The Journal of Chemical Thermodynamics.* – 2002. – Vol. 34. – P. 1943-1957.

INVESTIGATION OF THERMODYNAMIC PROPERTIES OF NATURAL REFRIGERANT AGENTS. CYCLOPENTANE

¹Berkova Elena A., Senior Lecturer;

²Alexandrov Igor S., D.Sc., associate professor;

³Ivankova Viktoria A., master;

⁴Terinov Sergey A., master

^{1,2,3,4}Kalininsrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,
e-mail: igor.aleksandrov@klgtu.ru

The report presents a new equation of state for a technically important refrigerant of natural origin - cyclopentane. The collection, analysis and layout of an array of reliable experimental data on the thermodynamic properties of cyclopentane was carried out to develop the equation of state. Using a non-linear optimization procedure, the constants are determined and the form of the equation is optimized. The results of comparison with experimental data and analysis of state diagrams allow us to conclude that the new equation is highly accurate and numerically stable.

УДК 621.436.12

ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ТРАКТА ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ДИЗЕЛЕЙ С НАДДУВОМ

¹Бураковская Марина Васильевна, канд. техн. наук, доцент;

²Ковальчук Леонид Игнатьевич, д-р техн. наук, профессор

^{1,2}Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ», Калининград, Россия, e-mail: bgarf1988@inbox.ru

Качество функционирования элементов воздушно-газового тракта изменяется с различной интенсивностью в процессе эксплуатации двигателя. Задача определения сроков проведения и объёма ремонтно-профилактических работ может быть решена с использованием диагностических инвариантных эталонов, реагирующих исключительно на проявление неисправностей в той части тракта, качество функционирования которой подлежит оценке с их использованием.

1. Введение

При определении объема задач, решаемых системами функционального диагностирования (ФД) дизелей, первоочередными объектами диагностирования, помимо цилиндропоршневой группы (ЦПГ) и топливной аппаратуры (ТА), является воздушно-газовый тракт (ВГТ). Такой вывод обоснован тем, что мощность и экономичность дизелей главным образом определяется качеством протекания рабочих процессов в указанных узлах. Эти же факторы определяют и надежность двигателей, главным образом ЦПГ, подвергающейся как механическим, так и тепловым нагрузкам. Наблюдаемые в ходе эксплуатации процессы смесеобразования, воспламенения, а также сгорания топлива, которые определяются такими распространенными дефектами ВГТ, как загрязнение воздушных фильтров, тракта газообмена, проточных частей (ПЧ) турбокомпрессоров и др., являются причинами роста теплонапряженного состояния и выхода из строя поршней, втулок и крышек рабочих цилиндров. Снижается надежность и самих агрегатов наддува, возникает опасность помпажа компрессора, прогара лопаток турбины и т.д. При этом развитие неисправностей носит, как правило, постепенный характер и их обнаружение на ранней стадии проявления с помощью штатных средств контроля крайне затруднительно.

2. Методы исследования

ВГТ дизелей с наддувом может рассматриваться как система с последовательным соединением элементов. Как объект ФД эта система может быть разделена на 2 части: тракты воздухоподготовки (ВС) и отработавших газов (ОГ). Целесообразность этого деления обосновывается следующим образом.

Загрязнения в тракт ВС попадают из окружающей среды, содержащей частицы (твердые и жидкие) размером от 0,1 до 100 мкм. Как правило, в системе ВС устанавливаются сетчатые фильтры, улавливающие частицы, диаметр которых превышает 6 мкм. Более мелкие частицы не улавливаются фильтром и попадают вместе с воздухом в проточную часть компрессора. Мелкодисперсный аэрозоль, содержащийся в воздухе, прошедшем через фильтр, служит главной причиной загрязнения ПЧ компрессора. На интенсивность отложений влияет значительное число факторов, при этом определяющими являются конструктивные особенности элементов ПЧ компрессора и степень насыщенности воздуха твердыми и жидкими частицами. По опытным данным [1, 2] толщина слоя отложений ПЧ компрессора со временем стабилизируется. Для двигателей с $\pi_k \leq 1,5$ стабилизация наблюдается при значениях порядка 2,0–2,5 мм, а при $\pi_k > 2$ – 1,0–1,5 мм.

Источником загрязнения элементов тракта ОГ служат рабочие цилиндры. На интенсивность отложений существенное влияние оказывает сорт топлива, режим работы двигателя, точка росы для паровых фракций в потоке, особенностями конструктивного исполнения лопаток турбины (сопловых и рабочих). Экспериментальные данные [1, 2] свидетельствуют о том, что слой отложений может достигать следующих толщин: 2,0 – 3,0 мм для рабочих лопаток; 5,0 – 6,0 мм для сопловых лопаток. Наибольший слой отложений образуется и стабилизируется в течение первых 100–200 часов работы двигателя.

Из представленного выше можно сделать вывод о том, что качество функционирования элементов трактов ВС и ОГ будет изменяться с различной интенсивностью в процессе эксплуатации двигателя. Исходя из этого, сроки проведения и объём ремонтно-профилактических работ, которые устанавливаются по результатам анализа фактического состояния отдельных элементов выделенных частей ВГТ должны различаться. Данная задача может быть решена с использованием диагностических инвариантных эталонов (ИЭ), реагирующих исключительно на проявление неисправностей в той части тракта, качество функционирования которой подлежит оценке с их использованием.

3. Результаты и их обсуждение

Фактическое протекание процессов в тракте ОГ дизелей с газотурбинным наддувом определяется качеством функционирования газовой турбины (ГТ), обобщённым показателем которого является частота вращения ротора турбины (РТ) n_m . Поскольку функции источника энергии для ГТ выполняют рабочие цилиндры, то в качестве информативных параметров (ИП), характеризующих режим работы двигателя и устанавливающих частоту вращения РТ, можно принять положение указателя нагрузки (УН) S_x и частоту вращения коленчатого вала (КВ) двигателя n . В такой постановке задача формирования ИЭ для ФД тракта ОГ дизелей с наддувом заключается в определении явного вида некоторой количественной структуры, которая устанавливает взаимосвязи между входными ИП S_x и n и выходным ИП n_m в поле возможных режимов работы. Ниже представлен конкретный пример осуществления вычислений по определению параметров этих количественных структур.

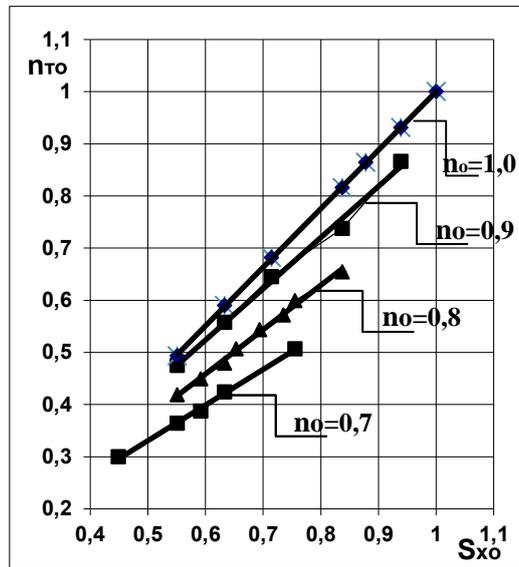


Рис. 1. Нагрузочные характеристики газовой турбины двигателя 6ЧН 25/34-3

Для этого воспользуемся данными стендовых испытаний по серии нагрузочных характеристик (НХ) ГТ дизеля 6 ЧН 25/34-3, представленные в безразмерной системе координат $n_{mo} = f(S_{xo})$ (рис. 1). В рассматриваемом случае эти данные определяют область, лежащую между вертикальными прямыми $n_{\min} = 350 \text{ мин}^{-1}$, $n_n = 500 \text{ мин}^{-1}$. Вверху она ограничена функцией $n_{mo} = f(S_{xo})$ при $n_o = 1,0$; внизу функцией $n_{mo} = f(S_{xo})$ при $n_o = 0,7$. Считая эту область эталоном, можно выполнить количественные оценки, причем целесообразно использовать относительные значения ИП:

$$n_{mo} = \frac{n_m}{n_{mn}} \text{ — относительное значение частоты вращения РТ;}$$

$$S_{xo} = \frac{S_x}{S_{xn}} \text{ — относительные значения УН;}$$

$$n_o = \frac{n}{n_n} \text{ — относительные значения частоты вращения КВ дизеля.}$$

В приведенных зависимостях нижний индекс «н» соответствует значениям ИП при работе двигателя на номинальном режиме: $n_{mn} = 21700 \text{ мин}^{-1}$; $S_{xn} = 4,9 \text{ см}$; $n_n = 500 \text{ мин}^{-1}$.

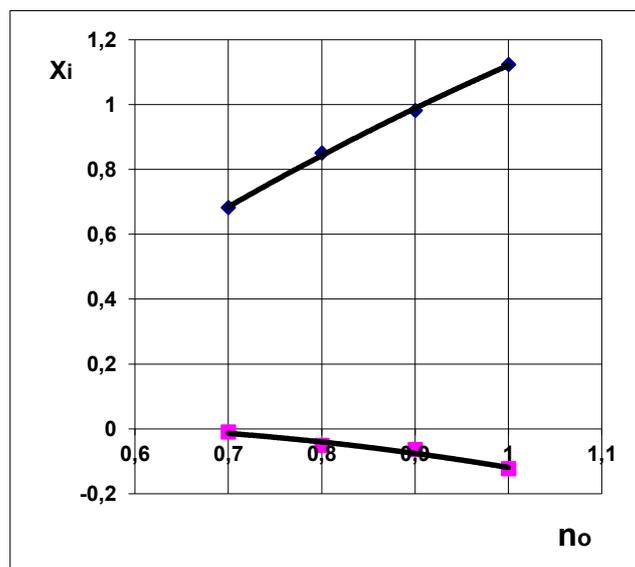


Рис. 2. Закономерности изменения определяемых параметров $x_i = f(n_o)$

Непосредственно из рис. 1 следует, что зависимости $n_{mo} = f(S_{xo})$ линейные. Поэтому каждая из них может быть аппроксимирована полином первого порядка вида:

$$n_{mo} = x_1(n_o) \cdot S_{xo} + x_2(n_o). \quad (1)$$

Система полиномов, аппроксимирующих серию нагрузочных характеристик принимает вид:

$$\begin{aligned} n_{mo} &= 1,1235 \cdot S_{xo} - 0,1230, \text{ при } n_o = 1,0; \\ n_{mo} &= 0,9811 \cdot S_{xo} - 0,0646, \text{ при } n_o = 0,9; \\ n_{mo} &= 0,8507 \cdot S_{xo} - 0,0516, \text{ при } n_o = 0,8; \\ n_{mo} &= 0,6823 \cdot S_{xo} - 0,0103, \text{ при } n_o = 0,7. \end{aligned} \quad (2)$$

Система полиномов (2) позволяет выявить закономерности изменения определяемых параметров $x_i = f(n_o)$ при переходе от одной нагрузочной характеристики к другой. На рис. 2 дано графическое представление зависимостей $x_i = f(n_o)$. Видно, что это нелинейные зависимости, поэтому каждая из них аппроксимирована полиномами второго порядка:

$$\begin{aligned} x_1 &= -0,6500 \cdot n_o^2 + 2,5590 \cdot n_o - 0,7880; \\ x_2 &= -0,4275 \cdot n_o^2 + 0,3756 \cdot n_o - 0,0675. \end{aligned} \quad (3)$$

Подстановкой (3) в (1) получено уравнение поверхности, образованной последовательным смещением зависимости $n_{mo} = f(S_{xo})$, при переходе от одной нагрузочной характеристики к другой.

$$n_{mo} = (-0,6500 \cdot n_o^2 + 2,5590 \cdot n_o - 0,7880) \cdot S_{xo} + (-0,4275 \cdot n_o^2 + 0,3756 \cdot n_o - 0,0675). \quad (4)$$

На рис. 3 приведена гистограмма распределения погрешностей расчета по уравнению (4) по всему массиву исходных данных. Видно, что уравнение (4) воспроизводит исходные данные с погрешностью, не превышающей $\pm 3\%$.

Оценка качества функционирования тракта ОГ посредством ИЭ (4) выполняется согласно алгоритму:

1. С использованием зависимости $n_{moz} = f(n_{mop})$ поверхность, принятая за эталон, преобразуется в прямую – эталон.
2. В произвольный период эксплуатации определяется величина ИП n_{mo}, S_{xo}, n_o на нескольких режимах (четыре – пять), рассчитываются относительные значения ИП.
3. Осуществляется построение зависимостей, $n_{moz} = f(n_{mop})$, отвечающих реальным условиям осуществления рабочих процессов в тракте ОГ.
4. Делается вывод о качестве функционирования тракта ОГ с учетом наблюдаемых отклонений полученных линий от ИЭ.

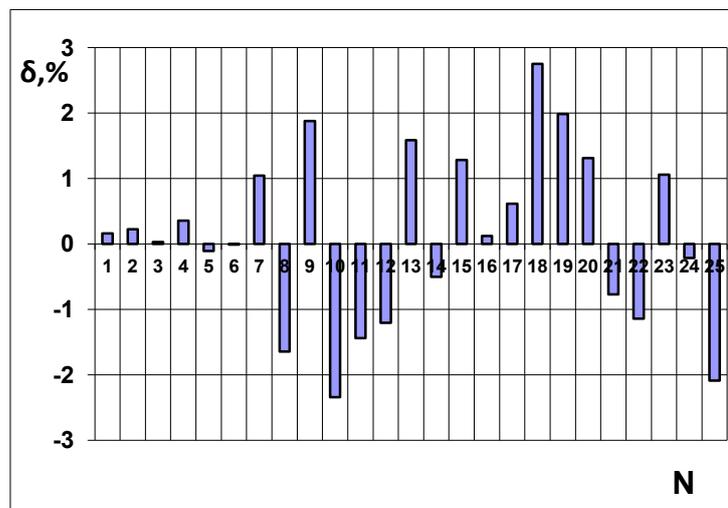


Рис. 3. Гистограмма распределения погрешностей расчета по всему массиву исходных данных

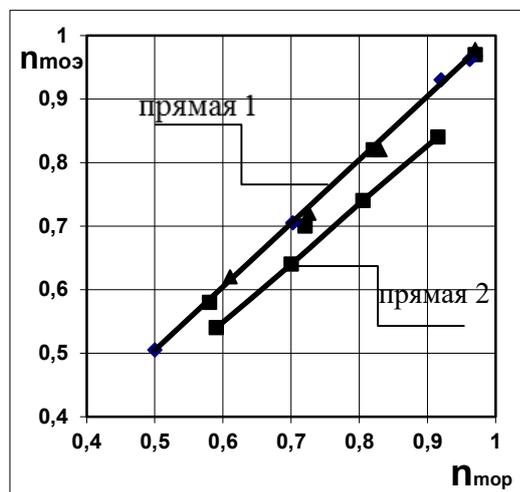


Рис. 4. Результаты сравнения экспериментальных и расчетных значений

Диагностические возможности эталона (4) оценивались посредством введения в двигатель следующих неисправностей:

- ◆ - уменьшено на 50% проходное сечение воздушного фильтра;
- - снижено давление впрыска топлива на первом цилиндре до 7,5 МПа, на втором - до 5 МПа;
- ▲ - увеличены зазоры в приводе клапанов на третьем цилиндре до 1мм, а на четвертом до 1,5 мм;
- - увеличено противодавление за ГТ.

Результаты практического диагностирования тракта ОГ дизеля 6ЧН 25/34-3 по представленной выше схеме даны на рис. 4, где ИЭ является прямая 1. На основе этих результатов диагностические возможности эталона (4) можно характеризовать следующим образом.

ИЭ (4) позволяет дифференцировать неисправности, возникающие в ВГТ дизелей с газотурбинным наддувом. Нетрудно заметить, что реакция ИЭ (4) на неисправности в тракте ВС, топливной аппаратуре и механизме газораспределения на ранней стадии их проявления не превышает погрешности измерения и расчета $n_{мос}$ и $n_{мор}$. При этом четко определена неисправность, проявляющаяся в самом тракте ОГ (прямая 2 на рис. 4): в этом случае результаты замера $n_{мос}$ существенно меньше результатов расчёта $n_{мор}$, что свидетельствует об ухудшении качества функционирования ГТ. Следует заметить, что отклонение $n_{мос} < n_{мор}$ не позволяет получить конкретной информации о причинах, приведших к ухудшению качества функционирования ГТ. Исходя из этого, выявленные при сопоставлении $n_{мос} = f(n_{мор})$ отклонения должны рассматриваться в качестве обобщённого показателя качества функционирования ГТ. То есть, диагностические возможности ИЭ (4) ограничиваются идентификацией двух состояний тракта отработавших газов в поле возможных режимов работы двигателя: исправен или неисправен.

4. Заключение

В заключение отметим, что эталоны типа (4) могут быть сформированы и на основе других параметров, характеризующих рабочие процессы, протекающие в тракте отработавших газов дизелей с наддувом. Свойство инвариантности эти эталоны сохраняют только на режимах в области принятой за эталон. При диагностировании на режимах вне этой области изменяются параметры эталонов и снижается достоверность количественных оценок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Межеричкий А.Д. Турбокомпрессоры систем наддува судовых дизелей. – Л.: Судостроение, 1986. – 247 с.
2. Никитин Е.А., Станиславский Л.В., [и др.]. Диагностирование дизелей. – М.: Машиностроение, 1987. – 223 с.

FUNCTIONAL DIAGNOSIS OF THE EXHAUST GAS TRACT OF SUPERCHARGED DIESELS

¹Burakovskaya Marina Vasilievna, Ph. D., assistant professor;

²Kovalchuk Leonid Ignatievich, Dr. Sci. (Eng), Professor

^{1,2}Baltic Fishing Fleet State Academy, Kaliningrad, Russia,
e-mail: bgarf1988@inbox.ru

The quality of functioning of the elements of the air-gas path changes with varying intensity during engine operation. The problem of determining the timing and volume of repair and maintenance work can be solved using diagnostic invariant standards that respond exclusively to the occurrence of faults in that part of the tract, the quality of functioning of which is subject to assessment using them.

УДК 621.01

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОФИЛЯ РАБОЧЕЙ ЧАСТИ РОТОРОВ ДВУХВИНТОВОГО НАСОСА

¹Ермаков Александр Юрьевич, студент гр. 21-ЗТЭм;

²Кункевич Сергей Владимирович, канд. тех. наук, доцент кафедры «Энергетики»

^{1,2}Калининградский государственный технический университет,
Калининград, Россия, e-mail: eay@balt-energo.ru

Рассматривается проектирование профиля рабочей части роторов для двухвинтовых насосов. Проводится выбор типа и конструкции насоса, обоснование выбора профиля, а также описание этапов проектирования профиля винта.

Введение

Вспомогательное оборудование играет критическую роль в работе энергетической установки, обеспечивая эффективное и безопасное функционирование всей системы. Надежность и экономичность энергоустановки в значительной степени зависит от входящих в ее состав различных узлов и механизмов.

Одним из таких важных механизмов, обеспечивающих надежную и эффективную работу системы, является насосное оборудование. Оно является «сердцем и дыханием» этой установки, перекачивая и распределяя жидкости и газы в системе.

Из наиболее значимых достоинств насосного оборудования можно выделить его способность поддерживать постоянный поток жидкости или газа в системе. Это особенно важно в энергетических установках, где любые сбои в потоке могут привести к перерывам в производстве энергии или даже к полной остановке. Насосы обеспечивают не только непрерывный поток, но и контролируют давление и скорость жидкости или газа, обеспечивая оптимальную работу системы.

Насосное оборудование имеет различные типы и конструкции, от вихревых насосов до центробежных и поршневых. Каждый тип насоса имеет свои особенности и может быть применен в зависимости от требований конкретной системы.

В современном мире все больше внимания уделяется разработке инновационных и энергоэффективных насосных систем. Основными трендами в области насосного оборудования являются разработка высокоэффективных насосов, использование современных материалов и технологий изготовления, а также интеграция автоматизации и управления насосными системами.

Проектирование насосного оборудования является важной частью энергетической отрасли, которой необходимо уделять внимание в контексте повышения эффективности и надежности. При разработке насоса важно убедиться в оптимальности геометрии его рабочей части, а для этого необходимо проводить различные изыскания, математические расчёты и анализ полученных результатов.

1. Выбор типа и конструкции насоса

В данной работе рассматривается насос одного типа и конструкции для проектирования профиля рабочей части. Подготовлен ряд требований, которым должен соответствовать проектируемый насос:

- Надёжная работа;
- Долговечность;
- Простота конструкции;
- Высокий КПД;
- Малый габарит и вес;
- Самовсасывающая способность.

Под все эти требования отлично подходят роторно-вращательные насосы.

Существует большое разнообразие роторно-вращательных насосов: одновинтовые, двухвинтовые, трехвинтовые, шестеренные, коловратные и т.д. Еще больше количество разных профилей рабочих органов (РО), применяемых в этих насосах. Несмотря на это многообразие профилей существует необходимость создания профилей РО, обеспечивающих надежную работу насосов с высоким коэффициентом полезного действия (КПД) при различных режимах перекачки несмазывающих и смазывающих жидкостей различной вязкости, с наличием механических примесей и газов. [1]

В данной работе выбор пал на двухвинтовые насосы. Их используют в широком диапазоне подач (от 2 до 8000 л/мин) при давлении нагнетания до 200 бар. [2]

После определения типа насоса далее стоит определиться с конструкцией профиля рабочей части. Существует множество видов профилей таких как: двусторонний негерметичный профиль, двусторонний герметичный профиль, двусторонний несимметричный профиль, герметичное циклоидальное зацепление с открытым профилем, теоретически негерметичное циклоидальное зацепление с открытым профилем и др. Более подробно о 11 различных видах профилей винтов описано в работе [3].

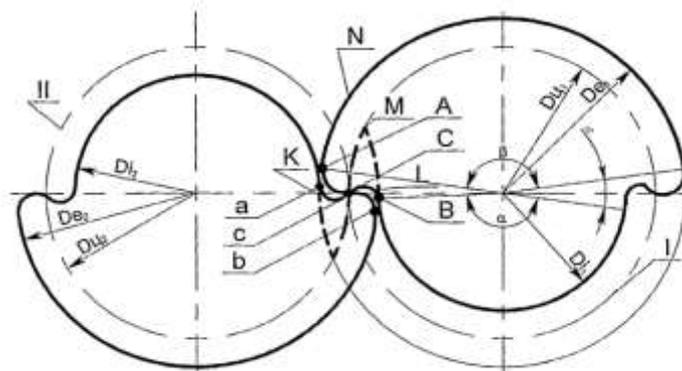


Рис. 1. Двусторонний симметричный профиль

Рассмотрев различные профили, было определено, что для простоты проектирования и изготовления стоит остановиться на двухстороннем симметричном профиле, т.к. он состоит из двух одинаковых винтов, а профиль достаточно прост и эффективен. Выбранный профиль представлен на рис. 1.

2. Проектирование профиля винтов

У выбранного профиля безразмерный радиус начала фаски q равен безразмерному среднему радиусу $m_{ц} = R_{ц}/R_e$, поэтому профиль открытый. Зацепления состоят из следующих элементов:

Ножки зуба "ас" и головки зуба "ев". Кривая "ас", представляющая собой удлиненную эпициклоиду (УЭ), образована точкой А при качении окружности I по окружности II, диаметры окружностей I и II равны межцентровому расстоянию. Кривая "ев" - обычная эпициклоида (ОЭ), образованная точкой С при качении окружности I по окружности II.[1]

Автором заранее подобраны требуемые параметры насоса, а также проведён предварительный расчёт винтового насоса. По расчётам получено, что теоретическая подача насоса Q_T зависит от площади камеры нагнетания F_K .

$$Q_T = F_K * t * \frac{n}{60} * \eta * z \quad (1)$$

$$F_K = \frac{\pi}{4} * (D_e^2 - D_i^2) - \frac{D_e^2}{4} * (\alpha - \sin(\alpha)) \quad (2)$$

где t - шаг винта, n - частота вращения винта, η - коэффициент объёмных потерь, z - число секций, α - угол соединения червяков.

Из проведённых расчётов основных параметров винтового насоса получены значения диаметра центриды ($D_{ц}$), окружности выступа (D_e) и впадины (D_i) винта.

Далее для построения профиля винта были построены плоские кривые по уравнениям удлиненной эпициклоиды (3) и обычной эпициклоиды (4).

$$\begin{cases} x = D_{ц} * \cos(\tau) - \frac{D_e}{2} * \cos(2\tau) \\ y = D_{ц} * \sin(\tau) - \frac{D_e}{2} * \sin(2\tau) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} x = D_{ц} * \cos(\tau) - \frac{D_{ц}}{2} * \cos(2\tau) \\ y = D_{ц} * \sin(\tau) - \frac{D_{ц}}{2} * \sin(2\tau) \end{cases} \quad (4)$$

После наложения одной кривой на другую и доворота удлиненной эпициклоиды, для плавного перехода кривых в точке с, в системе автоматизированного проектирования Компас – 3D был получен профиль представленный на рис.2

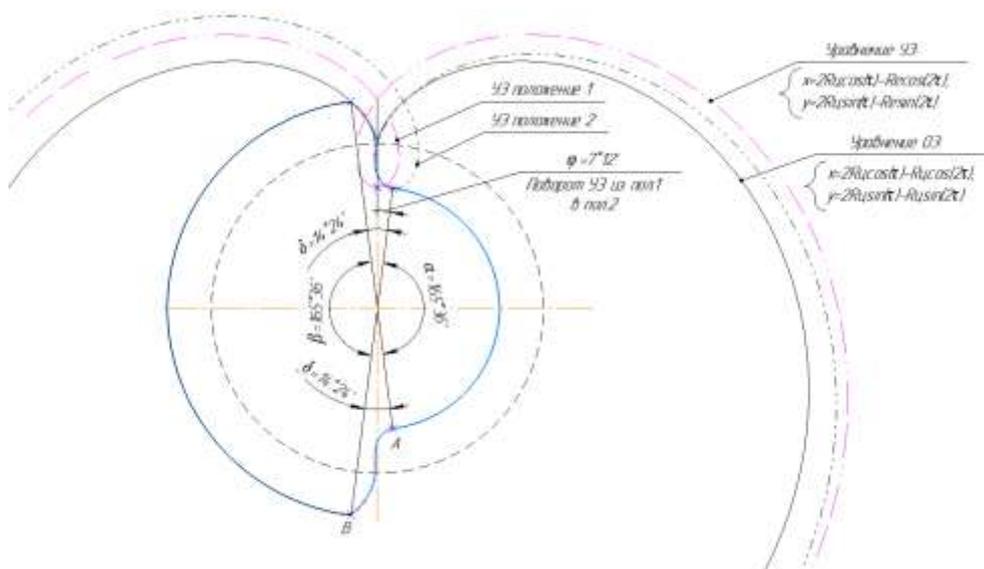


Рис. 2. Спроектированный профиль рабочей части винтового насоса

Далее профиль подвергся конструктивным доработкам и были получены готовые профили для ведомого и ведущего винта представленные на рис. 3.

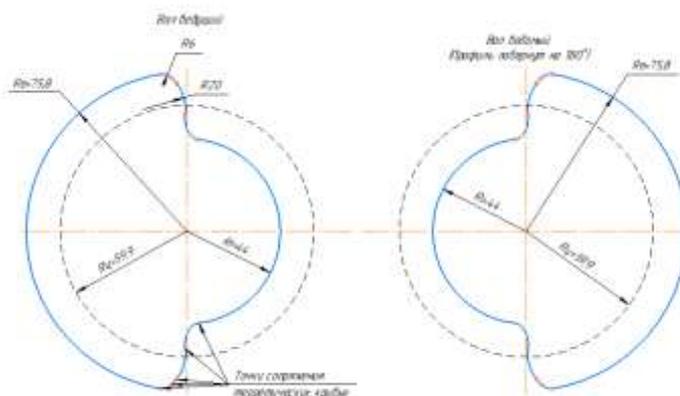


Рис. 3. Профили ведомого и ведущего винта

Также были расставлены технологические зазоры в обойме винтов рис.4 и рассчитаны значения утечек перекачиваемой жидкости в зазорах.

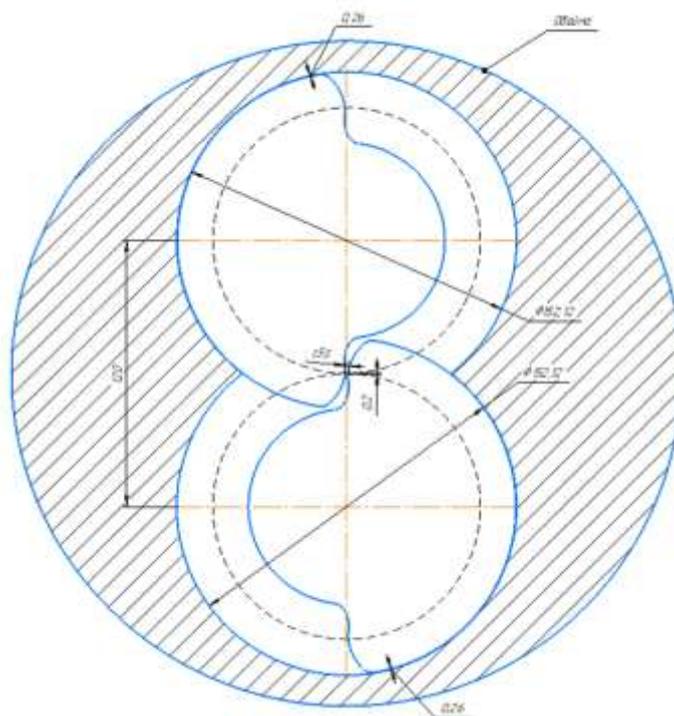


Рис. 4. Расположение винтов насоса в обойме

После проверки значений утечки и расчёта коэффициента объёмных потерь полученные результаты анализировались на предмет прохождения установленным критериям. Подобным образом проводились расчёты разных профилей с изменением габаритных характеристик, кривизной профиля и величиной зазора, в данной статье представлен уже окончательный вариант профиля.

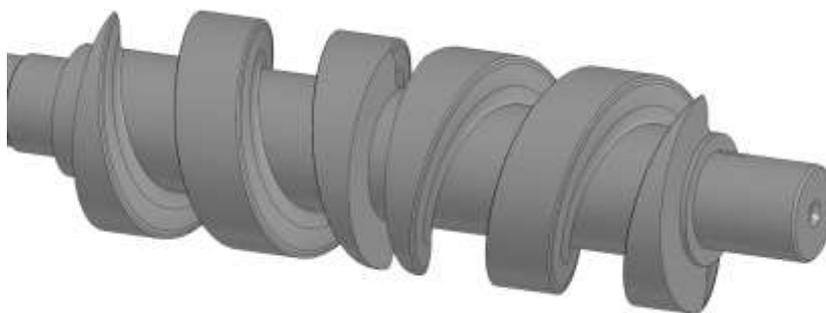


Рис. 5. Электронная модель ведущего винта проектируемого насоса.

Заключение

Проведённые расчёты коэффициента объёмных потерь показал удовлетворительный результат, составляющий 89%, что обеспечивает низкие потери мощности насосного агрегата и эффективную работу.

Окончанием проектирования профиля рабочей части роторов двухвинтового насоса служит подготовка 3D модели винта на основании полученного профиля (рис.5), а также подготовка конструкторской документации.

В данной статье был рассмотрен пример геометрического расчёта профиля винта, что является одним из начальных этапов большой работы по созданию виртуального двойника и имитации работы насоса в САЕ-системе COMSOL с последующим сравнением теоретических и практических данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рязанцев В.М. Роторно-вращательные насосы с циклоидальными зацеплениями. М.: Машиностроение. 2005. 345с
2. Пыж О.А., Харитонов Е.С., Егорова П.Б. Судовые винтовые насосы. Л.: Судостроение. 1969. 196 с.
3. Рязанцев В.М. Роторно-вращательные насосы с циклоидально эвольвентными профилями роторов // Вестник машиностроения. 1995. №1.С.22-25.

DESIGN OF THE PROFILE OF THE WORKING PART OF THE ROTORS OF A TWO-SCREW PUMP

¹Ermakov Alexander Yurievich, student gr. 21-ZTEm;

²Kunkevich Sergey Vladimirovich, Cand. Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Power Engineering

^{1,2}Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia, e-mail: eay@balt-energo.ru

The article deals with the design of the profile of the working part of the rotors for two-screw pumps. The choice of the type and design of the pump, the justification for the choice of the profile, as well as the description of the stages of designing the screw profile are carried out.

РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕПЛОТДАЧИ ТРУБЧАТО-ПЛАСТИНЧАТЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ ПРИ НАГРЕВЕ И ОХЛАЖДЕНИИ ВОЗДУХА

¹Кошелев Сергей Валерьевич, канд. техн. наук, доцент кафедры судовых энергетических установок);

²Ейдеюс Альгирдас Йозапович, канд. техн. наук, доцент, консультант-наставник кафедры судовых энергетических установок

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

Рассматриваются особенности определения коэффициента теплоотдачи трубчато-пластинчатых теплообменных аппаратов с учетом инееобразования на наружной поверхности. Описываются три безразмерные величины, характеризующие интенсивность теплоотдачи. Излагаются и анализируются методики расчета интенсивности теплоотдачи. Целью работы является определение достоверных методик расчета искомых величин путем сравнения расчетных данных, полученных по методикам, с экспериментальными данными. Результатом проведенного исследования являются рекомендации по выбору методик расчета или их сочетаний.

Введение

Коэффициент теплоотдачи (КТО) и падение давления (ПД) охлаждаемой или нагреваемой среды являются важнейшими показателями работы любого теплообменного аппарата. В настоящей работе рассматриваются лишь трубчато-пластинчатые теплообменники (ТО), выполненные из круглых труб и сплошных плоских рёбер. Образование слоя инея на теплопередающей поверхности таких воздухоохладителей (ВО) в меньшей степени ухудшает термогидравлические характеристики по сравнению с ВО других типов [1]. Конструкции рассматриваемых ТО различаются многообразием значений наружного диаметра труб d_t , поперечного S_t и продольного S_l их шага в пучке, шага S_p и толщины δ_p рёбер, числа рядов труб вдоль Nr и поперёк Nt потока воздуха. Единое мнение о преимуществах шахматного или коридорного расположения труб в пучке пока не сформировано. С учётом неравномерного нарастания слоя инея по рядам труб нередко шаг рёбер S_p принимается неодинаковым вдоль потока воздуха. Чаще его уменьшают от входа к выходу ВО, хотя многие исследователи отмечают наименьшую толщину слоя инея δ_u на трубах и рёбрах первого ряда [2]. Число рядов труб по ходу воздуха Nr находится при проектировании ВО с учётом предъявляемых ограничений. Число рядов труб в поперечном сечении Nt преимущественно зависит от объёмного расхода V_b охлаждаемого воздуха и тепловой нагрузки Q_0 , на которую влияет полное термическое сопротивление ВО.

Целенаправленные исследования теплоотдачи и падения давления при нагреве газов проводятся с 1915 г. [3]. Обратное направление теплового потока при охлаждении не оказывает существенного влияния на КТО [4]. Несмотря на сравнительно большой объём экспериментальных работ и методик обобщения их результатов, до настоящего времени нет чётких рекомендаций по выбору зависимостей для расчёта КТО в ВО даже при отсутствии массообмена на стороне воздуха. Значительно меньше исследований по теплоотдаче при образовании слоя инея на поверхности ВО. Все авторы согласны с тем, что образование инея повышает аэродинамическое сопротивление ВО. Относительно его влияния на КТО нет единодушного мнения. Одни авторы отмечают повышение КТО с ростом слоя инея δ_u , объясняя это ростом шероховатости обмерзающей поверхности [5]. В более поздних работах установлено, что шероховатость инея влияет лишь на начальной стадии его образования. С течением времени из-за действия потока воздуха и повышения температуры поверхности инея $t_{пи}$, вызванного ростом полного термического сопротивления ВО, влияние шероховатости уменьшается [1]. В инженерных расчётах считается допустимым находить КТО на поверхности ВО по подходящей зависимости конвективной теплоотдачи [6, 2]. При этом, однако, следует учитывать, что полный тепловой поток $q_{п}$ при конденсации влаги и образовании инея имеет составляющие явного q_d и скрытого q_c теплового потока.

В рамках данной работы сделан обзор существующих подходов к определению КТО в трубчато-пластинчатых ТО, собраны доступные экспериментальные данные о КТО с указанием условий проведения опытов, выполнены расчёты КТО ряда ТО по разным методикам при отсутствии слоя инея или загрязнений. Анализ показывает, что большинство методик подготовлено на основе экспериментальных данных, относящихся к компактным ТО с шагом рёбер $S_p < 4$ мм. При этом к ТО поступал воздух с положительной температурой ($t_{b1} > 0^\circ\text{C}$) и высоким влагосодержанием d_{b1} . При низких температурах такие ВО обычно работают в режиме периодической оттайки с длительностью цикла не более нескольких часов. Судовые и промышленные холодильные установки (ХУ) чаще относятся к низкотемпературным, в которых на вход ВО поступает воздух с низкой температурой ($t_{b1} < -10^\circ\text{C}$) и малым влагосодержанием d_{b1} , а оттайки должны проводиться с периодом до нескольких суток. Чтобы сократить частоту оттаек без существенного снижения эффективности, подобные ВО изготавливают с повышенным шагом рёбер S_p . Поэтому проверка пригодности методик расчёта КТО проводилась на примерах ВО с шагом рёбер $S_p > 5$ мм и температуры $t_{b1} < -10^\circ\text{C}$.

Обобщение результатов измерений

По итогам определённой серии опытов строят графики и получают эмпирические зависимости показателей интенсивности теплоотдачи от основных влияющих величин. При обобщении опытных данных коэффициент наружной теплоотдачи α_b , Вт/(м·К) нередко включают в состав безразмерных величин [7]:

число Нуссельта $Nu = \alpha_b \cdot d_T / \lambda_b$, число Стантона $St = \alpha_b / (w \cdot \rho \cdot c_p)$, фактор Колборна (Colburn) $j = St \cdot Pr^{2/3} = Nu / (Re \cdot Pr^{1/3})$,

где d_T - характерный размер, обычно равный диаметру труб ТО; $w\rho$ - массовая скорость потока, отнесенная к лобовому или живому сечению ТО; λ_b - коэффициент теплопроводности воздуха; c_p - удельная теплоёмкость воздуха; Re - число Рейнольдса; Pr - число Прандтля.

Из предыдущего вытекает равенство:

$$\alpha_b = Nu \cdot \lambda_b / d_T = j \cdot w\rho \cdot c_p / Pr^{2/3}. \quad (1)$$

В отечественной литературе [8,9,10] расчёт коэффициента теплоотдачи (КТО) в воздухоохладителях (ВО) почти целиком базируется на работах А.А. Гоголина. Им предложено находить КТО по условиям движения воздуха в щелевых каналах с использованием эквивалентного диаметра d_3 в качестве характерного линейного размера. Критерий (число) Нуссельта записывается в виде:

$$Nu = C Re_{d_3}^n Pr^m \quad (2)$$

Число Re_{d_3} определяется по скорости воздуха в живом (суженном) сечении. Параметры C , n , m находятся по результатам испытаний ВО соответствующего типа. В научном сообщении [11] приводится графическая зависимость значений $\lg(Nu)$ от $\lg\left(\frac{L}{d_3}\right)$ в пластинчатых поверхностях, построенная по результатам семи серий опытов, выполненных разными авторами. На ней показано, что при $Re_{d_3} = 2000$ большинство точек ложится на прямые линии при значениях показателя степени $n = 0.57 - 0.65$ в уравнении (2). Для определения КТО α_b в ВО, работающих в обычных для кондиционирования воздуха условиях ($t_b \approx 20^\circ$), предложен график его зависимости от массовой скорости $w\rho = 1 - 10 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$ и $\left(\frac{L}{d_3}\right) = 5 \dots 50$. Он подходит для ВО с коридорным расположением труб, а также шагом рёбер $S_p = 2 - 4$ мм и $d_T = 10 - 20$ мм. В книге [8] этот график приводится без полного перечня ограничений.

Зарубежные специалисты обобщенные данные о теплоотдаче компактных теплообменников чаще всего представляют в виде зависимости фактора Колборна j от числа Рейнольдса Re .

Формулы (корреляции) для определения фактора j применительно к аппаратам с круглыми трубами и плоскими рёбрами удалось найти в работах [12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24, 15,25,26].

Упомянутые выше источники с экспериментально полученными значениями j_3 и/или Nu_3 охватывают ТО с разными конструктивными и режимными параметрами. Каждая серия опытов проводилась в сравнительно узком диапазоне влияющих величин. Все исследователи отмечают решающее влияние скорости воздуха на интенсивность теплоотдачи, и представляют результаты в зависимости от числа Re и других параметров. Чаще всего используется число Re_d , в котором характерным размером является наружный диаметр труб d_T или воротничков (Collar) d_c насадных рёбер. Нередко встречается число Re_h с гидравлическим диаметром d_h в качестве характерного размера. Иногда используется эквивалентный

диаметр d_3 щелевых каналов между пластинами и трубами. К сожалению, авторы некоторых публикаций не уточняют, какая именно величина служит характерным размером. По умолчанию, иногда приводят просто Re , полагая его равным Re_d . При обобщении опытных данных, полученных как самостоятельно, так и заимствованных из других источников, некоторые авторы наряду с диаметром d_T или d_c используют гидравлический диаметр d_h , а также внешнюю степень оребрения β . Приведём формулы для этих величин:

$$d_c = d_T + 2 \cdot \delta_p; d_h = 4 \cdot F_{ж} \cdot \frac{L}{F_H}; \quad (3)$$

$$d_3 = (2(S_t - d_T) \cdot (S_p - \delta_p) / (S_t - d_T + S_p - \delta_p)); \beta = F_{ж} / F_T, \quad (4)$$

где $F_{ж}$ - площадь живого сечения, F_H - площадь наружной поверхности ТО, F_T - площадь труб между рёбрами, L - длина пластин. Исследователи отмечают решающее влияние скорости воздуха в живом сечении $w_{ж}$ на интенсивность теплоотдачи, и представляют результаты в зависимости от числа Re и других параметров, наряду со скоростью воздуха в лобовом сечении w_L .

Основные данные о конструктивных и режимных параметрах испытанных разными авторами ТО, которые нам удалось сгруппировать, приводятся в таблице 1.

Таблица 1

Параметры оребрения и диапазон режимных параметров ТО

Источник	d_T , mm	L , mm	S_t , mm	S_l , mm	S_p , mm	Nr	Re_d	w_L , m/s	$w_{ж}$, m/s
7	10,21-17,17	44-89	25,4-38,1	22-44,5	3,18-3,28	2	1684-24739	1,322-11,699	2,62-21,83
13	9,92	88-138,7	25,4-40	22-34,67	2,2-4,2	4	1238-22440	0,076-3,365	0,189-5,9
27	10,55	64,95	25	21,65	2-3,2	3	623-15929	0,472-11,932	0,844-22,62
16	10,23	88	25,4	22	2,03-3,0	4	4020-5270	3,468-4,397	5,964-7,818
17	7,52	25,4-33,4	20,4-21	12,7-16,7	1,22-1,71	2	226-6802	0,248-7,104	0,455-13,73
18	7,59	25,4-38,1	21	12,7	1104	2-3	270-7329	0,309-8,383	0,534-14,66
28	10,3	19,05-76,2	25,4	19,05	1,4-2,82	1-4	706-3780	0,564-3,0	1,04-5,569
22	7,9	50	19	25	6,15	2	260-528	0,285-0,578	0,5-1,014
12	9,525	39,1-78,2	25,4	19 558	1,21-2,117	2-4	1442-3525	1,327-3,251	2,264-5,534
23	12,7	64,95	31,8	27,5	1,75	4	2000-30315	1,372-20,8	2,502-37,92
20	8	27-216	26	27	7,5-15	1-8	450-900	0,522-1,044	0,764-1,528
29	10,23	44-132	25,4	22	3-3,2	2-6	572-5259	0,527-4,677	0,888-8,167
15	7,9	88-220	23	22	7,98-21,98	4-10	324-1108	0,362-1,244	0,558-1,905
24	18	68-238	42	34	3	2-7	2000-6000	0,899-2,698	1,686-5,059
30	16,68	66-264	38,1	33	3,13-3,17	2-8	1960-7810	1,009-4,019	1,866-7,434
31	25,4	300	60	50	2,82	6	3047	0,943	1906
25	18,6	408	42	34	3,1	12	6062-12292	2,489-5,047	4,946-10,03
3	38	600	85	75	6,67	8	2000-12000	0,393-2,358	0,836-5,017
5	12,5	135	30	26	5,4	5	4800-7511	2,804-4,378	5,192-8,106
2	15	350	50	50	10	7	2931-4474	1,641-2,351	2,468-3,533

Напомним, что итоговые данные о теплоотдаче и гидравлическом сопротивлении, включая представление фактора j в графической, табличной или аналитической форме, получаются на основе соответствующих экспериментов. Даже авторы англоязычных зарубежных изданий вместо фактора j нередко приводят значения числа Nu , что можно считать общепринятым в нашей стране. Каждая серия опытов охватывает лишь ограниченный диапазон изменения конструктивных и режимных параметров ТО. Из-за сложности, высокой стоимости экспериментов и ограниченного диапазона далеко не всегда их результаты можно применить к условиям расчёта или проектирования конкретного ВО, применение же не вполне подходящих методик зачастую приводит к грубым ошибкам.

Отдельного рассмотрения заслуживают процессы, происходящие на поверхности ТО при образовании инея. До сих пор нет единого мнения относительно конвективной теплоотдачи по мере обмерзания. В статье [32] показано значительное увеличение коэффициента α_v в начальный период, который длится не менее двух часов, и сравнительно медленное его понижение. Другие исследователи полагают, что влияющая на теплоотдачу шероховатость инея проявляется лишь на протяжении короткого промежутка времени. Под влиянием скорости потока поверхность инея вскоре становится гладкой. Так, в статье [33] при обмерзании плоской пластины показан незначительный рост коэффициента α_v на протяжении до 30 минут как при ламинарном, так и турбулентном режимах течения. После этого КТО остаётся несколько выше значения, полученного при отсутствии инея. Не случайно в работах [2,6] коэффициент α_v находят по зависимостям сухого теплообмена с учетом изменения скорости воздуха в живом сечении $w_{ж}$ по мере обмерзания ВО.

В последнее время подготовлен целый ряд математических моделей образования инея на поверхности ВО, обзор которых можно найти в источниках [2 и др.]. Модели различаются принятыми допущениями. Их можно разделить на квазистационарные и динамические, сосредоточенные и распределённые. В них исследуются местные или средние значения толщины инея $\delta_{и}$, его плотности $\rho_{и}$ и теплопроводности $\lambda_{и}$, а также скорости воздуха, плотности теплового потока и интенсивности теплоотдачи. Предварительный анализ показывает, что при моделировании так или иначе используются формулы для определения коэффициента α_v при сухой теплоотдаче. Конкретная формула выбирается по усмотрению автора модели и редко повторяется в других моделях. Отсутствие единого подхода к определению коэффициента α_v подтверждает необходимость анализа и обобщения экспериментальных данных хотя бы по сухой теплоотдаче в трубчатопластинчатых теплообменниках.

Методики расчёта интенсивности теплоотдачи

Конкретные формулы (корреляции) для расчёта фактора Колборна j или числа Нуссельта Nu , предложенные разными авторами и полученные путём обобщения ограниченного массива экспериментальных данных, обычно различаются перечнем учитываемых величин и диапазоном их изменения, видом формулы и значениями параметров уравнения (коэффициентов и показателей степени). Приведём краткое описание часто цитируемых методик расчёта, учитывая очередность их появления. Для удобства последующего сравнения присвоим обсуждаемым методикам порядковые номера, указывая фамилию автора (или первого из нескольких), год публикации и номер источника, из которого взята методика.

М1. Rich, 1973, [12] провёл испытание четырёхрядного ТО с шахматным расположением труб при разных значениях шага рёбер $S_p = 1,27-8,47$ мм в условиях сухого теплообмена. Диаметр труб $d_T = 13,3$ мм, поперечный и продольный их шаг $S_t = 31,75$ мм, $S_l = 27,45$ мм. Получена следующая формула для j – фактора:

$$j = 0,195 \cdot Re_l^{-0,35}. \quad (5)$$

Здесь характерным размером в числе Re_l является продольный шаг труб S_l .

М2. Gray и Webb, 1986, [17] представили корреляцию j – фактора на основе результатов испытания 16 конфигураций четырёхрядных ТО при сухом теплообмене, выполненных самостоятельно и заимствованных из других источников:

$$j = 0,14 \cdot Re_d^{-0,328} (S_t/S_l)^{-0,502} (S_p/d_T)^{0,312} \quad (6)$$

Диапазон варьируемых переменных: $d_T = 9,9 - 19,8$ мм, $S_t = 20,3 - 50,8$ мм, $S_l = 17,5 - 46,0$ мм, $S_p = 1,1 - 8,47$ мм.

М3 Kayanasayan, 1994, [13]. Исследовал теплоотдачу в десяти четырёхрядных ТО с шахматным расположением труб. Диапазон конструктивных параметров: $d_T = 9,52 - 16,3$ мм, $S_t = 25,4 - 40$ мм, $S_l = 22 - 34,67$ мм, $S_p = 2,203 - 4,202$ мм, $\beta = 11,28 - 23,53$, число $Re_d = 100 - 30000$. Исследовался сухой теплообмен при нагреве горячей водой воздуха с начальной температурой 7 - 19,3 °С. Всего получено 110 значений j -фактора. Корреляция представлена в виде:

$$j = 0,15 \cdot Re_h^{-0,28} (\beta)^{-0,362}. \quad (7)$$

М4. Wang C. и др. 1996 [14] испытали 15 образцов ТО, имеющих диаметр труб с воротничками $d_T = 10,23$ мм, $S_t = 25,4$ мм, $S_l = 22$ мм. В процессе опытов поочередно измеряли значения шага рёбер $S_p = 1,77 - 3,21$ мм, их толщины $\delta_p = 0,13 - 0,2$ мм, число рядов труб $N_r = 2 - 6$. Путём множественной регрессии результатов испытаний получена формула:

$$j = 0,394 \cdot Re_d^{-0,392} (\delta_p/S_l)^{-0,0449} \cdot (S_p/d_T)^{-0,212} \cdot Nr^{-0,0897}. \quad (8)$$

М5 Karartas и др. 1996. [15] провели испытания четырёх образцов не обмерзающих ВО для бытовых холодильников системы «no-frost». Они получили корреляцию:

$$j = 0,138 \cdot Re_d^{-0,281} (\beta)^{-0,407}, \text{ при } (Re_d = 300 - 1000 \text{ и } \beta = 1 - 6). \quad (9)$$

М6. Wang C. и др. 1997, [16] испытали девять ВО при конденсации влаги на всей наружной поверхности. Конструктивные данные: $d_T = 10,23$ мм, $S_t = 25,4$ мм, $S_e = 22$ мм, $\delta_p = 0,13$ мм, $S_p = 1,82 - 3,2$ мм, $N_r = 2 - 6$. В трубы подавалась вода с температурой $t_{w1} = 7^\circ\text{C}$ при скорости $W_w = 1,5 - 1,7$ м/с. Рабочие параметры на стороне воздуха: $t_{b1} = 27^\circ\text{C}$; $\varphi = 0,5 - 0,9$; $w_{л} = 0,3 - 4,5$ м/с. Получены корреляции факторов сухой (явной) теплоотдачи в четырёхрядном ВО j_4 и ВО с другими числами рядов j_N :

$$j_4 = 0,29773 \cdot Re_d^{-0,364} (\beta)^{-0,168}, \quad (10)$$

$$j_N = 0,4 \cdot Re_d^{(-0,468+0,04076 \cdot Nr)} (\beta)^{0,159} \cdot Nr^{-1,261}. \quad (11)$$

М7. Wang C. и Chang, 1998, [17] исследовали тепло-массообмен на поверхности 11-ти ТО, пять из которых имели плоские алюминиевые рёбра. Оценивалось влияние гидрофильного покрытия пластин на теплоотдачу и падение давления (ПД). Опыты показали, что при сухом теплообмене оно практически не влияет на характеристики ТО. Используя не только собственные данные, авторы предложили формулы расчёта фактора Колборна для четырёхрядного j_4 и многорядного j_N ТО:

$$j_4 = 0,357 \cdot Re_d^{-0,328} (S_t/S_l)^{-0,502} (S_p/d_T)^{0,0312} (S_t/d_T)^{-1,28}, \quad (12)$$

$$\frac{j_N}{j_4} = 0,991 \cdot [2,24 \cdot Re_d^{-0,092} \cdot (\frac{N_r}{4})^{-0,03}]^{(0,607 \cdot (4-N_r))}. \quad (13)$$

М8. Kim N. и др. 1999, [18] обобщили опубликованные в девяти источниках по теплоотдаче в 47-и ТО с шахматным расположением труб. Исходные данные охватывают диапазон $d_T = 7,3 - 19,3$ мм, $S_t = 21 - 50,8$ мм, $S_l = 12,7 - 44,4$ мм, $\delta_p = 0,11 - 0,406$ мм, $S_p = 0,99 - 8,5$ мм, $N_r = 1 - 8$. Получена корреляция фактора j_3 для ТО с числом рядов труб $N_r \geq 3$:

$$j_3 = 0,163 \cdot Re_d^{-0,369} (S_t/S_l)^{0,106} (S_p/d_T)^{0,0138} (S_t/d_T)^{0,13}. \quad (14)$$

При числе рядов N_r равном 1 или 2, используется формула

$$j_{1,2} = j_3 \cdot 1,043 [Re_d^{-0,14} (S_t/S_e)^{-0,564} (S_p/d_T)^{-0,123} (S_t/d_T)^{1,17}]^{(3-N_r)}. \quad (15)$$

Формула (14) справедлива при $Re_d = 505 - 24707$, а формула (15) - при $Re_d = 591 - 14430$.

М9. Wang C. и др. 2000, [19] обобщили результаты как собственных, так и заслуживающих доверия данных других исследователей, полученных при испытаниях 74 ТО с параметрами $d_T = 6,35 - 13,35$ мм, $S_t = 17,7 - 31,75$ мм, $S_l = 12,4 - 32$ мм, $\delta_p = 0,115 - 0,2$ мм, $S_p = 1,23 - 8,7$ мм, $N_r = 1 - 6$. Всего обработано 672 значения j -фактора. К сожалению, в обрабатываемом массиве преобладали данные по ТО с малым шагом рёбер. Менее 3% исходных данных относится к ТО с шагом $S_p \geq 4$ мм. Тем не менее, данная статья цитируется наиболее часто. Корреляция фактора j приводится с учётом числа рядов N_r . Если $N_r = 1$, то:

$$j_1 = 0,108 \cdot Re_d^{-0,29} (S_t/S_l)^{c1} (S_p/d_T)^{-1,084} (S_p/d_h)^{0,786} (S_p/S_t)^{c2}, \quad (16)$$

где $c1 = 1,9 - 0,23 \ln(Re_d)$, $c2 = -0,236 + 0,126 \ln(Re_d)$.

Когда $N_r \geq 2$:

$$j_n = 0,086 \cdot Re_d^{c3} N_r^{c4} (S_p/d_T)^{c5} (S_p/d_h)^{c6} (S_p/S_t)^{-0,93}, \quad (17)$$

где $c3 = -0,361 - 0,042 \cdot \frac{N_r}{\ln(Re_d)} + 0,158 \cdot \ln\left(N_r \left(\frac{S_p}{d_T}\right)^{0,41}\right)$,

$c4 = -1224 - 0,076 \left(\frac{S_e/d_h}{\ln(Re_d)}\right)^{1,42}$, $c5 = -0,083 + 0,058 \cdot \frac{N_r}{\ln(Re_d)}$, $c6 = -5,5735 + 1,21 \ln(Re_d/N_r)$.

Характерно, что в обеих корреляциях используются диаметры d_T и d_h .

M10. Wang C. и др. 2000, [21] провели дополнительные испытания ВО в условиях конденсации влаги. Обобщены результаты испытаний 31ВО с размерами $d_T = 7,53 - 10,34$ мм, $S_t = 21 - 25,4$ мм, $S_l = 12,4 - 22$ мм, $\delta_p = 0,115 - 0,13$ мм, $S_p = 1,19 - 3,2$ мм, $N_r = 1 - 6$. Справедливая для чисел $Re_d = 300 - 5000$ корреляция j -фактора представлена в виде:

$$j = 19,36 \cdot Re_d^{a1} \cdot N_r^{-1,291} \cdot (S_p/d_T)^{1,352} \cdot (S_l/S_t)^{0,6795}, \quad (18)$$

где $a1 = 0,3745 - 1,554(S_p/d_T)^{0,24}(S_l/S_t)^{0,12}N_r^{-1,9}$.

M11. Lee T. и др. 2002, [22] провели испытания трёх ВО, используемых в бытовых морозильниках/холодильниках системы “no-frost”. Один ВО имел сплошные пластины на круглых трубах с шахматным их расположением. Его размеры: $d_T = 7,9$ мм, $N_r = 10$, $B = 320$ мм, $H = 190$ мм, $L = 50$ мм, $F_H = 1,05$ м². КТО представлен в зависимости от лобовой скорости w_L , а число N_{ud} – от числа Re_d . При этом $Re_d = 260 - 525$, а $\frac{N_{ud}}{Pr} = 5 - 7,75$. Получена корреляция:

$$N_{ud} = 0,162 \cdot Re_d^{0,61}. \quad (19)$$

M12Mc Quiston 2005 [23] Обобщённые данные о КТО в трубчато-пластинчатых ТО авторы книги представили в виде графика взаимосвязи между фактором j и безразмерным параметром JP:

$$JP = Re_d^{-0,4} \left(\frac{F_H}{F_T}\right)^{-0,15}, \quad (20)$$

где F_T - наружная поверхности труб без рёбер.

M13 Kim Y. и Kim Y. 2005, [20] провели испытания 22-х ВО с большим шагом рёбер при сухом теплообмене. Рассмотрены ТО с шахматным и коридорным расположением труб. Расположение труб в пучке учитывалось несовпадением гидравлического диаметра d_h при одинаковых размерах труб и пластин, но неодинаковых значениях поперечного шага труб S_t . Для коридорного пучка $S_t = 26$, а для шахматного $S_t = 13$. Во всех опытах неизменными оставались $B = 400$ мм, $d_t = 8$ мм, $S_e = 27$ мм, $t_{в1} = 3^\circ\text{C}$, $\varphi_1 = 0,6$, $t_s = 33^\circ\text{C}$. Варьируемые величины: $S_p = 7,5; 10; 12,5; 15$ мм, $N_r = 1,2,3,4$, объёмный расход воздуха $V = 0,8; 1,1; 1,4; 1,7$ м³/мин, откуда $w_L = 0,54 - 1,14$ м/с. Путём регрессионного анализа получена корреляция j -фактора:

$$j = 0,17 \cdot Re_h^{-0,349} N_r^{-0,141} (S_p/d_T)^{-0,384}. \quad (21)$$

Она справедлива в диапазоне чисел $Re_h = 600 - 2000$.

M14. Xie G. и др. 2009 [24]. Ориентируясь на промышленные ТО больших размеров, авторы составили 3D-модель ТО с шахматным пучком труб. Численный анализ позволил им проследить влияние конструктивных параметров на теплоотдачу при сухом теплообмене. Путём регрессивного анализа результатов многочисленных расчётов они получили корреляцию для числа Nu:

$$Nu = 1,556 \cdot Re_d^{0,3414} (N_r \cdot S_p/d_T)^{-0,165} \cdot (S_t/S_l)^{0,0558}. \quad (22)$$

Диапазон её применения: $w_L = 0,67 - 4 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, $Re_d = 1000 - 6000$, $d_t = 16 - 20$ мм, $S_p = 2 - 4$ мм, $S_t = 38 - 46$ мм, $S_l = 32 - 36$ мм.

M15. Barbosa J. и др. 2009, [15] провели испытания восьми ВО, применяемых в холодильниках “no-frost”. Во всех опытах шахматное расположение труб, трубы и рёбра алюминиевые, одинаковы значения $d_t = 7,9$ мм, $S_t = 23$ мм, $S_e = 22$ мм, ширина ВО $B = 340$ мм, его высота $H = 59$ мм, толщина рёбер $\delta_p = 0,127$ мм. Варьировались величины $N_r = 4 - 10$, $L = 74 - 189$ мм, $n_p = 31 - 261$, степени оребрения $\beta = 2,57 - 5,82$. Путём обобщения всех опытных данных получена корреляция:

$$j = 0,6976 \cdot Re_d^{-0,4842} (\beta)^{-0,3426}. \quad (23)$$

Она охватывает диапазон $Re_d = 320 - 1200$, $\beta = 2,6 - 5,8$, $N_r/2 = 5$. Большинство расчётных значений j - фактора отклоняется от опытных значений на величину не более +- 7%. Показано, что при расчёте j - фактора по методикам M5 [15], M11[22] и M13 [20] получаются занижен-

ные до 40% его значения по сравнению с полученными опытными данными.

M16. Wang L. и др. 2013, [25] сравнили результаты опытного определения тепло-гидравлических характеристик пяти ТО с круглыми трубами и разным типом оребрения. Трубная часть всех ТО характеризуется параметрами $d_t = 7,9$ мм, $S_t = 42$ мм, $S_l = 34$ мм, шахматный пучок. В случае ТО с плоскими рёбрами $\delta_p = 0,3$ мм, $S_p = 3,1$ мм. Для такого ТО при $Nr = 12$ предложена корреляция:

$$Nu = 0,08 \cdot Re_d^{-0,71}. \quad (24)$$

M17. Naji Z. и Ibrahim, 2015, [26] при моделировании и испытаниях низкотемпературного испарителя охлаждаемого прилавка определяют КТО α_B по формулам:

$$\alpha_B = 0,113 Re_d^{0,755} Pr^{1/3} \cdot \beta^{-0,42} \cdot \frac{\lambda_B}{d_t}, \text{ при } (Re_B = 300 - 1000, \beta = 3,43 - 5,92), \quad (25)$$

$$\alpha_B = 0,116 Re_d^{0,719} Pr^{1/3} \cdot \beta^{-0,4071} \cdot \frac{\lambda_B}{d_t} \quad (Re_\alpha = 300 - 1000, \beta = 1 - 5,92). \quad (26)$$

Можно предположить, что последняя формула подходит при $\beta < 1,343$, а предыдущая (25) - при $\beta > 3,43$.

M18. MM. Schmidt Th. 1963, [3]:

$$Nu = 0,45 \cdot Re_l^{0,625} \cdot Pr^{1/3} \left(\frac{F_H}{F_T}\right)^{-0,375}, \quad (27)$$

где F_T – площадь наружной поверхности неоребрённых труб.

В число Re_l входит характерная длина $l = d_t \cdot \frac{F_H}{F_T}$.

M19. HE. Stasiulevicius, 1988 и HEDH, 1987, [3]:

$$Nu = C \cdot Re_d^{C1} \cdot Pr^{1/3} \left(\frac{S_t}{S_l}\right)^{0,2} \cdot \left(\frac{u}{d_T}\right)^{0,18} \cdot \left(\frac{h}{d_T}\right)^{-0,14}, \quad (28)$$

где $u = S_p - \delta_p$ - просвет между рёбрами.

$$C = 0,19, C1 = 0,65 \text{ при } Re = 100 - 20000$$

$$C = 0,05, C1 = 0,80 \text{ при } Re = 20000 - 200000$$

M20. MI. Mircovic, 1974, [3]:

$$Nu = 0,224 \cdot (u - d_T)^{0,1} \left(\frac{S_t - \delta_p}{d_T}\right)^{0,25} \cdot Re_l^{0,662} \cdot Pr^{1/3}. \quad (29)$$

Число Re_l здесь определяется в зависимости от длины $l_1 = \frac{2F_H}{\pi \cdot L_3 \cdot l_k}$, где $l_k = (2 \cdot h + S_p)/S_p$.

M21. FD. FDBR, 1980, [3]: совпадает с формулой (27), но характерная длина $l^1 = F_H/(\pi \cdot L_3)$.

M22. EG. ESCOA, 1979, [3]:

$$Nu = 0,25 \cdot Re_d^{0,65} \cdot Pr^{1/3} \left(\frac{t_B + 273,2}{t_{p6} + 273,2}\right)^{0,25} \left(\frac{d_T + \delta_p}{d_T}\right) \cdot C_3 \cdot C_5. \quad (30)$$

M23. WA. WDI Waermeatlas, 1994, [3]:

$$Nu = C \cdot Re_d^{0,6} \cdot Pr^{1/3} \left(\frac{F_H}{F_T}\right)^{-0,15}, \quad (31)$$

где $C = 0,33$ при $Nr = 2$; $C = 0,36$ при $Nr = 3$; $C = 0,38$ при $Nr > 3$.

M24. VA. Vampola J. 1966, [3] использует эквивалентный диаметр рёбер $d_{p3} = (F_p \cdot S_p/2)^{0,5}$ при определении гидравлического диаметра ТО:

$$d_h = (F_t \cdot d_T + F_p \cdot d_{p3}) / (F_T + F_p). \quad (32)$$

Число Nu определяется по двум формулам:

$$Nu = 0,251 \cdot Re_h \left(\frac{S_t - d_t}{d_t}\right)^{-0,2} \cdot \left(\frac{S_t - d_t}{S_p - \delta_p} + 1\right)^{-0,2} \cdot \left(\frac{S_t - d_t}{S_m - d_t}\right)^{0,4}, \quad (33)$$

$$Nu = 0,251 \cdot Re_h^{0,67} \left(\frac{S_t - d_t}{d_t}\right)^{-0,2} \cdot \left(\frac{S_t - d_t}{S_p - \delta_p} + 1\right)^{-0,2}, \quad (34)$$

где $S_m = \left(\frac{S_t}{2} + S_l^2\right)^{0,5}$ – минимальное расстояние между центрами труб в шахматном пучке.

Если $S_m < S_T$ подходит формула (33), иначе формула (34).

Обозначенные двумя буквами методики взяты из книги Frass, 2015, [3]. В ней применительно к промышленным ТО с круглыми трубами и шахматным их расположением приводится ряд методик, хотя подробные данные о диапазоне их применения указаны не всегда.

Сравнительная оценка методик расчета

Ввиду значительного числа опубликованных методик расчёта и наличия трёх взаимосвязанных показателей интенсивности теплоотдачи получается большой объем сравниваемых величин. Для полной оценки степени совпадения результатов расчёта с опытными данными необходимо сопоставлять расчётные значения фактора j , числа Nu и коэффициента α с полученными по опытными данным их значениям Nu_e , j_e , α_e , соответственно. Расчет показателей интенсивности теплоотдачи по приведенным выше методикам проводился с использованием конструктивных и режимных параметров ТО, приведенных в источниках с описанием экспериментальных данных. Несмотря на ограниченный диапазон применения приведенных выше методик, расчет по каждой из них выполнен по условиям проведения всех описанных экспериментов. Это сделано с целью определения степени пригодности применения методик в широком диапазоне исходных данных, а также для удобства последующего обобщения результатов испытаний, полученных разными исследователями.

Напомним, что по большинству методик искомой величиной является фактор Колборна j или число Nu , а в методике М17 – КТО α_B . С учетом взаимосвязи между ними для каждого сочетания исходных данных нетрудно получить значения всех трех показателей интенсивности теплоотдачи. Для сравнительного анализа методик нами использовано число Nu , которое зависит от числа Re . Определяющим размером в числе Re_d по большинству методик считается наружный диаметр труб d_T или воротничков на них. Когда методика ориентирована на использование гидравлического диаметра d_h , переход от Re_h и Re_d осуществляется по соотношению:

$$Re_d = Re_h \cdot d_T/d_h \quad (50)$$

Такой переход позволяет обобщать опытные данные с использованием числа Re_d в качестве одного из основных влияющих на теплоотдачу факторов.

Для снижения трудоёмкости многовариантных расчетов основных показателей интенсивности теплоотдачи (j , Nu , α_B) была составлена компьютерная программа на основе MS Excel и Макроса с использованием MS Visual Basic. В зависимости от цели расчета она занимает несколько листов электронной таблицы. Для одного варианта расчета задаются конструктивные и режимные параметры ТО, автоматически вводятся показатели теплофизических свойств воздуха, а также производятся расчеты искомых величин, используемых в соответствующих методиках. Для каждого варианта расчета к исходным данным относятся: наружный d_T и внутренний d_i диаметры труб, ширина B , высота H и длина пластин L ТО, поперечный S_t и продольный S_l шаг труб, толщина δ_p и шаг S_p ребер, число ребер n_p и рядов труб Nr , а также температуры воздуха на входе $t_{в1}$ и выходе $t_{в2}$ и относительная влажность воздуха на входе в ТО.

Для всего массива, содержащего 355 строк, найдены средние значения $j_{э.ср}$, $Nu_{э.ср}$ и $\alpha_{э.ср}$. Они составили $j_{э.ср} = 0,013981$; $Nu_{э.ср} = 30,0055$; $\alpha_{э.ср} = 62,23$ Вт/(м² · К). Определены также средние по каждой методике значения расчетных величин $j_{ср}$, $Nu_{ср}$, $\alpha_{ср}$. С использованием встроенных функций дополнительно найдены показатели статистического оценивания обсуждаемых величин: СКО, дисперсия и доверительный интервал (ДИ).

Основное внимание уделено сопоставлению расчетных чисел Nu и экспериментальных $Nu_{э}$. Для дальнейшего рассмотрения отобраны лишь методики, по которым отношения средних значений $Nu/Nu_{э.ср}$ оказываются в пределах 0,9-1,1. Для сравнительной оценки отобранных методик расчёта целесообразно использовать также текущие отношения $Nu_i/Nu_{э,i}$, которые при каждом сочетании исходных данных должны стремиться к единице.

В таблице 2 приводятся статистические оценки чисел Nu , полученных по 8 методикам: М4, М8, М10, М14, ММ, НЕ, WA, М10&WA. В строке М10&WA приводятся данные, полученные нами путём осреднения результатов расчёта по методикам М10 и WA. График отношения $Nu_i/Nu_{э,i}$ для данного варианта применения методик приводится на рисунке 1. Нижняя строка таблицы содержит оценки опытных значений $Nu_{э}$. Отметим, что средние значения чисел $Nu_{ср}$, полученных как по отдельным методикам, так и по опытными данным $Nu_{э.ср}$ полностью зависят от сочетания исходных данных. Они не относятся к целевым показателям.

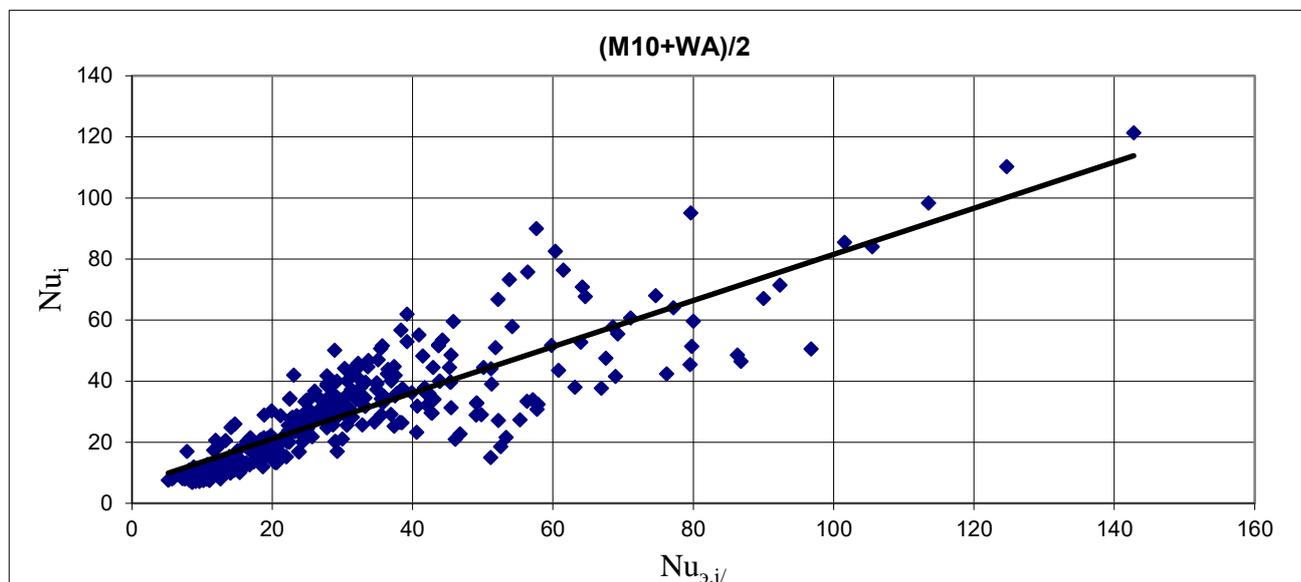


Рис. 1. Отношение расчетных значений числа Нуссельта Nu_i к экспериментальным $Nu_{э,i}$

Наиболее близкие к единице значения $(Nu_i/Nu_{э,i})_{cp}$ получаются по методикам М10, М14, WA и М10&WA. По гистограммам распределения отношений $Nu_i/Nu_{э,i}$ в таблице 2 показано, сколько точек из 355 входит в сравнительно узкие интервалы. Наибольшее их число входит по М10&WA. Последние четыре методики можно считать более подходящими.

Таблица 2

Оценка значений Nu , полученных по 8 методикам

	Абсолютные значения			Относительные значения			Число точек в интервалах		
	Nu_{cp}	СКО	$Nu_{cp} / Nu_{э,cp}$	$(Nu_i / Nu_{э,i})_{cp}$	СКО	размах	0,9-1,1	0,8-1,2	0,7-1,3
Методики									
М4	25,741	18,377	0,858	0,914	0,32	1,513	87	131	203
М8	27,263	13,554	0,909	1095	0,419	1,944	125	169	210
М10	28,773	19,990	0,959	0,984	0,300	1,867	134	200	262
М14	24,235	10,239	0,808	0,963	0,289	1,675	135	199	246
ММ	23,626	14,327	0,787	0,904	0,337	1,81	100	155	201
HE	25,806	16,658	0,860	0,945	0,303	1,777	133	187	242
WA	28,605	17,568	0,953	1060	0,327	2,017	112	186	246
М10&WA	28,688	18,450	0,956	1,022	0,27	1,86	153	223	279
Опыты	30,006	21,164							

Неполное совпадение результатов расчета с опытными данными может быть обусловлено как недостатками методик расчета, так и несогласованностью опытных данных, полученных разными авторами на разных экспериментальных установках при испытаниях ТО с несовпадающими параметрами. Из сказанного следует необходимость дальнейшего усовершенствования методик расчета, а также уточнения и накопления опытных данных об интенсивности теплоотдачи в ТО.

Заключение

Цель настоящей работы сводилась к сбору, анализу и обобщению экспериментальных и расчетных данных о теплоотдаче на стороне воздуха в трубчато-пластинчатых теплообменниках, изготовленных из круглых труб и сплошных плоских ребер. Исходные данные получены из заслуживающих доверия источников, опубликованных в зарубежных и отечественных изданиях. Опытные данные о значениях фактора Колборна j_3 , числа Нуссельта Nu_3 или коэффициента конвективной теплоотдачи α_3 отобраны лишь из 20 источников, содержащих достаточно полную ин-

формацию о методике и условиях определения любого из упомянутых показателей. Подходящими для выполнения расчетов признаны 355 их значения при несовпадающих исходных данных. Они охватывают широкий диапазон конструктивных и режимных параметров ТО.

Рассмотрено 26 методик расчета показателей интенсивности теплоотдачи j, Nu, α , между которыми существует аналитическая взаимосвязь. Основное внимание уделено определению числа Nu . Расчет его проводился по всем методикам во всем широком диапазоне исходных данных, хотя каждая из них подготовлена для своего более узкого диапазона. Отношения расчетных Nu и опытных $Nu_{\text{э}}$ при всех 355 сочетаниях исходных данных должна стремиться к 1,0. Отношения средних значений $Nu_{\text{ср}}/Nu_{\text{э,ср}}$ оказались в пределах 0,79-1,1 лишь по 12 методикам. Средние значения отношений $(Nu_i/Nu_{\text{э},i})_{\text{ср}}$ попали в диапазон 0,9-1,1 по 8 методикам. С учетом приведённых в таблице 2 показателей более подходящими для широкого диапазона исходных данных можно признать методики M10, M14, WA и M10&WA.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Huang J.-M., et al. The effects of frost thickness on the heat transfer of finned tube heat exchanger subject to the combined influence of fan types // Applied Thermal Engineering. 2008. №28 P. 728–737.
2. Королев И. А. Исследование камерного воздухоохладителя с учетом динамики образования инея на теплообменной поверхности аппарата. Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. Москва. 2020. 233 с.
3. Frass F. Principles of Finned-Tube Heat Exchanger Design for Enhanced Heat Transfer - 2nd ed. Institute for Thermodynamics and Energy Conversion, Vienna University of Technology. Vienna, Austria. 152p.
4. Интенсификация теплообмена в испарителях холодильных машин. Под ред. А.А. Гоголина - М.: Лёгкая и пищевая пром-ть. 1982.- 224с.
5. Явнель Б.К. Исследование влияния инея на теплопередачу в воздухоохладителях. Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. Москва. 1969. 118 с.
6. Aljuwayhel N. F. Numerical and Experimental Study of the Influence of Frost Formation and Defrosting on the Performance of Industrial Evaporator Coils. University of Wisconsin-Madison. 288p. 2006.
7. Kays W. M., London A. L. Compact Heat Exchangers. 2nd ed. McGraw-Hill. San Francisco, 1964. 216p.
8. Теплообменные аппараты холодильных установок / Г.Н. Данилова и др.- Л.: Машиностроение, 1986. 303 с.
9. Теплофизические основы получения искусственного холода: Справ.: Холодильная техника/Под ред. А.В. Быкова. М.: Пищ. пром-ть, 1980.
10. Судовые установки кондиционирования воздуха и холодильные машины./ Ю.В. Захаров – СПб. изд-во: Судостроение, 1994. 504 с.
11. Сушение воздуха холодильными машинами./ А.А. Гоголин. ГлавНИИ при ГосЭкономСовете СССР, ВНИИХолодПром. М.: Государственное издательство торговой литературы, 1962г. - 101с.
12. Taylor C. Measurement of finned-tube heat exchanger performance. A thesis presented to the academic faculty. Georgia Institute of Technology December 2004. 124p.
13. Kayansayan N. Heat transfer characterization of plate fin-tube heat exchangers. // Rev. Int. Froid. 1994. Vol. 17. No. 1. P. 49-57.
14. Wang C.-C. et al. Sensible heat and friction characteristics of plate fin-and-tube heat exchangers having plane fins // Int J. Refrig. 1996. Vol. 19, No. 4, P. 223-230.
15. J.R. Barbosa et al. A study of the air-side heat transfer and pressure drop characteristics of tube-fin ‘no-frost’ evaporators // Applied Energy. 2009. №86. P. 1484–1491.
16. Wang C.-C. et al. Performance of plate finned tube heat exchangers under dehumidifying conditions. // Journal of Heat Transfer. 1997. Vol. 11. P. 109-117.
17. Wang C.-C., Chang C.-T. Heat and mass transfer for plate fin-and-tube heat exchangers, with and without hydrophilic coating // Int. J. Heat Mass Transfer 1998. №41. P. 3109-3120.

18. Kim N.H. et al. Air-side heat transfer and friction correlations for plain fin-and-tube heat exchangers with staggered tube arrangements. // Journal of Heat Transfer. 1999. Vol. 121. P. 662-667.
19. Wang C.-C. et al. Heat transfer and friction characteristics of plain fin-and-tube heat exchangers, part II: Correlation // Int. J. Heat Mass Transfer. 2000. №43 P. 2693–2700.
20. Kim Y., Kim Y. Heat transfer characteristics of flat plate finned-tube heat exchangers with large fin pitch. // Int. J. Refrigeration. 2005. № 28. P. 851–858.
21. Wang C.-C. et al. An airside correlation for plain fin-and-tube heat exchangers in wet conditions. // Int. J. Heat Mass Transfer. 2000. №43. P. 1869–1872.
22. Lee T. H., Lee J. S., et al. Comparison of air-side heat transfer coefficients of several types of evaporators of household freezer/refrigerators. International Refrigeration and Air Conditioning Conference. 2002. P. 611.
23. McQuiston, Faye C. Heating, ventilating, and air conditioning: analysis and design / Faye C. McQuiston, Jerald D. Parker, Jeffrey D. Spitler.–6th ed. 623p.
24. Xie G. et al. Parametric study and multiple correlations on air-side heat transfer and friction characteristics of fin-and-tube heat exchangers with large number of large-diameter tube rows. // Applied Thermal Engineering. 2009. №29. P. 1–16.
25. Wang L.B., Zeng M. et al. Air-side heat transfer and friction characteristics of fin-and-tube heat exchangers with various fin types. // WIT Transactions on State of the Art in Science and Engineering. 2013. Vol. 63. P. 1755-8336.
26. Naji Z.H., Ibrahim K. Molding and testing of frost growth on low temperature display case evaporator. // International Journal of Engineering Research & Technology. 2015. Vol. 4. Issue 7.
27. Kang H.J. et al. Experimental study on heat transfer and pressure drop characteristics of four types. // J. of Thermal Science. 1994. Vol.3. №.1. P. 34-42.
28. Yan W.-M., Sheen P.-J. Heat transfer and friction characteristics of fin-and-tube heat exchangers // Int. J. Heat Mass Transfer. 2000. №43. P. 1651-1659.
29. Pirompugd W. et al. Finite circular fin method for heat and mass transfer characteristics for plain fin-and-tube heat exchangers under fully and partially wet surface conditions// Int. J. Heat Mass Transfer. 2007. №50. P. 552–565.
30. Liu Y.-C. et al. Airside performance of fin-and-tube heat exchangers in dehumidifying conditions – Data with larger diameter // Int. J. Heat Mass Transfer. 2010. №53.P. 1603–1608.
31. VDI Heat Atlas, part M. – Berlin, 2010. P. 1273-1277.
32. Гачилов Т.С., Иванова В.С. Исследование теплообмена со стороны воздуха оребренных воздухоохладителей//Холодильная техника.-1977.- № 6.
33. Yang D.-K. et al. Frost formation on a cold surface under turbulent flow. International Journal of Refrigeration. 2006. №29. P. 164–169.

CALCULATION OF HEAT TRANSFER INDICATORS OF TUBE- PLATE HEAT EXCHANGERS DURING HEATING AND COOLING OF THE AIR

¹Koshelev Sergey Valerjevich, Ph.D., Head of LRCRS;

²Eideyus Algirdas Iozapovich, Ph.D., Mentor consultant

^{1,2}Baltic Fishing Fleet State Academy FSBEI HE «KSTU»,
Kaliningrad, Russia, e-mail: kaf_xktk@bgarf.ru

The article discusses the features of determining the heat transfer coefficient of tubular-plate heat exchangers, taking into account frost formation on the outer surface. Three dimensionless quantities characterizing the intensity of heat transfer are described. Methods for calculating heat transfer intensity are presented and analyzed. The purpose of the work is to determine reliable methods for calculating the required quantities by comparing the calculated data obtained using the methods with experimental data. The result of the study is recommendations on the choice of calculation methods or their combinations.

МЕТОДИКА РАСЧЁТА И РЕГУЛИРОВАНИЯ ГИДРОМУФТЫ ДЛЯ ПРИВОДА МОЩНЫХ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ

¹Кункевич Сергей Владимирович, канд. тех. наук, доцент кафедры «Энергетики»;

²Толмачев Александр Викторович, канд. тех. наук, доцент кафедры «Энергетики»

^{1,2}Калининградский государственный технический университет,

Калининград, Россия, e-mail: ¹skunkevich@mail.ru; ²avto103071952@mail.ru

Электропривод мощных механизмов имеет существенный недостаток, связанный с запуском. Самый распространенный привод от надежного асинхронного трехфазного электродвигателя имеет существенное повышение пускового момента и связанный с ним заброс пускового тока, что обязывает иметь на этот случай 2х- 3-х кратный запас мощности электросети. Имеется ряд инженерных решений, снижающих потребление пускового тока, однако их применение вызывает электрические потери, что снижает эффективность их применения. Задача может быть решена за счет установки между двигателем и приводным механизмом гидравлических муфт с регулируемой степенью передаваемого момента. В данной работе дан алгоритм конструирования гидромуфты на основании критериального уравнения; рассматривается регулирование уровня масла в муфте за счет баланса опорожнения (постоянного истечения масла через дроссельные жиклеры) и наполнения (от шестеренчатого насоса). Течение масла через жиклеры также рассмотрено при дополнительном учете сил Кориолиса. Эта задача решается моделированием течения методом конечных элементов.

ВВЕДЕНИЕ

Использование асинхронных электродвигателей для привода вспомогательных механизмов является самым экономичным, простым, удобным в эксплуатации и распространенным. Одним из недостатков асинхронного привода является сложность регулирования частоты вращения и соответственно мощности. Эти недостатки ещё более обостряются в случае использования больших мощностей. Самый передовой частотный способ регулирования пока ограничен возможностями электронной аппаратуры до 1000 кВт. Для привода питательных насосов с мощностью более 12000 кВт целесообразно применение паротурбинного привода, обеспечивающего плавное регулирование частоты вращения в широком диапазоне. Пуск и регулирование частоты для механизмов с мощностью до 12000 кВт вынуждает использовать для этих целей устройства плавного регулирования крутящего момента. Одним из таких устройств является гидравлическая муфта. Общий вид привода с использованием гидромуфты приведен на рис.1.

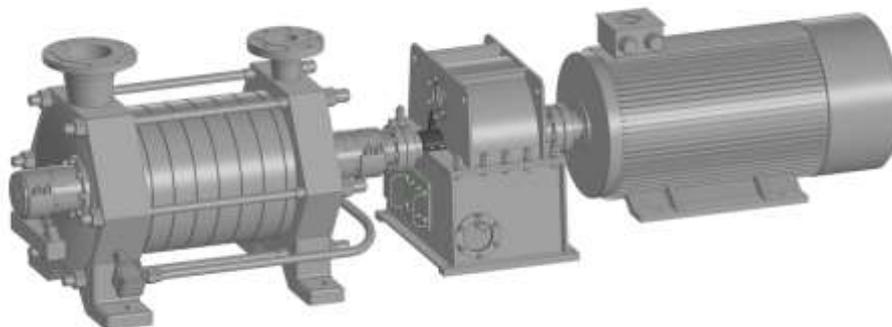


Рис. 1. Общий вид привода с использованием гидромуфты

Гидромуфта рис. 2 представляет собой объединение в одном агрегате лопастного насосного колеса на ведущем валу и турбинного колеса на ведомом валу. Чашки гидромуфты помещаются в герметичный кожух, при этом рабочее тело (масло) между колесом насоса и колесом турбины циркулирует в виде торообразного вихря. Векторы скорости кручения вихря и скорости вращения

колёс взаимно перпендикулярны, благодаря чему возникает сила Кориолиса, передающая крутящий момент.

Для возникновения эффекта кручения вихря необходимо иметь разницу угловых скоростей (скольжение), которая в реальных устройствах достигает 2... 3%. Потерянная кинетическая энергии превращается в тепловую, поэтому рабочую жидкость необходимо охлаждать посредством циркуляции через теплообменник.

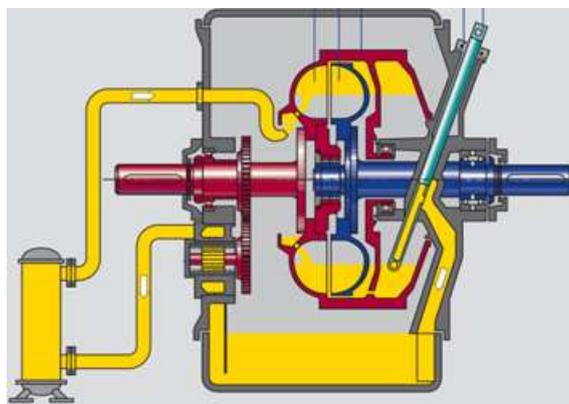


Рис. 2. Схема гидромуфты

Для регулирования передаваемого крутящего момента используют частичное заполнение муфты рабочим телом. Имеется несколько способов отбора масла из полости гидромуфты. Наиболее часто реализуемый – при помощи черпакового зонда. Этот способ позволяет изымать рабочую жидкость из вращающегося барабана через боковую стенку. Такой способ требует применения специального механизма, что существенно усложняет конструкцию по сравнению с нерегулируемой муфтой.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Рассмотрим основные закономерности, связанные с конструированием гидромуфты.

В основе расчетов положено критериальное уравнение баланса энергии гидромуфты, связывающее безразмерный коэффициент трения ξ , безразмерную меридиональную скорость φ со скольжением s и относительными размерами чашек r_1, r_2 .

$$\xi \cdot \varphi^2 = s(2-s) \left[1 - \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \right] \quad (1)$$

где: ξ – относительный коэффициент трения;

φ – безразмерная меридиональная скорость;

s – скольжение чашек;

r_1, r_2 – наименьший и наибольший радиусы тора;

Диаметр тора определится по требуемой мощности и согласованным s и φ :

$$D_{T_i} = \left[\frac{512 \cdot N_H}{\pi(1-\rho_r^2) \cdot (3+\rho_r^2)^{3/2} \cdot \left[1 - (1-s) \cdot \left(\frac{1+3\rho_r^2}{3+\rho_r^2} \right) \right] \cdot \varphi_i \cdot \rho \cdot \omega_H^3} \right]^{1/5} \quad (2)$$

Третье эмпирическое уравнение [2] связывает количество лопаток z с наибольшим диаметром гидромуфты:

$$z = 8,65 \cdot D^{0,276} \quad (3)$$

Обобщение опыта эксплуатации конструкций гидромуфт с наибольшим КПД выполнено в [1] и представлено на рис. 3. График представлен в логарифмических координатах.

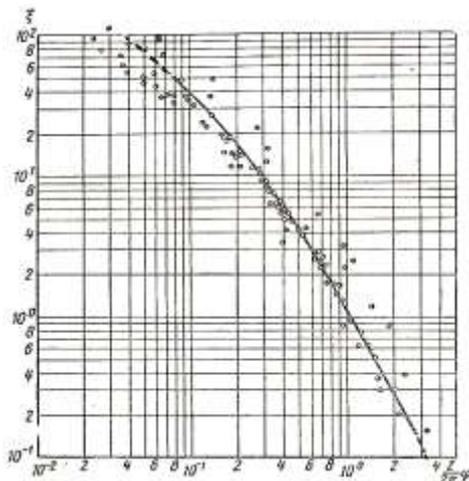


Рис. 3. Зависимость относительного коэффициента трения ξ от относительной скорости φ при наилучшем сочетании числа лопаток и КПД

По данному графику получено эмпирическое уравнение, позволившее численно связать относительную скорость с коэффициентом трения.

$$\Psi = \ln \left(\frac{z}{2\pi} \cdot \varphi \right) = \sqrt{33,10545 - 5,99743 \cdot \ln(\xi)} - 5,66628 \quad (4)$$

Алгоритм вычислений сводится к следующему:

1. Задаемся скольжением s и относительными радиусами тороидального вихря r_1 / r_2 ;
2. Задаемся рядом скоростей φ и по зависимости (1) вычисляем относительное трение;
3. По требуемой мощности по зависимости (2) вычисляем диаметр гидромуфты D ;
4. По эмпирической формуле (4) вычисляем функцию Ψ и количество лопаток

$z_2 = \frac{2\pi}{\varphi} \cdot e^\Psi$, а по формуле (3) определяем z_1 ;

Расчётные зависимости наносим на график и определяем z и φ , удовлетворяющее обеим зависимостям.

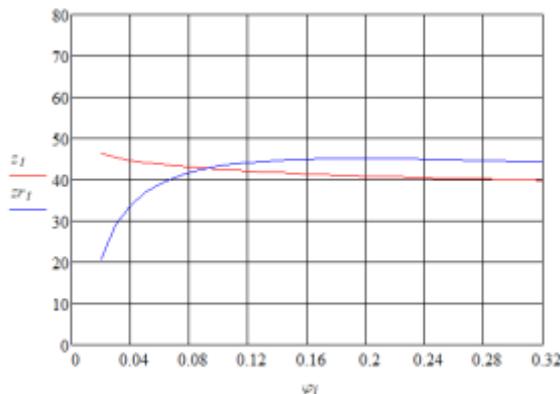


Рис. 4. Графический способ отыскания оптимальных характеристик гидромуфты.

Регулирование наполнения гидромуфты выполняется за счет поддержания баланса подачи и слива масла из барабана. Такой способ реализован в конструкции, приведенной на рис. 5.

При вращении ведущего вала начинает работать шестеренчатый насос и подавать масло для смазки подшипников и по сверлениям в ведущем и ведомом валах заполнять гидромуфту. Масло через зазор между чашками гидромуфты переходит в полость барабана, в котором по окружности выполнены калиброванные отверстия – жиклеры. Давление масла в кожухе в районе жиклеров определяется центробежным ускорением и может быть определено по формуле (5).

$$P_c = \rho_\tau (R_1^2 - R_0^2) \cdot \frac{\omega^2}{2} \quad (5)$$

Процесс вытекания через жиклеры определяется уравнением расхода:

$$Q_o = \mu_o \cdot z_o \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_o^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{P_c}{\rho_\tau}} \quad (6)$$

Коэффициент истечения $\mu_o = 0,6$ принят для турбулентного режима истечения.

Так как в процессе истечения уровень масла в полости муфты будет убывать, то и давление формирующее истечение будет снижаться. Из уравнения баланса масла найдем время опорожнения муфты:

$$\tau_j = \frac{4\delta \sqrt{R_1^2 - (R\tau_j)^2}}{\mu_o \cdot z_o \cdot d_o^2 \cdot \omega} \quad (7)$$

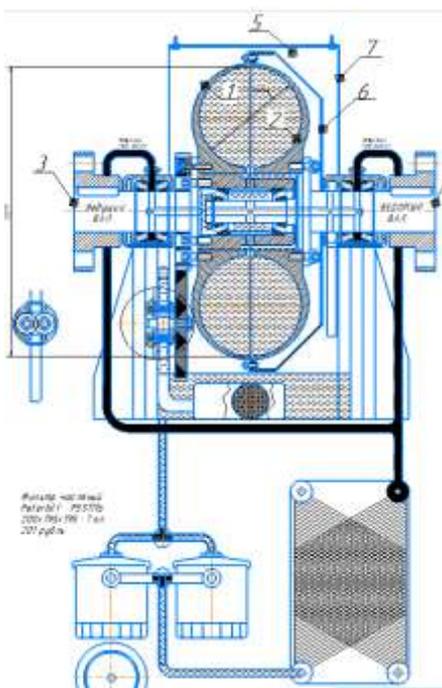


Рис. 5. Эскиз гидромуфты со схемой масляной системы

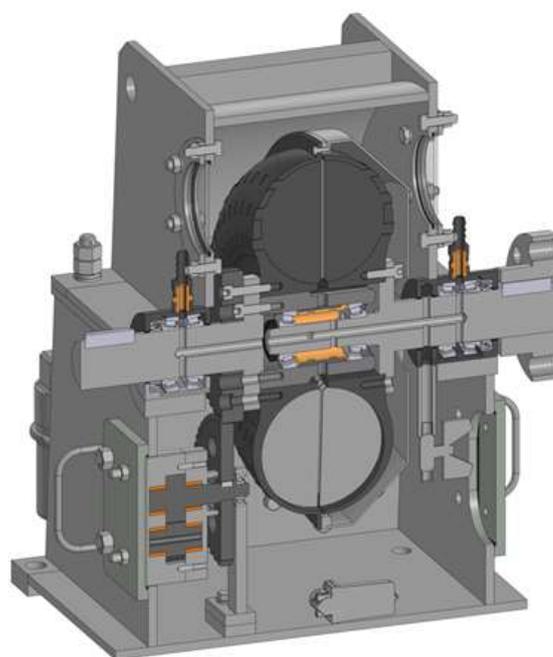


Рис. 6. 3-D модель гидромуфты

На рис. 7 представлен график опорожнения муфты, из которого следует, что при прекращении поступления масла, гидромуфта освобождается от рабочей жидкости в течение 300 секунд.

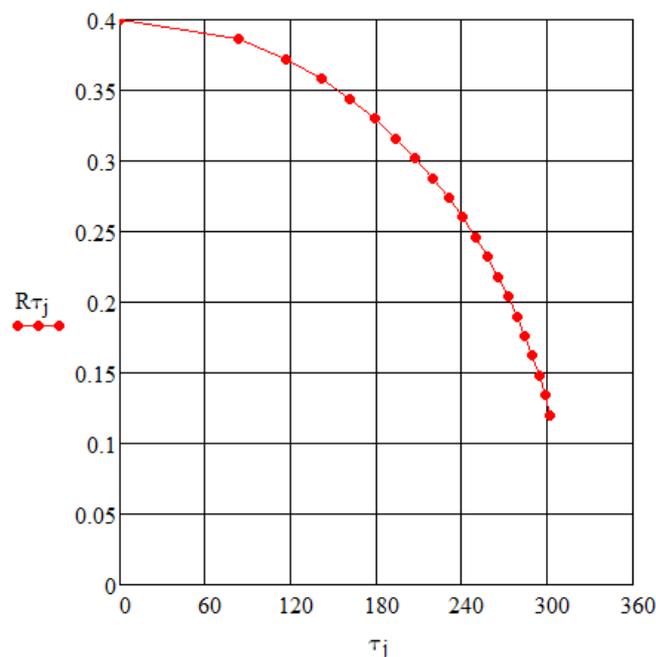


Рис 7. Зависимость уровня в гидромуфте от времени истечения масла

Варьированием количества жиклеров и их диаметров можно установить желаемую временную характеристику.

Коэффициент истечения масла из жиклёра принят для неподвижного барабана. На самом деле в процессе истечения жиклёр и струя масла вращается, что приводит к возникновению силы Кориолиса. Для учета этого эффекта была задействована модель муфты в системе 3-х мерного моделирования потока по методике [4].

Цифровая модель гидравлической муфты построена в САЕ-системе Comsol Multiphysics. Геометрия модели показана на рис. 8 и в упрощенном виде представляет собой цилиндрическую оболочку на коротком валу. Рабочая жидкость поступает в полый вал с обоих торцов и далее через 2 отверстия в вале поступает в полость вращающегося цилиндра, где под действием центробежных сил прижимается радиально к обечайке и выливается под давлением через жиклёрные сливные отверстия. Высота уровня рабочей жидкости в цилиндре, следовательно, и передаваемый крутящий момент, регулируется расходом рабочей жидкости на входе в цилиндр.

Исходные данные к расчету:

- наружный диаметр цилиндра 800 мм;
- наружный диаметр вала 240 мм;
- внутренний диаметр вала 220 мм;
- ширина обечайки 222 мм;
- отверстия для подвода масла \varnothing 22 мм, 2 шт;
- отверстия для отвода масла \varnothing 1 мм, 6 шт;
- частота вращения вала 3000 об/мин;
- рабочая жидкость – трансмиссионное масло.

Свойства рабочей жидкости при 20°C:

- динамическая вязкость $\mu = 0,8$ Па·с;
- плотность $\rho = 899,5$ кг/м³.

Начальное давление рабочей жидкости на входе и выходе устройства равно атмосферному и гидродинамический режим рассчитывался при полностью заполненном цилиндре (максимальный передаваемый крутящий момент) и частоте вращения 3000 об/мин.

При расчете использовалась RANS модель турбулентности $k - \varepsilon$. Реализован стационарный режим с решателем «замороженный ротор» – Frozen Rotor. Рассчитывались поля скоростей, давлений и др. во вращающемся домене, включая центробежные силы и силы Кориолиса.



Рис. 8. Геометрия модели.

В модели высокое соотношение между диаметром цилиндра (800 мм) и диаметром жиклёров выходных отверстий (1мм), поэтому расчетная сетка построена со значительным сгущением в области жиклеров, рис. 9, 10.

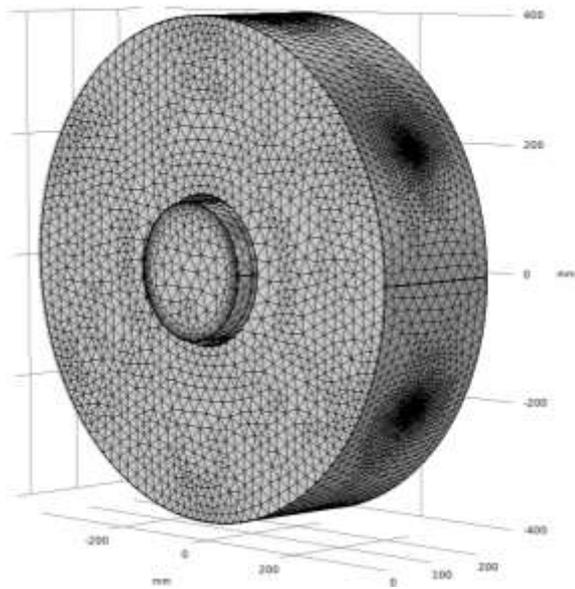


Рис. 9. Расчетная сетка цилиндра со сгущением к выходным отверстиям

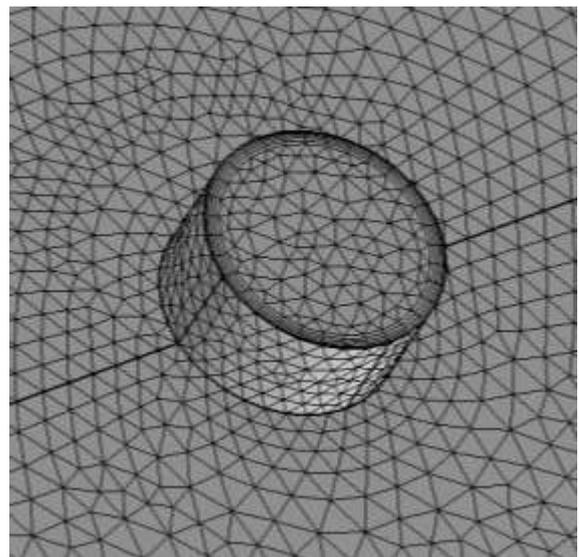


Рис. 10. Расчетная сетка у выходного жиклера

В результате действия центробежных сил на входе в гидромуфту возникает давление 0,108 бар. Максимальное давление на обечайке барабана 55,3 бар, что согласуется с давлением, рассчитанным по формуле (5).

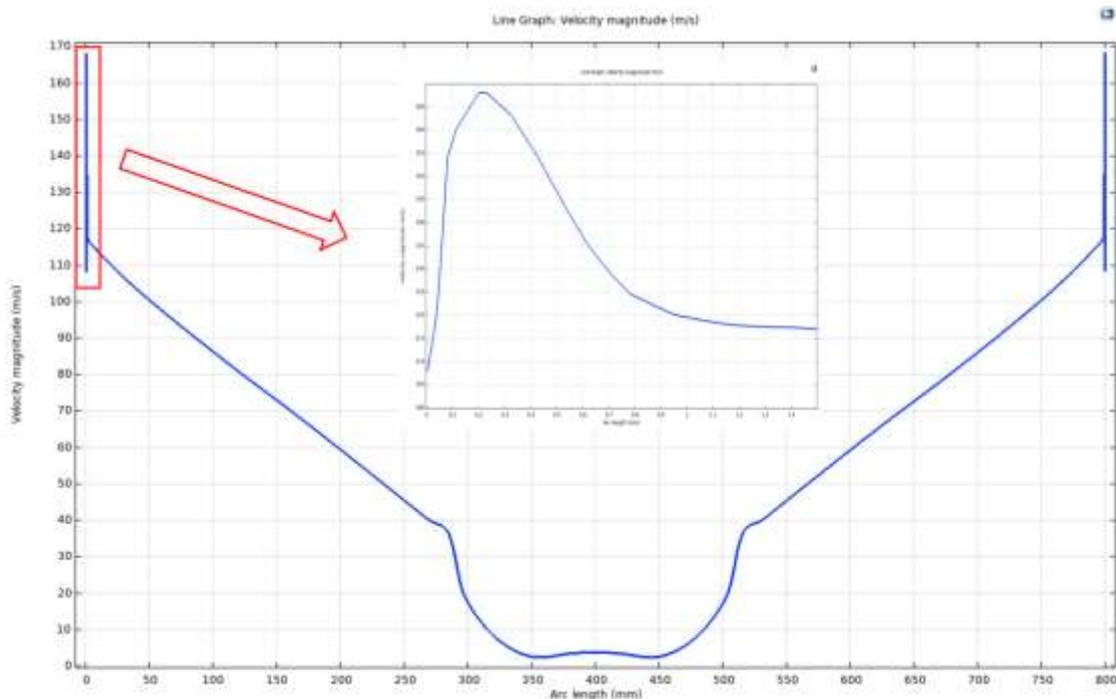


Рис. 11. Скорость рабочей жидкости вдоль секущей линии, проходящей через отверстие жиклёра по диаметру барабана, м/с.

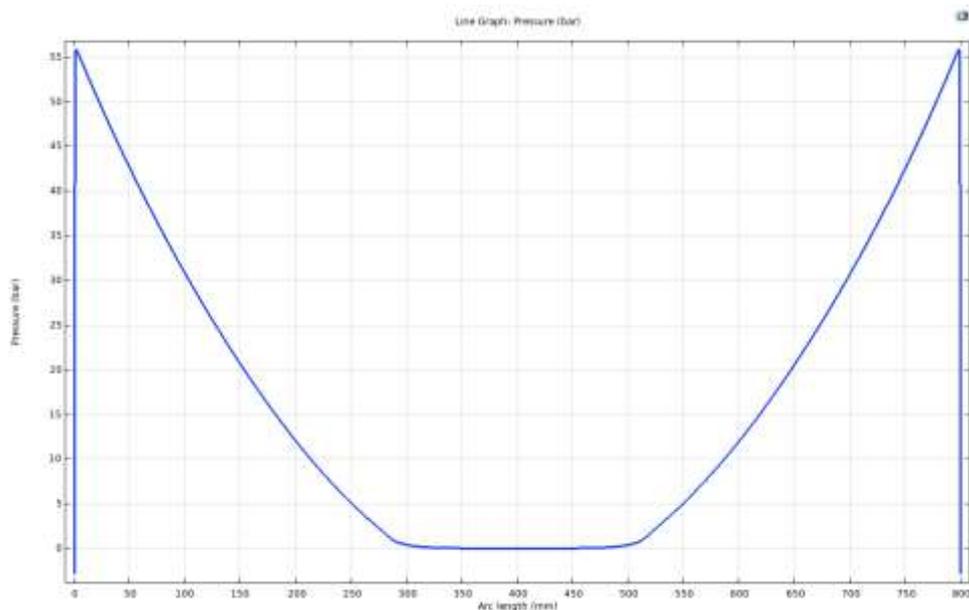


Рис. 12. Давление рабочей жидкости вдоль секущей линии, проходящей через отверстие жиклёра по диаметру барабана, бар

Расход масла через муфту при полученных эпюрах скорости и давления составил $311,1 \text{ см}^3/\text{с}$. Этот расход соответствует расходу, полученному по формуле (6)

Таким образом, истечение масла через вращающийся жиклёр несущественно деформировано наличием сил Кориолиса. Аналогичный вывод получен в [3] при моделировании течения в сопловом аппарате центробежной центрифуги.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Привод мощных вспомогательных механизмов теплосилового оборудования от асинхронного электромотора целесообразно осуществлять через гидромufту с регулированием её наполнения. Уровень рабочей жидкости в полости гидромufты может регулироваться за счет переменного

налива от насоса и постоянного слива через калиброванные жиклеры. Плавность регулирования гидромуфты может быть изменена за счет диаметра отверстия жиклёров и их количества. Ускорение Кориолиса, действующее на вращающуюся струю из жиклёров, оказывает несущественное влияние на коэффициент истечения, что позволяет рассчитывать расход по традиционным уравнениям гидравлики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексапольский Д.Я. Гидродинамические передачи. Машгиз, 1963.– 271с.
2. Семичастнов И.Ф. Гидравлические передачи тепловозов. Машгиз, 1961.– 331с.
3. Вышинский В.В., Миллер А.Б. Моделирование динамики масла и воздушных пузырьков в роторе центробежного фильтра-водоотделителя // Научный вестник МГТУ ГА. 2009. №138. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-dinamiki-masla-i-vozdushnyh-puzyrkov-v-rotore-tsentrobezhnogo-filtra-vodootdelatelya> (дата обращения: 15.07.2023).
4. Вышинский В.В., Судаков Г.Г. Применение численных методов в задачах аэродинамического проектирования. – М.: Издательство ЦАГИ, 2007.

METHOD FOR CALCULATION AND REGULATION OF HYDROMUTIC COUPLING TO DRIVE POWERFUL AUXILIARY MECHANISMS.

¹Kunkevich Sergey Vladimirovich, Cand. Technical Sciences,
Professor of the Department of Power Engineering;

²Tolmachev Aleksandr Viktorovich, Cand. Technical Sciences,
Associate Professor of the Department of Power Engineering

^{1,2}Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,
e-mail: skunkevich@mail.ru; avtol03071952@mail.ru

The electric drive of powerful mechanisms has a significant drawback associated with the start-up. The most common drive from a reliable asynchronous three-phase electric motor has a significant increase in the starting torque and the associated overshoot of the starting current, which obliges you to have a 2x-3x power supply in this case. There are a number of engineering solutions that reduce the consumption of inrush current, but their use causes electrical losses, which reduces the efficiency of their use. The problem can be solved by installing hydraulic clutches with an adjustable degree of transmitted torque between the engine and the drive mechanism. In this paper, an algorithm for designing a fluid coupling based on a criterion equation is given; the regulation of the oil level in the coupling is considered due to the balance of emptying (constant outflow of oil through the throttle jets) and filling (from the gear pump). The flow of oil through the jets is also considered with additional consideration of the Coriolis forces. This problem is solved by modeling the flow by the finite element method.

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ МУЛЬТИПЛИКАТОРА КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ СЕРВИСНЫХ ОПЕРАЦИЙ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ LM6000

¹Несмачных Никита Андреевич, студент;

²Ковалев Дмитрий Александрович, студент;

³Юрков Сергей Валерьевич, доцент кафедры энергетики КГТУ

^{1,2,3}Калининградский государственный технический университет,

Калининград, Россия, e-mail: ¹n.nesmachnykh@mail.ru; ²dmitriy83reg@mail.ru;

³sergej.yurkov@klgtu.ru

Рассматривается актуальная проблема проведения инспекций газотурбинных установок (ГТУ) зарубежного производства. Поставлена практическая задача проектирования мультипликатора крутящего момента, необходимого для проведения операций демонтажа ГТУ LM6000. Представлен результат расчетов цилиндрического и планетарного мультипликаторов, а также их эскизного проектирования, конструирования и сборки на заводе-изготовителе. Получен практический результат в виде успешной работы планетарного мультипликатора, позволяющий продолжить демонтаж ГТУ в соответствии с планом работ.

Введение

В современном мире газотурбинные двигатели играют важную роль в различных отраслях промышленности, особенно в авиации и энергетике. Однако, как и любая техника, они требуют регулярного обслуживания и ремонта для поддержания своей эффективности и надежности.

Расширение санкций США, вступивших в силу 18 июня 2023 года и запрещающих американским компаниям оказывать инжиниринговые услуги в России, приведет к прекращению ремонта и обслуживания газовых и паровых турбин на российских тепловых электростанциях производства американской GE и другого промышленного оборудования.

Большинство ГТУ, эксплуатируемых в Российской Федерации, в той или иной степени не имеют достаточной технологической документации и специальной оснастки, необходимой для выполнения всего типового объема работ по обследованию ГТУ без обращения к заводам-изготовителям.

Это означает, что для инспекций ГТУ иностранного производства необходимо разработать инструментарий, включающий в себя базу технологической документации для выполнения ремонтно-восстановительных работ, а также сопутствующее оборудование, без которого выполнение этих мероприятий невозможно.

Целью данного исследования является проектное обоснование, рабочее проектирование, изготовление и апробация мультипликатора крутящего момента, необходимого для выполнения демонтажа газовой турбины LM6000 силами производственно-технического отдела ООО «БЭМ».

Цели и задачи

LM6000 - это двухвальная газовая турбина производства компании GE (рис. 1). В процессе демонтажа многовальных ГТУ возникает задача отделить модуль силовой турбины от модуля газогенератора. Валы этих модулей удерживаются между собой в жестком зацеплении переходной гайкой (рис. 2), усилие затяжки которой может достигать значения 16000 Н·м.



Рис. 1. Двухвальная газовая турбина LM6000



Рис. 2. Переходная гайка в зацеплении

Операция по их демонтажу невозможна без применения специально разработанных устройств усиления крутящего момента - мультипликаторов. Отличительными особенностями мультипликаторов крутящего момента, применяемых для демонтажа ГТУ, являются: высокое передаточное число; минимальная частота вращения ведомого вала, в сочетании с передачей высокого крутящего момента; исполнение ведомого вала в виде шлицевой втулки для присоединения специальных штанг, передающих крутящий момент; малые габаритные размеры; использование пневматического инструмента в качестве привода мультипликатора.

Исходя из требований к конструкции мультипликатора, серийно выпускаемые усилители крутящего момента не могут быть использованы для выполнения операций демонтажа ГТУ. Изготовление на заказ затруднено нестандартной задачей на проектирование, а также отсутствием в свободном доступе технологической документации GE. Следовательно, возникает необходимость самостоятельной разработки и изготовления мультипликатора крутящего момента, для выполнения сервисных работ. Производство организовано на базе Калининградского турбомеханического завода (ООО «КТМЗ»).

1. Проектирование двухступенчатого мультипликатора

1.1 Кинематический расчет

Первый этап исследования требует тщательного анализа и расчета конструкции мультипликатора, чтобы гарантировать его соответствие заявленным требованиям. Расчет мультипликатора проводится с использованием методики расчета силовых зубчатых передач [1], соблюдением существующих норм и стандартов [2, 3] и включает в себя:

1. Кинематический расчет;
2. Расчет цилиндрической передачи;
3. Проектный расчет;
4. Эскизное проектирование;
5. Конструирование;
6. Проверка на прочность;
7. Выбор смазочных материалов и системы смазывания.

Исходными данными для начала расчета являлись:

1. Тип мультипликатора: двухступенчатый цилиндрический;
2. Кинематическая схема: рис. 3;
3. Частота вращения привода: $n_1=727$ об/мин;
4. Частота вращения выходного вала: $n_2=4$ об/мин;
5. Номинальный крутящий момент на выходном валу: $T_n=16000$ Н·м;
6. Материал, термообработка валов-шестерен и зубчатых колес: Сталь 20Х, улучшение, закалка ТВЧ.

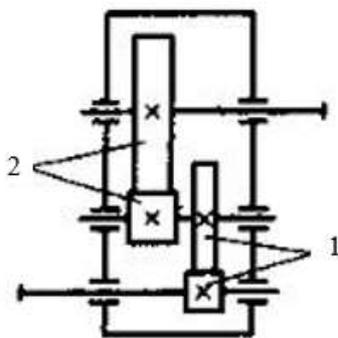


Рис. 3. Кинематическая схема двухступенчатого мультипликатора
1 – первая ступень; 2 – вторая ступень

Результаты кинематического расчета мультипликатора приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты кинематического расчета мультипликатора

№ п/п	Наименование величины	Обозначение	Единица измерения	Значение
1.	Передаточное число	U	-	181,75
2.	Частота вращения входного вала	n_1	Об/мин	290,7
3.	Частота вращения промежуточного вала	n_2	Об/мин	30
4.	Частота вращения выходного вала	n_3	Об/мин	4
5.	Вращающий момент на входном валу	T_1	Н·м	98,5
6.	Вращающий момент на промежуточном валу	T_2	Н·м	1456,99
7.	Вращающий момент на выходном валу	T_3	Н·м	16761,49

1.2 Проектный расчет

В зависимости от вида изделия, условий его эксплуатации и требований к габаритным размерам выбирают необходимую твердость колес и материалы для их изготовления. Для силовых передач чаще всего применяют стали. Передачи со стальными зубчатыми колесами имеют минимальную массу и габариты, тем меньше, чем выше твердость рабочих поверхностей зубьев, которая в свою очередь зависит от марки стали и варианта термической обработки [1, с. 11].

Марка стали и термическая обработка одинаковы для колес и валов: Сталь 20Х, улучшение, закалка ТВЧ.

В процессе проектного расчета, определяются межосевые расстояния, предварительные размеры колес и шестерен, результаты проектного расчета сведены в таблицу 2.

Таблица 2

Результаты проектного расчета мультипликатора

№ п/п	Наименование величины	Обозначение	Единица измерения	Значение
1.	Межосевое расстояние 1ступени	a_{w1}	мм	112
2.	Межосевое расстояние 2ступени	a_{w2}	мм	169,5
3.	Модуль зацепления зубчатой передачи 1ступени	m	-	2
4.	Модуль зацепления зубчатой передачи 2ступени	m	-	1,5
5.	Делительный диаметр вала-шестерни первой ступени	d_1	мм	70
6.	Делительный диаметр колеса первой ступени	d_2	мм	154
7.	Делительный диаметр вала-шестерни промежуточной ступени	d_3	мм	51
8.	Делительный диаметр колеса второй ступени	d_4	мм	288
9.	Количество зубьев вала-шестерни первой ступени	n_1	-	35
10.	Количество зубьев колеса первой ступени	n_2	-	77
11.	Количество зубьев вала-шестерни промежуточной ступени	n_3	-	34
12.	Количество зубьев колеса второй ступени	n_4	-	192
13.	Минимальное допускаемое контактное напряжение для валов	$[\sigma]_{H1}$	МПа	1300,38
14.	Минимальное допускаемое контактное напряжение для зубчатых колес	$[\sigma]_{H2}$	МПа	2049,33
15.	Минимальное допускаемое напряжение на изгиб для валов	$[\sigma]_{F1}$	МПа	292,67
16.	Минимальное допускаемое напряжение на изгиб для зубчатых колес	$[\sigma]_{F2}$	МПа	396,35
17.	Твердость поверхности валов	-	HRC	45÷48
18.	Твердость поверхности зубчатых колес	-	HRC	56÷63

1.3 Эскизное проектирование

По результатам проектного расчета разрабатывается конструкция мультипликатора. Начальным этапом конструирования является разработка эскизного проекта, в котором определяется расположение деталей передачи, расстояния между ними, выбираются типы подшипников и схемы их установки [1, с. 42]. Чертеж зубчатой передачи двухступенчатого мультипликатора с утвержденным расположением деталей представлен на рисунке 4.

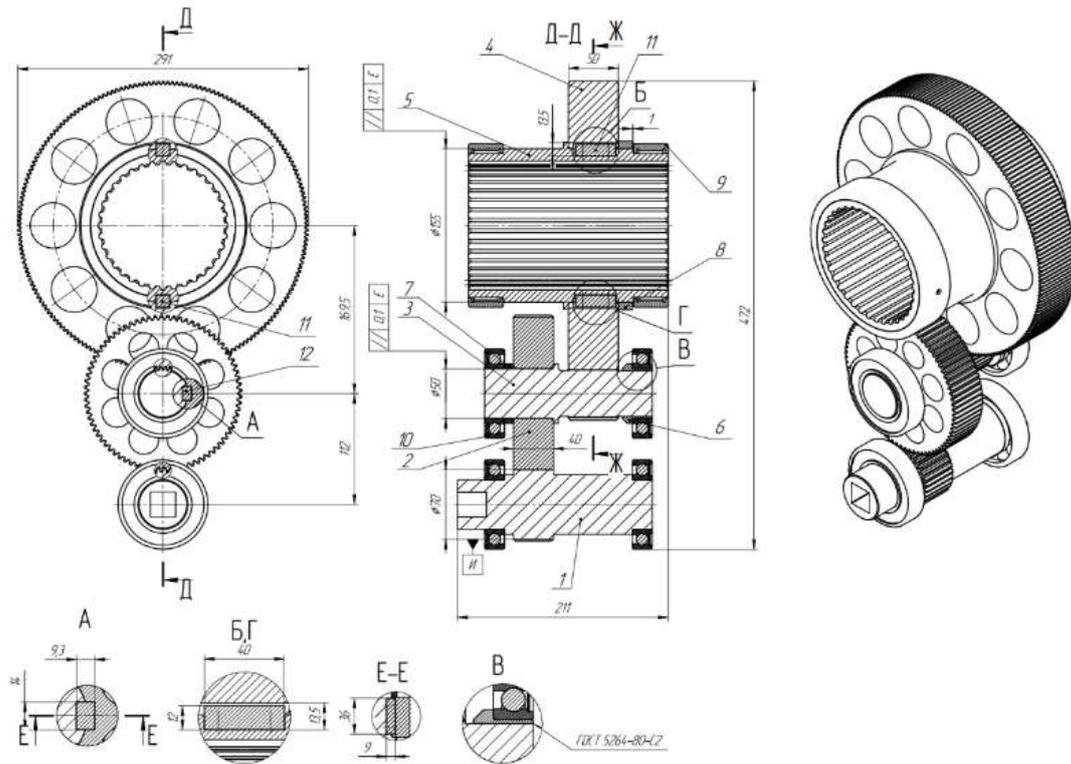


Рис. 4. Чертеж зубчатой передачи

1 – вал-шестерня первой ступени; 2 – колесо первой ступени; 3 – вал-шестерня промежуточной ступени;
4 – колесо второй ступени; 5 – втулка шлицевая

Корпус мультипликатора имеет продольный разъем, что обеспечивает более легкую установку валов и зубчатых колес с последующим креплением крышек корпуса винтами (рис. 5). Для смазки подшипниковых узлов используется консистентная смазка

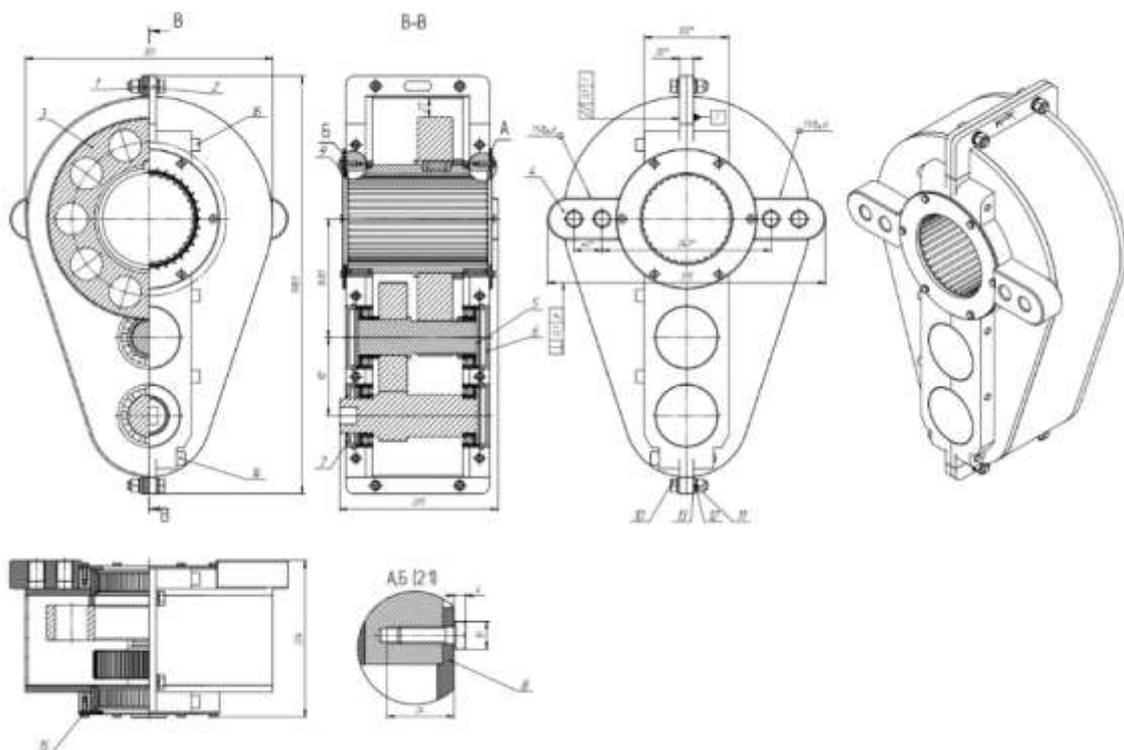


Рис. 5. Сборочный чертеж двухступенчатого мультипликатора

1 – корпус крышка; 2 – корпус ложе; 3 – зубчатая передача; 4 – прилив присоединительный;
5 – уплотнительное кольцо; 6 – крышка закладная; 7 – крышка закладная проходная; 8 – диск упорный;
9 – диск измерительный

Ведомый вал мультипликатора выполнен в виде шлицевой втулки, в которую вставляется штанга-ключ для передачи крутящего усилия на переходную гайку. Привод мультипликатора осуществляется с помощью пневматического инструмента МХТ-5, который позволяет передавать на ведущий вал мультипликатора крутящий момент свыше 7000 Н·м. Вариант установки мультипликатора на траверсе показан на рис. 6.

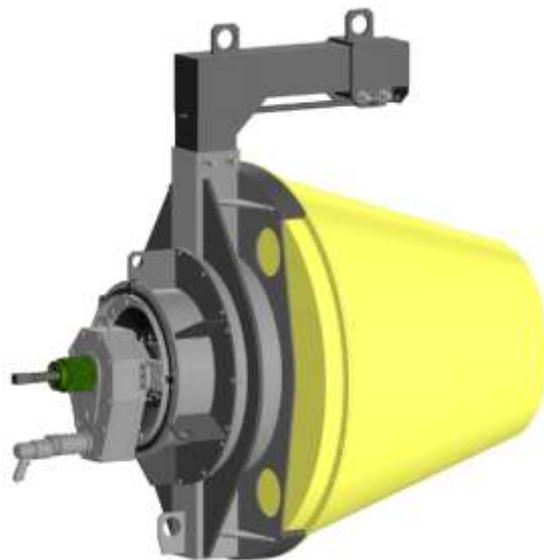


Рис. 6. Пример установки мультипликатора на траверсу

1.4 Конструирование и применение двухступенчатого мультипликатора

Заключительный этап конструирования – изготовление, сборка и эксплуатационные испытания мультипликатора. Все работы сборочной стадии были проведены на производственном предприятии ООО "КТМЗ", после чего мультипликатор был доставлен на ремонтную базу для проведения испытаний непосредственно на траверсе газогенератора LM6000 (рис. 7).



Рис. 7. Мультипликатор установленный на траверсе

Рабочий персонал при достижении номинального крутящего момента $16000 \text{ Н}\cdot\text{м}$ отвинчивания переходной гайки не добился, в связи с чем было принято решение о постепенном увеличении крутящего момента путем повышения давления жидкости в пневмоприводе. При превышении значения крутящего момента на выходном валу $19000 \text{ Н}\cdot\text{м}$ произошел срез трех зубьев в месте наибольшего контактного напряжения вала шестерни промежуточной ступени и зубчатого колеса второй ступени (рис. 8), отвинчивания гайки достигнуто не было.



Рис. 8. Срезанные зубья колеса второй ступени

Последующий анализ материала зубчатых колес показал, что используемая при изготовлении зубчатых колес сталь 20Х, по составу входящих в нее элементов сопоставима со сталью 8, что не соответствует требованию к качеству материала, заложенному на этапе проектирования мультипликатора. Возникла задача по перепроектированию изделия, с использованием в качестве материала сталь 40Х, а также повышения номинального крутящего момента на выходном валу до $20000 \text{ Н}\cdot\text{м}$, из-за возможного окисления промежуточной гайки.

2. Проектирование планетарного мультипликатора

2.1 Проектный расчет

Было принято решение разработать вариант конструкции мультипликатора по схеме планетарного редуктора повышенной прочности, с увеличенным номинальным крутящим моментом на выходном валу. Расчет проводился с использованием методик расчета планетарного редуктора [3, 4].

Исходными данными для начала проектного расчета планетарного мультипликатора являлись:

1. Тип мультипликатора: планетарный, однорядный;
2. Кинематическая схема: рис. 9;
3. Частота вращения выходного вала: $n_2=5 \text{ об/мин}$;
4. Крутящий момент на входном валу: $T_1=5334 \text{ Н}\cdot\text{м}$;
5. Количество зубьев:
 - солнечной шестерни $z_1=32$;
 - сателлитов $z_2=28$;
 - коронной шестерни $z_3=88$;
6. Количество сателлитов: $K=4$;
7. Ширина шестерни $b=80 \text{ мм}$;
8. Материал, термообработка зубчатых колес: Сталь 40Х, улучшение, закалка.

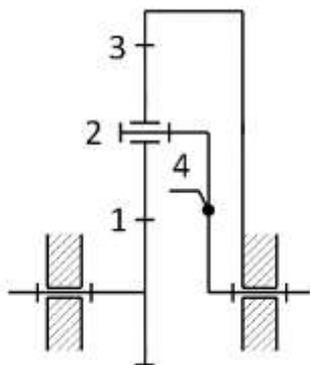


Рис. 9. Кинематическая схема однорядного планетарного мультипликатора
1 – солнечная шестерня; 2 – сателлит; 3 – коронная шестерня; 4 – водило

Результаты расчета планетарного мультипликатора сведены в таблицу 3.

Таблица 3

Результаты расчета планетарного мультипликатора

№ п/п	Наименование величины	Обозначение	Единица измерения	Значение
1.	Передаточное отношение	U	-	3,75
2.	Крутящий момент на выходном валу	T2	Н·м	20002,5
3.	Модуль зацепления	m	-	3,5
4.	Делительный диаметр солнечной шестерни	d ₁	мм	112
5.	Делительный диаметр сателлита	d ₂	мм	98
6.	Делительный диаметр коронной шестерни	d ₃	мм	308
7.	Минимальное допускаемое контактное напряжение зубчатых колес	[σ] _H	МПа	1181,82
8.	Минимальное допускаемое напряжение на изгиб зубчатых колес	[σ] _F	МПа	257,32
9.	Твердость поверхности зубчатых колес	-	HRC	50÷55

2.2 Эскизное проектирование

На этапе эскизного проектирования построена 3D модель планетарного мультипликатора (рис. 10), сборочный чертеж представлен на рис. 11.



Рис. 10. 3D модель планетарного мультипликатора

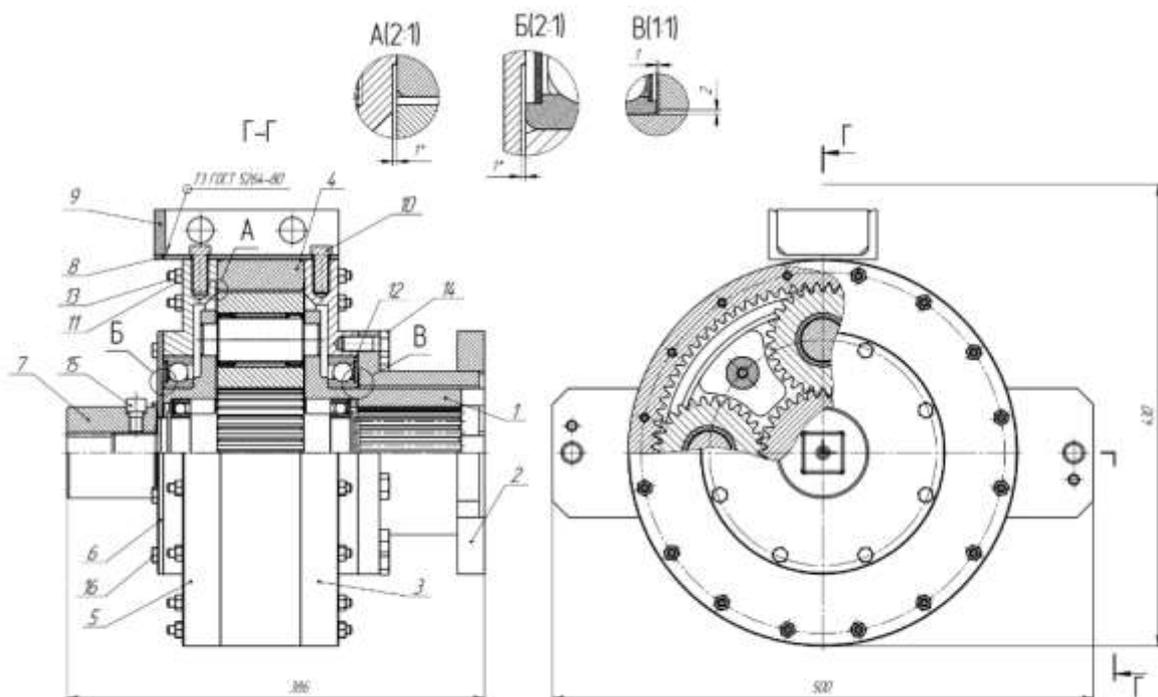


Рис. 11. Сборочный чертеж планетарного мультипликатора
 1 – водило с установленными сателлитами и солнцем; 2 – пластина монтажная;
 3 – корпус крышка выходной; 4 – коронная шестерня; 5 – корпус крышка входной;
 6 – крышка торцевая проходная; 7 – муфта; 8 – упор пневмопривода

2.3 Проверка на прочность

Исходя из конструктивных соображений упрощения процесса сборки, водило планетарной передачи выполнено в виде разборной конструкции. Материал водила сталь 40Х, твердость 45÷50 HRC, допускаемые минимальные напряжения на изгиб $[\sigma]_F=450$ МПа. Проверка на прочность водила проводилась в САЕ-системе Comsol Multiphysics 6.1, ход расчета показан на рис. 12-14.

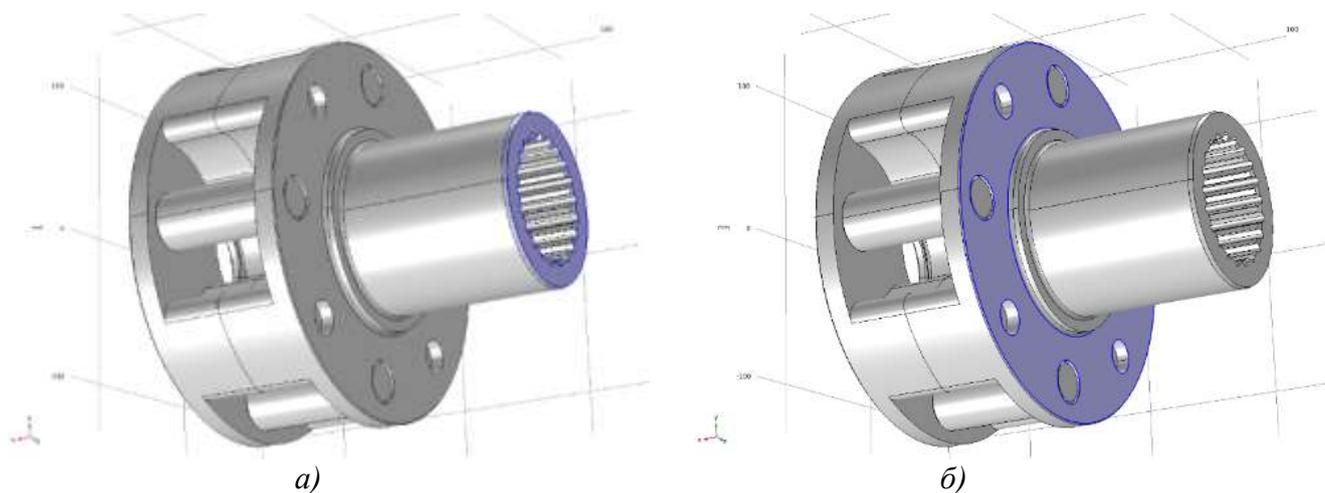


Рис. 12. Подготовка модели к расчету
 а) фиксация поверхности от перемещений, б) приложение к плоскости крутящего момента $T=24000$ Н·м

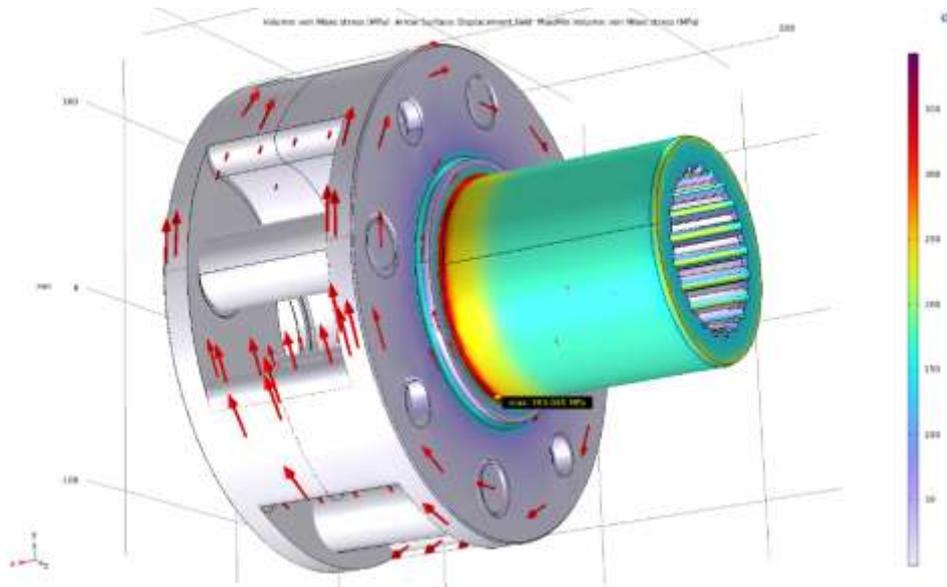


Рис. 13. Визуализация максимальных напряжений водила

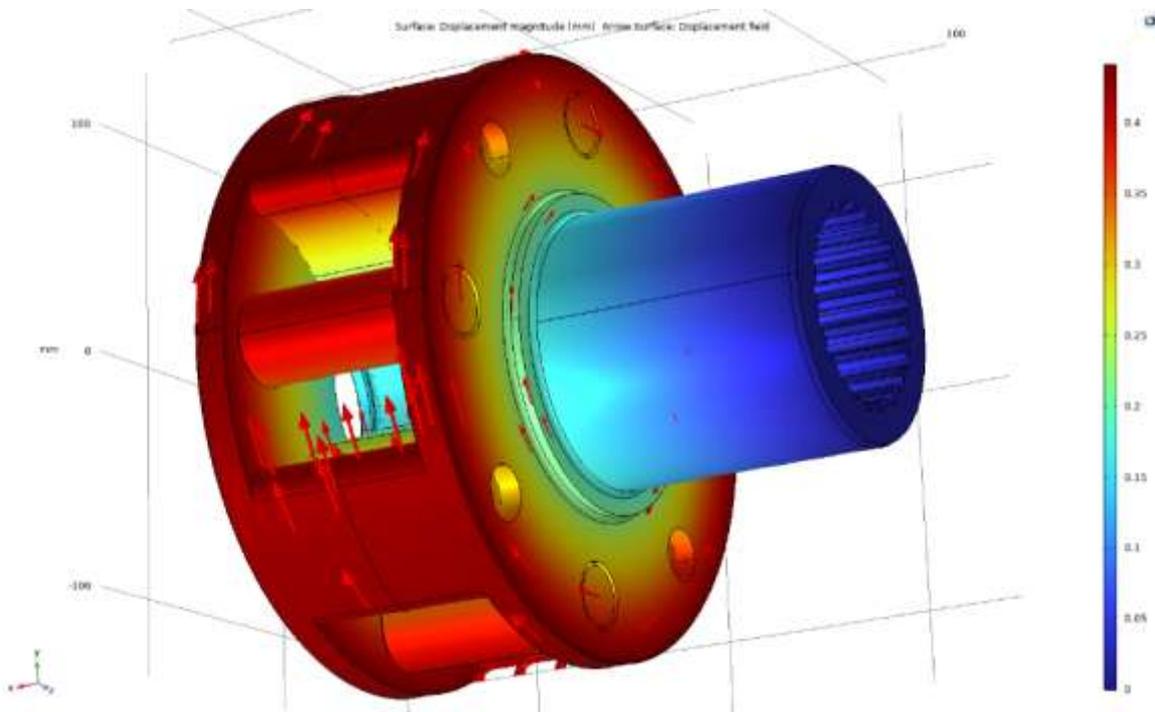


Рис. 14. Визуализация максимальных перемещений водила

По результатам расчета, максимальные перемещения составили менее 0,5 мм, что допустимо для заданных условий работы мультипликатора. Максимальная концентрация напряжений σ_F в водиле меньше минимального допустимого значения $\sigma_F < [\sigma]_F = 393 < 450$ МПа, следовательно, условия прочности водила соблюдены.

2.4 Конструирование и применение планетарного мультипликатора

По результатам проведенных проектных и прочностных расчетов, принято решение о допуске изделия к производству (рис. 15).



Рис. 15. Планетарный мультипликатор в процессе сборки

По окончании сборки, мультипликатор устанавливался на траверсу турбины для непосредственного применения. При достижении крутящего момента на выходном валу 20000 Н·м, переходная гайка была успешно вывинчена из ротора турбины компрессора (рис. 16). Дефекты оборудования при эксплуатации мультипликатора не допущены.



Рис. 16. Отвинченная переходная гайка

Выводы

Проектирование мультипликаторов для ремонта газотурбинных двигателей является важным и актуальным направлением в машиностроении. Они позволяют повысить эффективность ремонтного процесса, сократить время и затраты на его проведение.

В проведенных практических исследованиях накоплен опыт проектирования, изготовления и применения двух типов мультипликаторов, двухступенчатого цилиндрического и планетарного однорядного. По результатам применения мультипликаторов можно сделать вывод о важности прочностных характеристик изделия, контроля качества материалов, соблюдения расчетных нагрузок при практической эксплуатации оборудования для обеспечения его нормальной работы.

Перспективы развития данной области связаны с постоянным совершенствованием конструкции и технологии мультипликаторов, а также с современными реалиями, в которых для ремонта энергетических установок возникает необходимость создания отечественного ремонтного оборудования. Важно продолжать исследования в области материалов, используемых при изготовлении мультипликаторов, а также оптимизировать их конструкцию и размеры для достижения максимальной эффективности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дунаев П.Ф., Леликов О.П., Конструирование узлов и деталей машин: Учеб. пособие для техн. спец. вузов. - 6-е изд., исп. - М.: Высш. шк., 2000. - 447 с., ил.
2. Анурьев В. И. Справочник конструктора – машиностроителя. В 3-х томах. Т.1. - 6е изд., перераб и доп. - М.: Машиностроение, 1982. - 736с.:ил.
3. Кузьмин А.В. и др. - Расчёты деталей машин: Справ. пособие.- 3-е изд. перераб. и доп. Мн.: Выш. шк., 1986.-400 с.: ил.
4. Методические рекомендации по выполнению курсового проекта «Привод к стенду с использованием планетарного редуктора» / М.В. Анохина, С.В. Никитин. – М.: МАДИ, 2017. – 60 с.

DESIGN OF TORQUE MULTIPLIER FOR DISMANTLING THE LM6000 GAS TURBINE UNIT

¹Nesmachnykh Nikita Andreevich, student;

²Kovalev Dmitry Alexandrovich, student;

³Yurkov Sergej Valerievich, Associate Professor of the Department of Power Engineering, KSTU

^{1,2,3}Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,

e-mail: ¹n.nesmachnykh@mail.ru; ²dmitriy83reg@mail.ru; ³sergej.yurkov@klgtu.ru

The urgent problem of inspections of gas turbine units (GTU) of foreign production is considered. The practical problem of designing a torque multiplier necessary for dismantling operations of GTU LM6000 is posed. The result of calculations of cylindrical and planetary multipliers, as well as their preliminary design, construction and assembly at the manufacturing plant is presented. A practical result is obtained in the form of successful operation of planetary multiplier, allowing to continue GTU dismantling in accordance with the work plan.

УДК 621.833

ИСПЫТАНИЕ ТОРЦЕВОГО УПЛОТНЕНИЯ С РЕГУЛИРОВАНИЕМ УСИЛИЯ ПОДЖАТИЯ ПРУЖИНЫ НА СТЕНДЕ СКОУ

¹Филиппова Валерия Михайловна, студентка;

²Беркова Елена Анатольевна, старший преподаватель

^{1,2}Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия,

e-mail: ¹yakubik99@yandex.ru; ²elena.berkova@klgtu.ru

Предлагается новая конструкция торцевых уплотнений, обладающих возможностью регулирования усилия поджатия пружины в процессе их эксплуатации. Приводится описание программы и методики испытаний торцевых уплотнений центробежных насосов. Представлены результаты проведенных испытаний, которые свидетельствуют о работоспособности сконструированного торцевого уплотнения.

Компанией ООО «Калининградский турбо-механический завод» (ООО «КТМЗ») в рамках программы импортозамещения создаются опытные образцы энергетического насосного оборудования, которые после успешных испытаний запускаются в серийное производство. Для центробежных насосов, перекачивающих воду и не взрыво- и пожароопасные жидкости (типа ЦНВ), разработана уникальная конструкция торцевых уплотнений, обладающих возможностью регулирования усилия поджатия пружины в процессе их эксплуатации.

Предлагаемое техническое решение предполагает не только комплексное теоретическое обоснование, но и экспериментальное подтверждение его эффективности [1]. Проведение испытаний необходимо для:

- исследования технических характеристик объектов испытаний и путей достижения значений, гарантирующих их надежную работу;
- предварительной оценки соответствия этих характеристик требованиям технического задания (ТЗ) в условиях максимально приближенных к условиям реальной эксплуатации;
- оценки возможности промышленного производства и реализации продукции.

Объект испытаний

В Испытательной лаборатории комплексных гидродинамических характеристик центробежных насосов на базе предприятия ООО «КТМЗ» проводятся стендовые испытания торцевого уплотнения с регулированием усилия поджатия пружины. Для проведения испытаний спроектирован и изготовлен экспериментальный стенд – унифицированный стенд концевых опор и уплотнений (СКОУ).

Внешний вид испытательного стенда СКОУ приведен на рисунке 1. Габаритные размеры СКОУ – 1993x1060x1315 мм (длина x ширина x высота). Масса СКОУ составляет 480 кг.

На испытательном стенде одновременно испытываются два торцевых уплотнения (два одноступенчатых одинарных или одноступенчатое одинарное и одноступенчатое двойное) и два подшипниковых узла с системой смазки, которые входят в комплект опытных образцов одного типоразмера.

Сконструированное торцевое уплотнение предъявляется на испытания в следующей комплектности (см. рис. 2): пружина торцевого уплотнения 1; невращающаяся втулка торцевого уплотнения с установленным кольцом пары трения 2; вращающаяся втулка торцевого уплотнения с установленным кольцом пары трения 3; втулка регулировочная резьбовая 4; корпус торцевого уплотнения 5; кольца резиновые уплотнительные 6; винт фиксирующий 7.

Сборочный чертеж торцевого уплотнения показан на рисунке 3. Там же приведены его основные габаритные размеры.

При проектировании торцевого уплотнения для суммарного усилия $F_{\text{конт}}$, действующего на контактные уплотнительные поверхности, использовалось следующее выражение [1,2,3]:

$$F_{\text{конт}} = F_{\text{пр}} - F_{\text{нагр}} - F_{\text{д.з}} \pm F_{\text{упл}} \quad (1)$$

где $F_{\text{пр}}$ – усилие пружины, Н; $F_{\text{нагр}}$ – усилие гидравлического нагружения, Н; $F_{\text{д.з}}$ – сила давления в зазоре, Н; $F_{\text{упл}}$ – сила трения радиального уплотнительного элемента, Н.

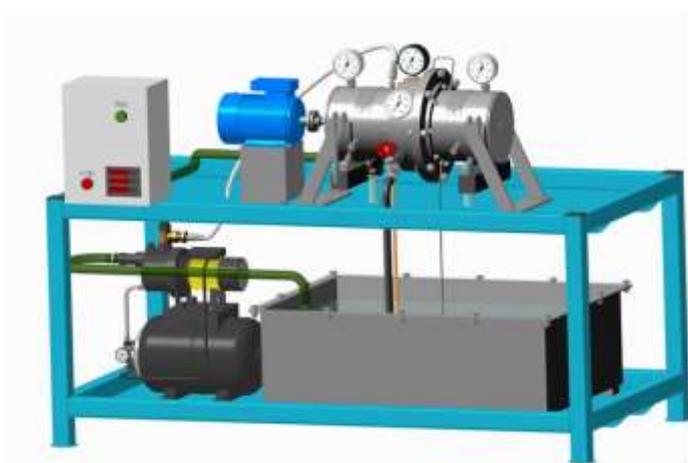


Рис. 1. Внешний вид испытательного стенда СКОУ

Откуда следует, что для нормального функционирования уплотнения необходимо, чтобы сила сжатия пружины 1 была больше суммы сил, стремящихся раскрыть стык уплотнительных ко-

лец, $F_{\text{конт}}$, $F_{\text{нагр}}$ и $F_{\text{д.э}}$. То есть в рассматриваемом уплотнении только сила сжатия пружины влияет на величину утечки рабочей жидкости. И при регулировании поджатия пружины можно добиться минимально возможной утечки с допустимыми потерями мощности на преодоление сил трения в торцевом уплотнении $N_{\text{тр.ту}}$.



Рис. 2. Модель торцевого уплотнения

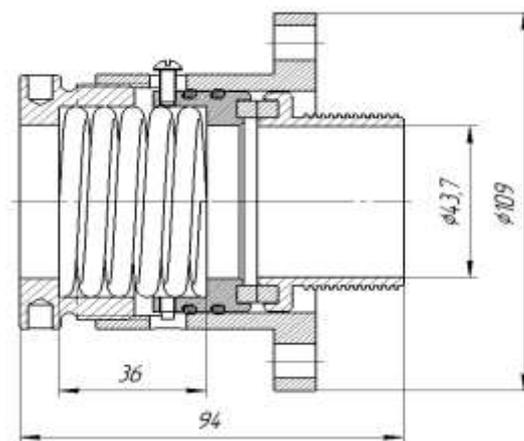


Рис. 3. Сборочный чертеж торцевого уплотнения

На рисунке 4 можно увидеть основные детали изготовленного торцевого уплотнения до сборки.



Рис. 4. Изготовленные детали торцевого уплотнения

Программа и методика испытаний

Для испытания комплекта опытных образцов с учетом требований [4] разработана «Программа и методика испытаний концевых опор и уплотнений насосов», включающая:

- определение потери мощности на трение подшипниковых узлов и торцевых уплотнений;
- оценку работоспособности системы смазки подшипниковых узлов;
- определение температурного режима подшипниковых узлов;
- оценку износа колец пары трения торцевых уплотнений;
- определение утечки испытательной жидкости через торцевое уплотнение в зависимости от давления в контакте.

В соответствии с методикой испытания начинаются с проверки комплектности объекта испытаний и сопроводительной документации. Далее для торцевых уплотнений проводится визуальный осмотр поверхностей колец пары трения, измерение их толщины, а также взвешивание вращающейся и невращающейся втулок с установленными кольцами пары трения, которые являются начальным этапом для испытаний по оценке износа контактных уплотнительных поверхностей.

Полученные результаты заносятся в Протокол оценки износа колец пары трения торцевых уплотнений. Последующие осмотры, измерения и взвешивания должны проводиться после каждого этапа испытаний торцевых уплотнений продолжительностью не менее 10 часов работы. Испытания считаются удовлетворительными, если суммарный износ уплотняющих поверхностей не превышает 1% по массе за 1000 часов работы [4].

Перед проведением стендовых испытаний комплекта изделий также необходимо выполнить калибровку пружин торцевых уплотнений. В результате которой определяются осевая деформация пружины (мм) и нагрузка сжатия (Н) в зависимости от углового перемещения нажимной гайки 4 (рис. 2).

После вышеперечисленного начинаются испытания комплекта опытных образцов по определению потерь мощности на трение, которые включают определение мощности трения подшипниковых узлов и определение мощности трения торцевых уплотнений. Они заключаются в последовательном размещении на валу испытательного стенда вращающихся элементов и элементов трения.

Измерение мощности трения отдельных элементов проводится в следующей последовательности:

- измерение мощности, потребляемой электродвигателем на холостом ходу $N_{эл 0}$, Вт;

- измерение мощности электродвигателя с вращающимся валом в подшипниках $N_{эл 1}$, Вт.

Для этого на валу испытательного стенда устанавливаются только подшипниковые узлы;

- измерение мощности электродвигателя с вращающимся валом после размещения полного комплекта опытных образцов и заполнения испытательной жидкостью $N_{эл 2}$, Вт.

Потребляемая двигателем мощность измеряется мультиметром. Измерения проводятся при установлении стационарного температурного режима. Для каждого этапа выполняется не менее трех замеров. Все измеренные значения заносятся в Протокол испытаний по определению потери мощности на трение.

Мощность трения подшипниковых узлов определяется расчетным путем по формуле (2), мощность трения торцевых уплотнений – по формуле (3).

$$N_{подш.} = N_{эл 1} - N_{эл 0}, \text{ Вт} \quad (2)$$

$$N_{тр.ту} = N_{эл 2} - N_{подш.} - N_{эл 0}, \text{ Вт} \quad (3)$$

Определение утечки испытательной жидкости через торцевое уплотнение в зависимости от давления в контакте может выполняться параллельно с определением мощности трения торцевых уплотнений и включает два этапа:

- испытание при различных давлениях испытательной жидкости и постоянной величине сжатия регулировочной пружины;

- испытание при рабочем давлении испытательной жидкости и переменной величине сжатия регулировочной пружины.

Первый этап испытаний проводится при различных давлениях испытательной жидкости. Величина сжатия регулировочной пружины не изменяется. Давление испытательной жидкости повышается ступенчато от атмосферного до максимального для испытываемого комплекта торцевых уплотнений значения. Второй этап испытаний проводится при рабочем давлении испытательной жидкости. Величина сжатия регулировочной пружины изменяется от минимально возможной величины до значения, обеспечивающего допустимую утечку. Для рассматриваемого торцевого уплотнения максимальное избыточное давление составляет 0,25 МПа, рабочее давление – 0,18 МПа.

Утечка через торцевые уплотнения определяется объемным способом на не менее 6 шагах повышения давления или повышения величины сжатия регулировочной пружины с выдержкой на каждом шаге не менее 10 минут до установления равновесия. На каждом шаге фиксируются: избы-

точное давление испытательной жидкости p , МПа или величина сжатия регулировочных пружин, Н; температура жидкости t , °С; потребляемая двигателем мощность $N_{эл 2}$, Вт; время наполнения мерной емкости №1 t_1 , с и мерной емкости №2 t_2 , с; объем испытательной жидкости в каждой из емкостей V_1 и V_2 , см³. Измеренные значения вносятся в Протокол результатов испытаний по определению утечки через торцевое уплотнение.

По результатам испытаний рассчитываются утечки испытательной жидкости через каждое уплотнение и потери мощности на трение, строятся зависимости утечки и потери мощности на трение от давления испытательной жидкости и от величины сжатия регулировочных пружин, а также изменение температуры испытательной жидкости во времени.

Результаты испытаний

На рисунке 5 показан процесс взвешивания колец пары трения перед их установкой во вращающуюся и невращающуюся втулки. На рисунке 6 – измерение шероховатости с помощью контактного профилометра TR220 и плоскостности контактных уплотнительных поверхностей с помощью щупов.

Результаты испытаний пружины на сжатие представлены в таблице 1. Угловое перемещение ограничено семью полными оборотами резьбовой регулировочной втулки. Это связано с конструктивными особенностями объекта испытаний. Один полный оборот соответствует шагу резьбы 2мм осевой деформации пружины.



Рис. 5. Процесс взвешивания колец пары трения



Рис. 6. Процесс измерения шероховатости и плоскостности контактных поверхностей

Потери мощности на трение

Номер замера	Мощность на холостом ходу $N_{эл 0}$, Вт	Мощность с вращ. валом в подшипниках $N_{эл 1}$, Вт	Мощность с полным комплектом об-разцов $N_{эл 2}$, Вт	Мощность трения подшипниковых узлов $N_{подш.}$, Вт	Мощность трения торцевых уплотнений $N_{тр.гу}$, Вт
				-	-
				-	-
				-	-
Среднее					

Выводы

В настоящее время проведена лишь часть из намеченного объема испытаний торцевого уплотнения с регулированием усилия поджатия пружины. В первую очередь подтвердилась работоспособность сконструированного торцевого уплотнения – при рабочем давлении жидкости ее утечка не превышает расчетное значение.

Испытания с целью определения износа колец пары трения продолжаются до наработки 1000 часов. Также будет проверена надежность работы торцевого уплотнения. На текущий момент отказов торцевых уплотнений не зафиксировано.

Кроме того, будет исследоваться влияние материала контактных пар на эффективность работы предлагаемого торцевого уплотнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Майер Э. Торцевые уплотнения: Пер. с нем. – Москва: Машиностроение, 1978. – 288 с.
2. Голубев А. И. Торцевые уплотнения вращающихся валов. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1974. – 212с.
3. Мельник В. А. Торцевые уплотнения валов: справочник. – Москва: Машиностроение, 2008. – 320 с.
4. ГОСТ 32600-21013 Насосы. Уплотнительные системы вала для центробежных и роторных насосов. – Москва: Стандартинформ, 2015.

TESTING THE MECHANICAL SEAL WITH REGULATION OF THE FORCE OF THE SPRING ON THE BESS BENCH

¹Filippova Valeria M., student;

²Berkova Elena A., Senior Lecturer

^{1,2}Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia, e-mail: ¹yakubik99@yandex.ru;

²elena.berkova@klgtu.ru

A new design of mechanical seals is proposed, which have the ability to control the force of the spring during their operation. The description of the program and methods of testing mechanical seals of centrifugal pumps is given. The results of the tests carried out are presented, which indicate the operability of the designed mechanical seal.

СТЕНДТ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ КОНЦЕВЫХ ОПОР И ТОРЦЕВЫХ УПЛОТНЕНИЙ НАСОСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ (СКОУ)

¹Филиппова Валерия Михайловна, студентка;

²Юрков Сергей Валерьевич, доцент кафедры энергетики

^{1,2}Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия,
e-mail: ¹yakubik99@yandex.ru; ²sergej.yurkov@klgtu.ru

Рассматривается решение задачи по разработке экспериментального стенда для динамических и гидравлических испытаний концевых опор и уплотнений насосного оборудования. Формулируются цели и спектр задач экспериментальных исследований с использованием разрабатываемого стенда. Приводится описание конструкции стенда, технологии его изготовления, данные об эксплуатационно-технических и массогабаритных характеристиках.

Введение

Одними из наиболее важных и ответственных элементов насосного оборудования является уплотнение и подшипниковый узел. От надежности их работы зависит надежность работы насоса в целом.

Из большого числа типов контактных уплотнений, используемых в элементах энергетических машин и аппаратов, наиболее перспективным на сегодняшний день является тип уплотнения, в котором контактная пара представляет собой вращающийся и неподвижный элемент, взаимодействующий между собой в направлении оси вращения – торцевое уплотнение. Существует множество конструкций торцевых уплотнений, различающихся по нагрузке (разгруженное и нагруженное), по конструкции (одинарное, двойное) и т.д. [1,2], каждой из которых присущи свои преимущества и недостатки. Общим характерным эксплуатационным преимуществом для всех типов торцевых уплотнений является высокая эффективность, долговечность и малые массогабаритные характеристики.

ООО «Калининградский турбо-механический завод» (ООО «КТМЗ») в рамках реализации программы по импортозамещению энергетического насосного оборудования разрабатывает конструкции уплотнений торцевого типа, обладающих возможностью регулирования усилия поджатия пружины в процессе их эксплуатации, что является уникальным решением в данной области. Как любое новое техническое решение оно требует комплексного теоретического обоснования и экспериментального подтверждения эффективности предлагаемого технического решения.

Надежность работы торцевого уплотнения зависит во многом от конструкции, состояния и режимов работы подшипниковых опор вала или ротора машины и механизмов. В связи с этим возникает напрямую взаимосвязанная с уплотнительными узлами задача исследования динамического состояния концевых опор, как в части их конструкции, так и технологии изготовления, монтажа и контроля за техническим состоянием в процессе работы.

Решение комплекса возникающих задач невозможно без проведения экспериментальных стендовых исследований. Отсюда вытекает задача по разработке концепции экспериментального исследования, конструкции экспериментального стенда, технологии его изготовления и ввода в эксплуатацию.

Цели и задачи

Целями создания унифицированного стенда концевых опор и уплотнений (СКОУ) и проведения испытаний являются:

- исследование технических характеристик объектов испытаний и путей достижения значений, гарантирующих их надежную работу;

- предварительная оценка соответствия объектов испытаний требованиям технического задания (ТЗ), а также определение готовности объектов испытаний к заводским приемочным (опытно-промышленным) испытаниям;
 - подтверждение соответствия характеристик объектов всем требованиям, заданным ТЗ, в условиях максимально приближенных к условиям реальной эксплуатации;
 - оценка возможности промышленного производства и реализации продукции.
- Задачами создания СКОУ являются: разработка проектно-конструкторской документации, изготовление деталей и узлов на производстве, сборка, ввод в эксплуатацию и проведение испытаний.

Проектирование стенда концевых опор и уплотнений – СКОУ

Стенд концевых опор и уплотнений является унифицированным и предполагает возможность проведения испытаний для разных типоразмеров комплекта опытных образцов. При проектировании СКОУ в качестве комплекта опытных образцов рассматриваются торцевые уплотнения и подшипниковые узлы насосов ООО «КТМЗ»:

- ЦНВ 65-40-7 (центробежный водяной насос: 65 – подача, м³/ч; 40 – давление на нагнетании, бар; 7 – количество ступеней),
- ЦНТ 65-80-10 (центробежный топливный насос: 65 – подача, м³/ч; 80 – давление на нагнетании, бар; 10 – количество ступеней),
- ЦПН 240-130-10 (центробежный питательный насос: 240 – подача, м³/ч; 130 – давление на нагнетании, бар; 10 – количество ступеней).

Основные параметры торцевых уплотнений приведены в таблице 1.

Таблица 1

Основные параметры торцевых уплотнений

Наименование показателя	Величина для типоразмера		
	A-NB04ISO-BBSTE	A-NB056SO-BBSTD	A-NB115SO-BBSTE
Диаметр вала, мм	41	56	115
Температура рабочая, °С	+5...+60	0...+20	+5...+165
Давление рабочее, МПа	0,2	0,4	0,3
Перекачиваемая среда	обессоленная вода	дизельное топливо	обессоленная вода
Конструкция	одноступенчатое одинарное	одноступенчатое одинарное	одноступенчатое одинарное
Материал вращающегося кольца	СГ-П	СГ-П	СГ-П
Материал невращающегося кольца	СГ-П	СГ-П	СГ-П
Количество пружин, шт.	1	1	1
Материал пружины	Сталь пружинная (50ХФА ГОСТ 14963-78)	Сталь пружинная (50ХФА ГОСТ 14963-78)	Сталь пружинная (50ХФА ГОСТ 14963-78)
Материал прочих деталей уплотнения	Сталь нержавеющая (20Х13Л ГОСТ 5632-72)	Сталь конструкционная (Ст. 20 ГОСТ 1050-2013)	Сталь нержавеющая (20Х13Л ГОСТ 5632-72)

Основные параметры подшипниковых узлов приведены в таблице 2.

Основные параметры подшипниковых узлов

Наименование показателя	Величина для типоразмера		
	A32510-40	A32513-55	A1032926-112
Подшипник	92510 ГОСТ 8328-75	32513 ГОСТ 8328-75	1032926 ГОСТ 8328-75
Внутренний диаметр подшипника, мм	50	65	130
Ширина подшипника, мм	23	31	24
Манжета уплотнительная	1.1-40x60-1 ГОСТ 8752-79	1.1-55x80-1 ГОСТ 8752-79	1.1-112x136-1/5 ГОСТ 8752-79
Кольцо смазочное, внутренний диаметр x толщина, мм	76x4	96x4	148x4

На испытательном стенде одновременно испытываются два торцевых уплотнения (два одноступенчатых одинарных или одноступенчатое одинарное и одноступенчатое двойное) и два подшипниковых узла с системой смазки, которые входят в комплект опытных образцов.

Внешний вид испытательного стенда СКОУ приведен на рисунке 1, чертеж с указанием основных элементов – на рисунке 2. Габаритные размеры СКОУ – 1993x1060x1315 мм (длина x ширина x высота). Масса СКОУ – 480 кг.

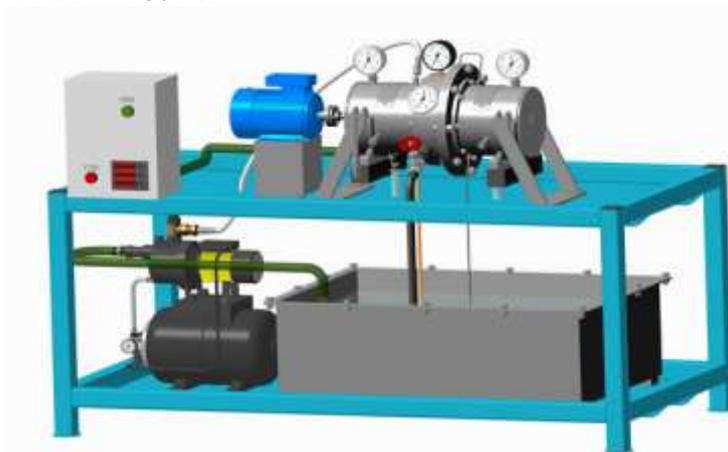


Рис. 1. Внешний вид испытательного стенда СКОУ

Испытательный стенд включает в себя: стенд 1 с электродвигателем 2, закрепленные на опорных стойках 3 и 4 на раме верхней горизонтальной поверхности стола 5; резервуар 6 с испытательной жидкостью объемом 0,22 м³ для испытаний торцевых уплотнений, размещенный на нижней горизонтальной поверхности стола; две масляные емкости 7 для испытаний системы смазки подшипниковых узлов; щит управления 8.

Подача испытательной жидкости на торцевые уплотнения осуществляется гидрофором 9, закрепленном на нижней горизонтальной поверхности стола и обвязанном трубопроводами. На всасывающем трубопроводе расположены клапаны и задвижки для регулирования давления на всасывании. На напорном трубопроводе также имеется запорно-регулирующая арматура для изменения напора и подачи.

На стенде установлены термометры 10 для измерения температуры на обойме подшипников, термометр 11 и манометр 12 для измерения температуры и давления испытательной жидкости. В нижней части стенда имеются сливные патрубки 13 для определения утечки испытательной жидкости через торцевые уплотнения. К каждой масляной емкости присоединена указательная колонка уровня жидкости 14. В щите управления размещен комплекс приборов (мультиметр) 15, позволяющих измерять напряжение, силу тока и активную мощность.

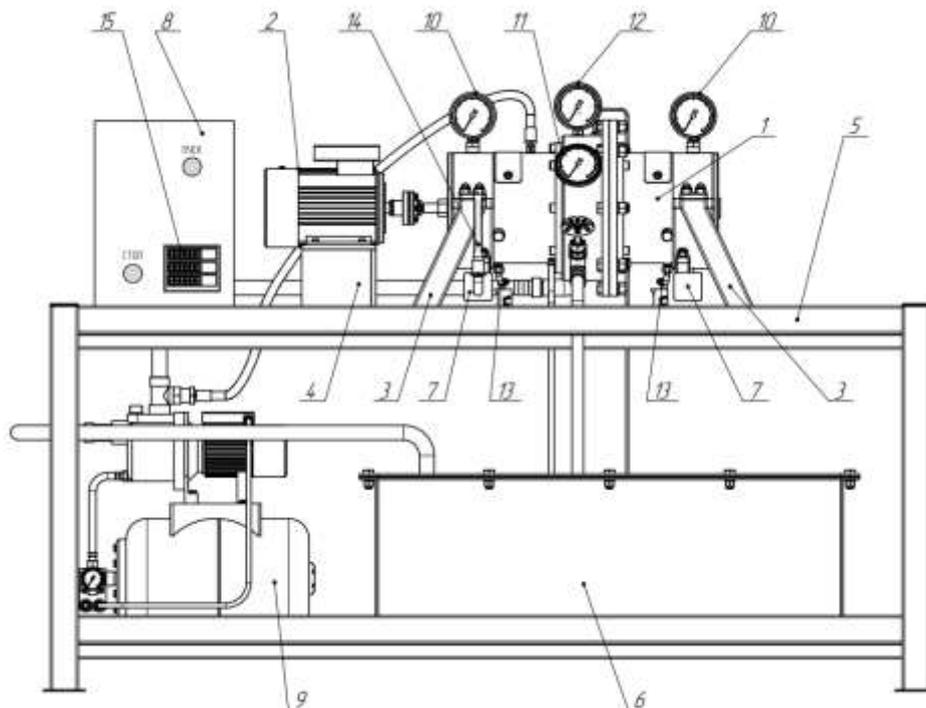


Рис. 2. Чертеж испытательного стенда СКОУ

1 – стенд; 2 – электродвигатель; 3, 4 – опорные стойки; 5 – рама верхней горизонтальной поверхности стола; 6 – резервуар с испытательной жидкостью; 7 – масляная емкость; 8 – щит управления; 9 – гидрофор; 10 – термометры для измерения температуры на обоиме подшипников; 11, 12 – термометр и манометр для измерения температуры и давления испытательной жидкости; 13 – сливной патрубков; 14 – указательная колонка уровня жидкости; 15 – мультиметр.

Перечень оборудования и контрольно-измерительных приборов и принадлежностей испытательного стенда приведен в таблицах 3 и 4.

Таблица 3

Оборудование испытательного стенда

Наименование	Марка	Мощность	Напряжение	Частота
Электродвигатель асинхронный однофазный	АИРЕ 80С2	2200 Вт	230 В	50 Гц
Насосная станция водоснабжения	BP 5 HOME Karcher	1100 Вт	230 В	50 Гц

Таблица 4

Контрольно-измерительные приборы испытательного стенда

Приборы	Диапазон измерений	Класс точности	Количество	Масса, кг
Измерительный прибор ОВЕН ИМС-Ф1(мультиметр)	переменное напряжение: 40-400 В;	0,5	1	не более 0,5
	переменный ток: 0,02-5 А;	0,5		
	активная мощность: 0,02-2,0 кВт	1,0		
Манометр показывающий технический ТМ 510Р 1МПа	0-1,0 МПа	1,5	1	0,38
Термометр биметаллический ТБф-120-d100	от 0 до + 120 °С	1,5	2	0,5
Термометр биметаллический ТБф-120-d100 с осевым штоком	от 0 до + 100 °С	1,5	1	0,5

Стенд 1 представляет собой цилиндрическую емкость, состоящую из корпуса 1.1 и диска корпуса 1.2., соединенных болтами. Внутри корпуса расположен вал 1.3. с упорными резьбовыми гребнями 1.4. К корпусу 1.1. подсоединяются два корпуса подшипника 1.5 с крышками 1.6 и 1.7. Съемные крышки 1.6 закрывают места расположения регулируемых торцевых уплотнений. Крышки 1.7 располагаются над подшипниками качения. В зависимости от типоразмера испытываемого комплекта опытных образцов на стенд устанавливаются сменные торцевые крышки 1.8, резьбовые втулки 1.9, вставки 1.10, проставыши 1.11(рис. 3).

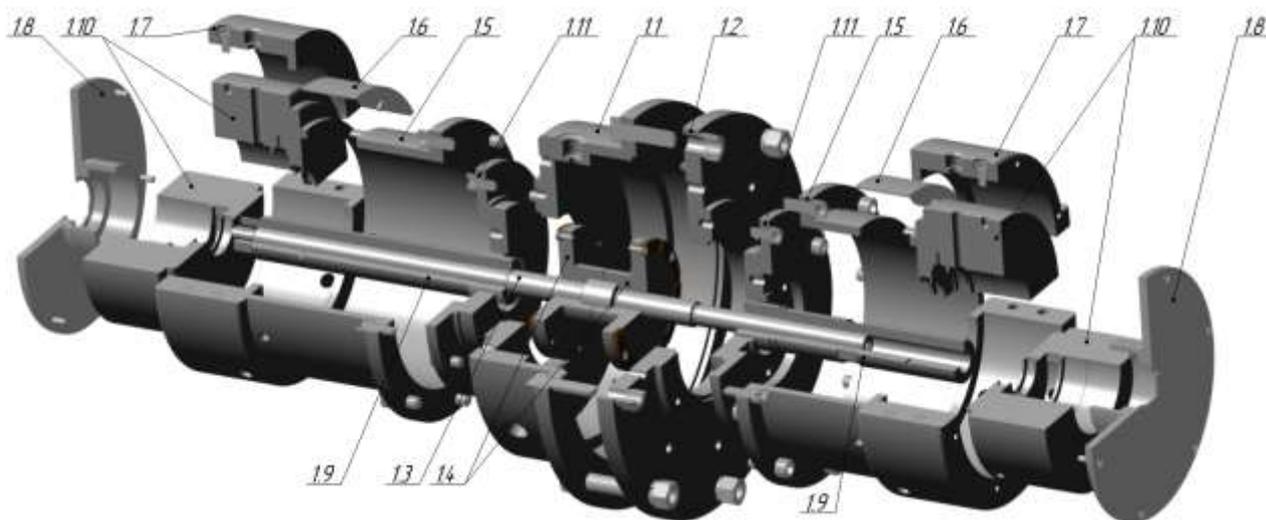


Рис. 3. Устройство стенда

Технология изготовления стенда включает в себя: токарную обработку, фрезерную ЧПУ (числовое программное управление) обработку, плоскошлифовальную обработку. Особое внимание уделяется валу и сменным втулкам. Во-первых, должна соблюдаться соосность сопрягаемых деталей. Во-вторых, вал и сменные втулки должны обладать высокой твердостью, достигаемой в результате термообработки. В-третьих, во избежание самоотвинчивания вставок с вала должно соблюдаться правильное направление нарезки резьбы, определяемое направлением вращения вала (рис. 4).

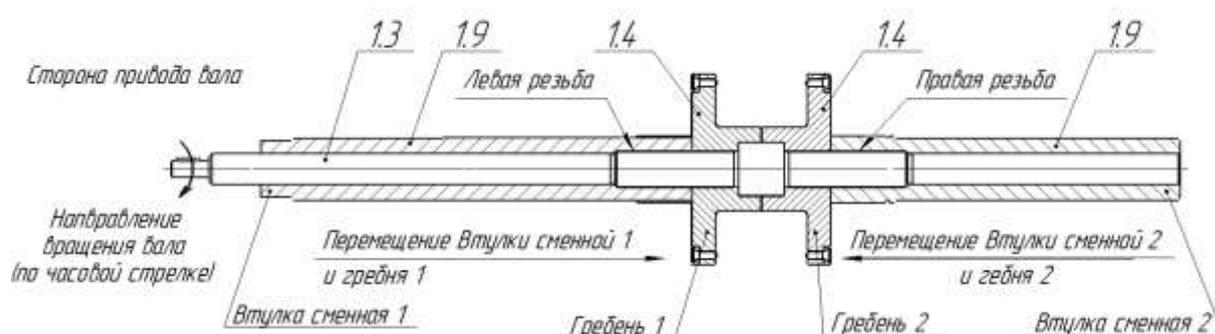


Рис. 4. Направление нарезки резьбы вала

После изготовления все детали проходят систему проверки КИМ (контрольно-измерительная машина), где с точностью до 0,001мм осуществляется измерение их геометрических размеров.

Соединение стенда 1с электродвигателем 2выполняется через упругую втулочно-пальцевую муфту. Для центровки применяется лазерный центровщик BALTECH.

Разрез стенда с установленным комплектом опытных образцов представлен на рисунке 5, размеры стенда – на рисунке 6.



Рис. 5. Разрез станда

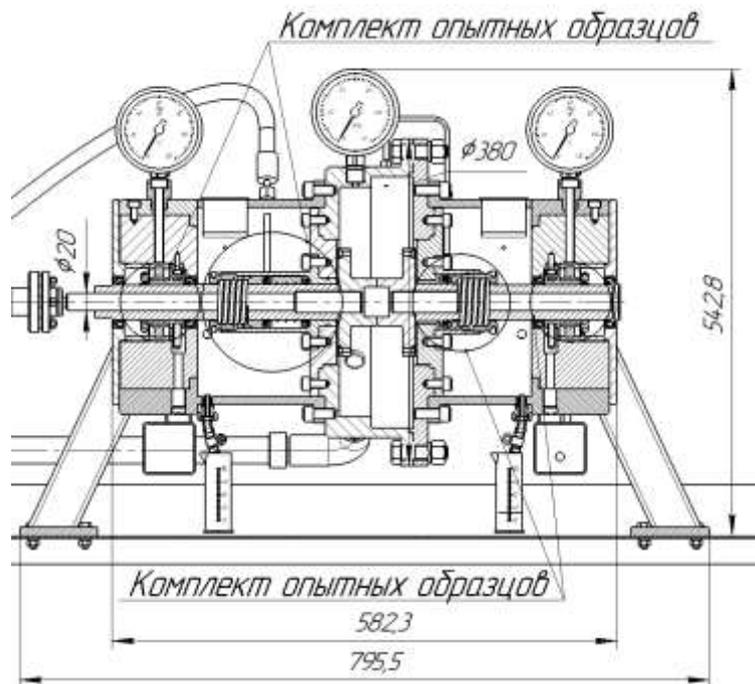


Рис. 6. Размеры станда

Изготовление станда СКОУ производится на предприятии ООО «КТМЗ» (рис. 7). Испытания проводятся в Испытательной лаборатории комплексных гидродинамических характеристик центробежных насосов на базе ООО «КТМЗ» (рис. 8). В процессе проведения испытаний персоналом предприятия ООО «КТМЗ» проводятся работы в объеме контрольного осмотра объекта испытаний, его монтаж, необходимые электрические подключения, текущее обслуживание и установка измерительного оборудования и штатных контрольно-измерительных приборов (КИП).

Испытания на СКОУ проводятся в нормальных климатических условиях: температура окружающего воздуха – 20 ± 10 °С, относительная влажность воздуха – от 45 до 80 %, атмосферное давление – от 740 до 780 мм рт. ст. Испытания комплекта опытных образцов включают:

- определение потери мощности на трение;
- оценку работоспособности системы смазки подшипниковых узлов;
- определение температурного режима подшипниковых узлов;
- оценку износа колец пары трения торцевых уплотнений;
- определение утечки испытательной жидкости через торцевое уплотнение в зависимости от давления в контакте.



Рис. 7. Производство и сборка стенда на предприятии ООО «КТМЗ»



Рис. 8. Ввод в эксплуатацию SKOU на предприятии ООО «КТМЗ»

Выводы

В рамках поставленной задачи:

1. разработана проектно-конструкторская документация;
2. изготовлены нестандартные элементы стенда;
3. выполнен монтаж, наладка и опытная эксплуатация;
4. разработана программа и методика проведения испытаний.

Методика апробирована в процессе испытаний торцевого уплотнения водяного насоса ЦНВ 65-40-7. Установлен факт работоспособности уплотнений на режимах близких к расчетным.

Авторы статьи выражают благодарность доценту кафедры энергетики Харитонову М.С. за практическую помощь в разработке электрической схемы стенда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Э.Майер Торцовые уплотнения: Пер. с нем. - М.: Машиностроение, 1978. – 288 с, ил.
2. Голубев А.И. Торцовые уплотнения вращающихся валов. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1974. – 212с.

STAND FOR TESTING OF END SUPPORTS AND MECHANICAL SEALS OF PUMPING EQUIPMENT (SKOU)

¹Filippova Valeria Mikhailovna, student;
²Yurkov Sergey Valerievich, Associate Professor

^{1,2}Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,
e-mail: yakubik99@yandex.ru; sergej.yurkov@klgtu.ru

The problem of experimental stand design development is considered. A set of prototypes requiring experimental bench studies is reviewed. The description of the stand design is given. The list of equipment, instrumentation and accessories and the list of tests are given.

УДК 621.12.061:628.169 (043)

ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОСАЖДЕНИЯ КАПЕЛЬНОЙ ВЛАГИ В ЖАЛЮЗИЙНЫХ СЕПАРАТОРАХ ПАРОВЫХ КОТЛОВ И ОПРЕСНИТЕЛЕЙ

¹Филонов Александр Георгиевич, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры энергетики;
²Щербаков Илья Игоревич, аспирант кафедры энергетики

^{1,2}Калининградский государственный технический университет,
Калининград, Россия, e-mail: ¹sudfac@yandex.ru; ²konnor19992013@gmail.com

На основании анализа литературных источников установлено, что основными критериями оценки эффективности жалюзийных сепараторов пара являются влажность пара после сепаратора и критическая скорость пара в сепараторе. Показано влияние на эффективность сепараторов приведенной скорости пара, солёности испаряемой воды, давления пара, влажности перед сепаратором, геометрических параметров профиля канала. Определены задачи проведения дальнейших исследований эффективности жалюзийных сепараторов паровых котлов и опреснителей.

Жалюзийные сепараторы широко применяются для очистки пара или газа от капельной влаги в барабанных паровых котлах ТЭС и РТС, парогенераторах АЭС, сепараторах-пароперегревателях паровых турбин АЭС, судовых и береговых дистилляционных опреснителях, аппаратах химической и газовой промышленности, системах кондиционирования. Сепараторы собираются из отдельных секций, а каждая секция – из профилированных стальных, или пластмассовых пластин толщиной 0,5-1мм. В зависимости от расположения секций и способа дренажа уловленной влаги из каналов, различают вертикальные, горизонтальные и наклонные жалюзийные сепараторы. Описание их конструкций приводится в [1-12].

Оценка эффективности действия жалюзийных сепараторов производится по величине влажности пара, или газа после сепаратора ω_2 и критической скорости пара (газа) в сепараторе $W_{кр}''$, при которой происходит резкое увеличение ω_2 . В ряде работ для оценки эффективности сепараторов предлагают использовать коэффициент полезного действия сепаратора и коэффициент очистки пара (газа) [5-7, 12, 13]:

$$\eta = 1 - \omega_2 / \omega_1 . \quad (1)$$

$$K_{оч} = \frac{\omega_1}{\omega_2}, \quad (2)$$

Проведённый анализ отечественных и зарубежных литературных источников показывает, что на ω_2 , $W_{кр}''$, η , $K_{оч}$ влияют [1-13]:

1. Режимные параметры:

- скорость пара в сепараторе W_c'' ;
- скорость пара приведенная к «зеркалу испарения» W_o'' ;
- влажность пара (газа) ω_1 и дисперсность капель влаги на входе в сепаратор;
- физические параметры пара и жидкости (ρ' , ρ'' , μ' , μ'' , σ), зависящие от давления P ;
- солёность испаряемой воды;

2. Конструктивные параметры:

- высота от «зеркала испарения» до сепаратора $H_{по}$;
- расположение пакета жалюзи в паровом объеме (горизонтальное, вертикальное, наклонное);

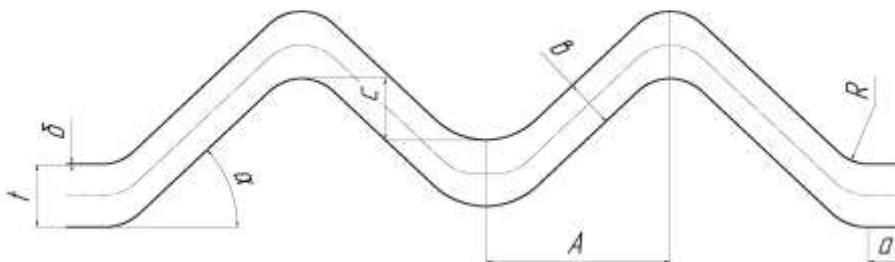
3. Геометрические размеры профиля криволинейного канала жалюзи (см. рис. 1).

Большое количество конструктивных и режимных параметров, влияющих на ω_2 и $W_{кр}''$, в затрудняет определение эффективности улавливания капель в сепараторах различной конструкции. Кроме того, при проведении экспериментальных исследований сепараторов авторы применяют различные способы измерения влажности ω_2 . Некоторые исследования проводились на атмосферных воздушно-водяных стендах.

Точные математические модели для расчета эффективности осаждения влаги в жалюзийных сепараторах пока ещё не разработаны. Аналитические исследования движения влажного пара в каналах жалюзийного сепаратора показывают, что улавливание капель на поверхности пластин с последующим дренажом влаги происходит под действием центробежной силы, сил инерции, тяжести, сопротивления и силы Архимеда.

Влияние геометрических размеров профиля криволинейного канала на эффективность осаждения влаги в жалюзийном сепараторе

Влияние геометрических размеров криволинейного канала жалюзийного сепаратора (рис. 2) на эффективность сепарации капельной влаги изучалось авторами в аналитических исследованиях [4-6, 8, 9].



*Рис. 1. Геометрические характеристики криволинейного канала жалюзи
 t - шаг между пластинами, δ - толщина пластины, α - половина угла поворота потока, град;
 C - перекрытие одной пластины другой, b - минимальный шаг между пластинами,
 A - расстояние между полуволнами, R - радиусгиба, a - длина входного и выходного участка*

Авторами [8, 9,] расчетами на компьютере было показано, что при наличии перекрытия пластин $C = (2-3)$ мм на эффективность сепаратора в наибольшей степени влияют расстояние между пластинами t и угол $\cdot\alpha$. С повышением давления и понижением скорости в сепараторе это влияние растёт. Однако в экспериментах на барботажном пароводяном стенде при $P = 0,3$ МПа увеличение α от 40^0 до 56^0 не влияло на ω_2 после горизонтального сепаратора [9].

Ю.М. Кигуром было установлено, что уменьшение шага между пластинами в вертикальных сепараторах от 30 мм до 15 мм снижало ω_2 примерно в (1,3-1,6) раза [12]. Экспериментальные исследования ЦКТИ показали, что вертикальный сепаратор с шагом пластин 10 мм (см. рис.3, профиль «в») работал примерно в десять раз эффективнее, чем сепараторы с шагом 37 и 41мм [10]. Профиль «в» был рекомендован для стационарной энергетики для $P \leq 11$ МПа.

Влияние числа полувольт n в вертикальном и горизонтальном сепараторе на влажность пара после сепаратора ω_2 оценивается авторами также по-разному. Расчетами на компьютере в работах [8 ,9] показано, что большая часть крупных капель улавливается первыми двумя полуволнами, а мелкие капли проходят каналы сепаратора. В исследованиях горизонтальных сепараторов увеличение n с двух до пяти не влияло на ω_2 при $P = 0,3$ МПа [8, 9]. В экспериментах на воздухо-водяном, атмосферном стенде автором [12] было получено уменьшение влажности воздуха после вертикального сепаратора в (3,7 - 4,4) раза при увеличении n с двух до восьми.

В исследованиях вертикальных и горизонтальных сепараторов с профилями, применяемыми в судовых опреснителях (см. рис. 2, профили «а» и «б») при $P = 0,02$ МПа влияние геометрических размеров криволинейного канала на ω_2 практически отсутствовало(см. рис. 3) [1].

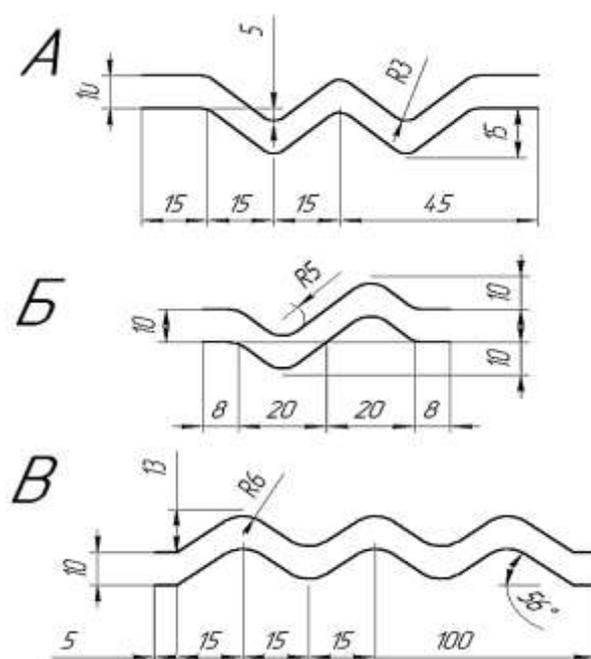


Рис. 2. Профили криволинейных каналов жалюзийных сепараторов применяемых в судовой и стационарной энергетике

Влияние режимных параметров и расположения секций сепаратора на эффективность его работы

По данным авторов [8, 10] увеличение приведенной скорости пара W_0'' приводит к резкому падению ω_2 , в тоже время в экспериментах, проведенных при $P \geq 0,1$ МПа и на вакууме, авторы [9, 11, 13] установили отсутствие влияния W_0'' на влажность пара после сепараторов.

Влияние влажности на входе в горизонтальный сепаратор ω_1 на его эффективность исследовалось авторами [8 ,9]. Однако увеличение ω_1 путём уменьшения высоты парового объема не приводило к увеличению ω_2 при одинаковых значениях W_c'' . В экспериментах ЦКТИ на атмосферном, воздухо-водяном стенде величина ω_1 не влияла на эффективность сепараторов [10]. В исследованиях на водо-воздушном стенде с увеличением влагосодержания воздуха автор [12] обнаружил увеличение уноса влаги после вертикальных сепараторов.

В исследованиях МЭИ на барботажном стенде увеличение давления пара от 0,3 МПа до 1,5 МПа приводило к увеличению влажности пара после горизонтального сепаратора примерно в 1,5 раза [8, 9]. В работе [13] было установлено уменьшение влажности пара ω_2 примерно в 2раза при

снижении давления пара от 0,02МПа до 0,0074 МПа. Ю. В. Козлов считает, что эффективность сепаратора не зависит от ω_1 и слабо зависит от давления пара [11].

Авторы работ [8, 9] приводят результаты исследования влияния солёности испаряемого концентрата на значения ω_2 после горизонтальных сепараторов при постоянном весовом уровне воды над парораспределительным щитом в барботажной колонке при давлениях 0,125; 0,7 и 1,5 МПа. С увеличением солёности концентрата по иону натрия от 1г/л до 30 г/л влажность ω_2 увеличивалась в (2-7) раза. В исследованиях вертикальных и горизонтальных сепараторов с профилями, применяемыми в судовых опреснителях (см. рис. 2, профили «а» и «б») при $P = 0,02\text{МПа}$ и $P = 0,1\text{МПа}$ влияние солёности испаряемой воды на ω_2 практически отсутствовало для всех типов сепараторов [1].

По данным МЭИ влажность пара после горизонтального и вертикального сепараторов при $P \geq 0,1\text{МПа}$ оказалась одинаковой при одной и той же скорости W_c'' . Автор исследовал эффективность гравитационно-инерционного сепаратора (ГИС) и установил, что при $P=0,125$ значения ω_2 после ГИС оказались ниже в (1,5 - 2,0) раза, чем после остальных сепараторов [8]. В исследованиях при $P = 0,02\text{МПа}$ расположение секций жалюзи практически не влияло на значения ω_2 (см. рис. 3) [1].

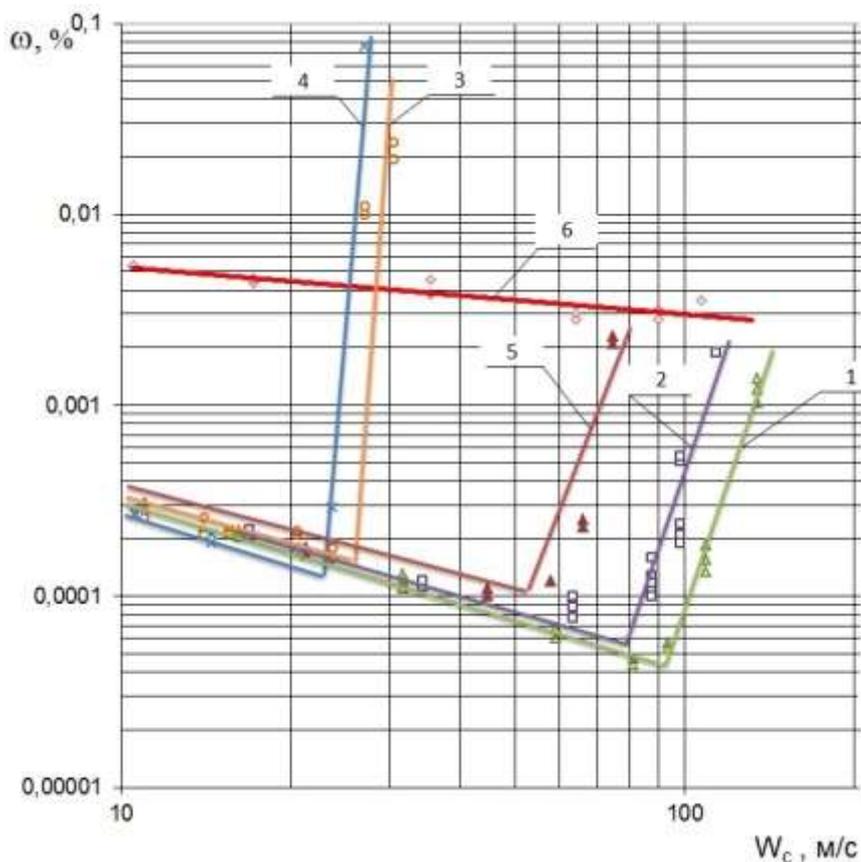


Рис. 3. Влажность пара после жалюзийных сепараторов в зависимости от скорости пара в сепараторах при $P = 0,02\text{МПа}$, $W_o'' = 1,6\text{ м/с}$ [1]

1, 2 - вертикальные сепараторы профили «а» и «б»; 3, 4 - горизонтальные сепараторы профили «в» и «б»; 5 – ГИС, профиль «б»; 6 - влажность пара на входе в сепараторы

Критическая скорость пара (газа) в сепараторах

Изучение влияния режимных и конструктивных параметров жалюзийных сепараторов на величину $W_{кр}''$ проводилось авторами [1, 8-12]. Подробные исследования влияния на $W_{кр}''$ расположения секций сепаратора и влажности ω_1 проводились ЦКТИ [10]. В ранних исследованиях Ю. Л. Сорокин для вычисления критической скорости потока пара или газа использует формулу

$$K = \frac{W_{кр}'' \cdot \sqrt{\rho''}}{\sqrt[4]{g^2 \cdot \sigma \cdot (\rho' - \rho'')}} , \quad (3)$$

где K - число Кутателадзе. Для расчета критических скоростей рекомендуется принимать следующие значения: для горизонтальных сепараторов $K = (0,3-0,4)$, для вертикальных и наклонных $K = (1,4-2,1)$. Более высокие критические скорости в вертикальных сепараторах автор объясняет пленочным дренажом влаги более эффективным, чем капельный дренаж в горизонтальных сепараторах. В последующих исследованиях была установлена новая зависимость для расчета критической скорости в вертикальных, наклонных и горизонтальных сепараторах:

$$\frac{W_{кр}'' \cdot \sqrt{\rho''}}{\sqrt[4]{g^2 \cdot \sigma \cdot (\rho' - \rho'')}} = (0,35 \div 0,45) \times \left[\frac{K_{const} - 1,69 \cdot \left(\frac{1-x'}{x'}\right)^{0,56} \cdot \left(\frac{h \cdot t}{L}\right)^{0,25} \cdot \frac{1}{\cos \alpha}}{0,4} \right]^{\sqrt{\sin \beta}} , \quad (4)$$

где: x' - влажность на входе в сепаратор; h и L - высота и ширина жалюзи, м; K_{const} - параметр, характерный для каждого профиля канала жалюзи.

Из выражений (3) и (4) видно, что критическая скорость зависит от конструктивных характеристик сепаратора. физических параметров пара и жидкости, а также от ω_1 .

По разному оценивается влияние влажности ω_1 на величину $W_{кр}''$ для жалюзийных сепараторов. На основании исследований проведенных в ВТИ [11], Ю.В. Козлов предлагает зависимость для нахождения предельной скорости пара, м/с

$$W_{кр}'' = K_p \cdot \left[\frac{\sigma \cdot (\rho' - \rho'')}{(\rho'')^2} \right]^{0,27} \cdot \left[\frac{x'}{(1-x')} \right]^{0,1} \cdot \left[6,9 + 3,3 \cdot \lg \frac{\beta}{360 - \beta} \right] , \quad (5)$$

где K_p - коэффициент, учитывающий неравномерность поля скоростей пара перед сепаратором, а $\beta = (10-90)^\circ$ - угол наклона сепаратора.

Комплекс $\left(\frac{x'}{1-x'}\right)^n$ в зависимостях (4) и (5) учитывает влияние влажности на входе в сепаратор ω_1 на $W_{кр}''$, где n принимает значения 0,56 и 0,1. Автор [12] установил влияние начальной влажности ω_1 на величину $W_{кр}''$ для горизонтальных сепараторов во всем диапазоне ω_1 . В ранних исследованиях [8] проводившихся при $P = 0,101$ МПа срыв уловленной влаги с пластин горизонтального сепаратора отсутствовал.

В исследованиях ЦКТИ установлено сильное влияние начальной влажности на $W_{кр}''$ при $\omega_1 > 50\%$ [10]. В исследованиях [1] проводившихся на атмосферном пароводяном стенде, на сепараторах различного типа с профилями канала жалюзи «а» и «б» критической скорости пара достичь не удалось по видимому из-за низкой влажности ω_1 . Авторы [10, 11] считают, что при значениях $\omega_1 < (30-50)\%$ начальная влажность не влияет на критическую скорость пара.

Как видно из формул (3), (4), (5) значения $W_{кр}''$ в жалюзийных сепараторах должны снижаться с ростом давления и увеличиваться при $P < 0,101$ МПа. Это подтверждается результатами экспериментальных исследований [1], которые проводились на вакууме. При $P = 0,02$ МПа значения $W_{кр}''$ полученные для вертикальных и горизонтальных сепараторов оказались значительно выше рассчитанных по формулам (3), (4).

Сопоставление зависимостей (3), (4) и (5) показывает, что при $P = 0,101$ МПа расчетные значения $W_{кр}''$ для горизонтальных сепараторов, расходятся примерно в (1,5 - 2,0) раза, а при $P = (0,0074 - 0,1)$ МПа для вертикальных сепараторов расхождение $W_{кр}''$ составляет более, чем в (2,5 - 3) раза (см. рис. 4).

Экспериментальные данные о влиянии геометрических параметров профиля канала сепараторов на $W_{кр}''$ расходятся также. Авторы [8, 9] считают, что уменьшение угла α увеличивает $W_{кр}''$

горизонтального и наклонного сепаратора, что не согласуется с исследованиями [10] в которых увеличение α приводило к возрастанию $W_{кр}''$. В исследованиях вертикальных и горизонтальных сепараторах при $P = 0,02\text{МПа}$ [1] было установлено, что сепараторы с профиль канала «б» обладали меньшей критической скоростью, чем сепараторы с профиль канала «а» (см. рис. 2, 3).

В исследованиях [12] установлено, что уменьшение шага между пластинами в вертикальных сепараторах от 30 мм до 15 мм увеличивает $W_{кр}''$ примерно на 20 %. В исследованиях вертикальных сепараторов состоящих из плоских параллельных пластин при $P = 0,02\text{МПа}$ [1] уменьшение расстояния между пластинами с 10 мм до 1,7 мм привело к снижению $W_{кр}''$ примерно в 2раза.

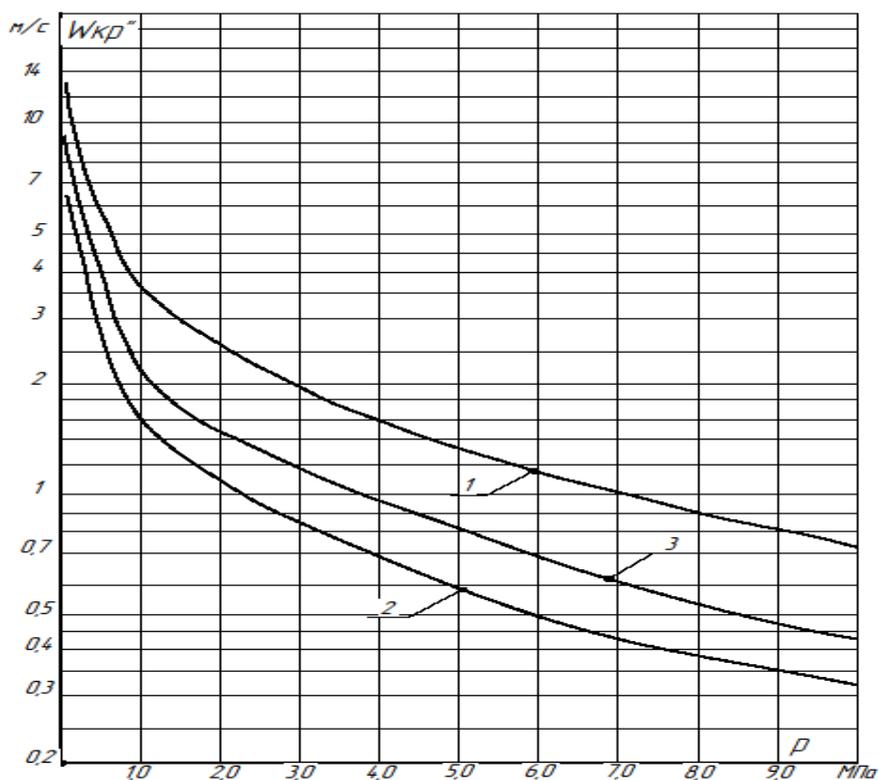


Рис. 4. Сопоставление критической скорости пара в вертикальных жалюзийных сепараторах по зависимостям (6), (7), (8), профиль «в», $P \geq 0,1\text{МПа}$, $\omega_1 = 10\%$ [7]

Влияние числа полуволн n на $W_{кр}''$ оценивается авторами также по-разному. В исследованиях горизонтальных сепараторов [8, 9] увеличение n с двух до пяти не влияло на $W_{кр}''$ для данного типа сепаратора. В экспериментах на воздушно-водяном, атмосферном стенде автором [12] было получено уменьшение критической скорости в вертикальном сепараторе в (3,5-5,9) раза при уменьшении числа полуволн с восьми до двух.

Влажность пара после жалюзийных сепараторов

Влажность пара после жалюзийных сепараторов может быть выражена зависимостями [1]:

1. При $P < 0,1\text{МПа}$, для $W_o'' > 1,0$ м/с:

$$\omega_2 = C \cdot 10^{-3} \cdot (W_o'')^{-0,68} \cdot (W_c'')^{-1,0} \cdot \left(\frac{\rho''}{\rho' - \rho''} \right)^{0,35}, \quad \%, \quad (6)$$

где $C = (1,14 - 1,35)$ – коэффициент зависящий от конструкции сепаратора.

2. При $P \geq 0,1 \text{ МПа}$, для $W_o'' < 0,5 \text{ м/с}$:

$$\omega_2 = 4,45 \cdot 10^{-3} \cdot (W_o'')^{-0,34} \cdot (W_o'')^{-0,5} \cdot \left(\frac{\rho''}{\rho' - \rho''} \right)^{0,22}, \% \quad (7)$$

Формулы (6) и (7) могут применяться для расчета ω_2 при скорости пара в сепараторе $W_c'' < W_{кр}''$.

Выводы

В большинстве опубликованных отечественных работ эффективность жалюзийных сепараторов, применяемых в стационарной энергетике, аппаратах химической и газовой промышленности, системах вентиляции оценивается зависимостями, установленными в результате проведения экспериментальных исследований для области избыточных давлений и на атмосферных стендах.

Подробные исследования эффективности жалюзийных сепараторов устанавливаемых на судовых опреснителях проводились только в работе [1] при $W_o'' = 1,6 \text{ м/с}$ и $P = 0,02 \text{ МПа}$. Формулы для расчета ω_2 , полученные в этих исследованиях, нуждаются в уточнении для практического применения их в диапазоне давлений и нагрузок парового объема судовых опреснителей.

Влияние шага между пластинами на эффективность жалюзийных сепараторов при $P < 0,1 \text{ МПа}$ исследовалось только на пакетах параллельных пластин. Влияние числа полуволн профиля канала жалюзи оценивалось только приблизительно.

Отсутствуют зависимости для определения $W_{кр}''$ в жалюзийных сепараторах судовых опреснителей при $P < 0,1 \text{ МПа}$. Результаты исследований влияния солёности испаряемой воды на ω_2 , полученные при $P < 0,1 \text{ МПа}$, расходятся с результатами других исследований для области избыточных давлений и нуждаются в проверке.

На основании вышеизложенного поставлены следующие задачи проведения дальнейших исследований эффективности жалюзийных сепараторов:

1. Установить влияние солесодержания испаряемой воды и давления вторичного пара на величину ω_2 и $W_{кр}''$ при давлениях $P < 0,1 \text{ МПа}$ и скорости пара в камере испарения $W_o'' > 1,5 \text{ м/с}$.

2. Исследовать эффективность жалюзийных сепараторов при $P < 0,1 \text{ МПа}$ и скорости пара в камере испарения $W_o'' > 1,5 \text{ м/с}$ в широком диапазоне скоростей пара в сепараторе W_c'' . Установить зависимости для расчета $W_{кр}''$ и ω_2 в этих условиях.

3. Исследовать эффективность жалюзийных сепараторов с различным числом полуволн профиля канала жалюзи, углом поворота потока и шагом между пластинами при $P < 0,1 \text{ МПа}$.

4. Произвести сравнение эффективности жалюзийных сепараторов разной конструкции и дать рекомендации по их использованию в судовых дистилляционных опреснителях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филонов А.Г. Влияние режимных и конструктивных параметров сепараторов судовых опреснителей на эффективность процессов тонкой очистки пара. автореф. дисс... канд. техн. наук. Калининград, 2000. 22с

2. Голубева С.И., Власова О.С., Хорзова Л.И. Факторы, определяющие условия реализации сепарационного процесса в инерционных жалюзийных сепараторах // Инженерный вестник Дона. электронный научный журнал. - 2021. - №5 // Электрон. дан. Режим доступа URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2021/6990>

3. Голубева С.И., Хорзова Л.И. Обобщение режимных условий работы каплеуловителей интенсивных аппаратов мокрой газоочистки // Инженерный вестник Дона. электронный научный журнал. - 2021. - №3 // Электрон. дан. - Режим доступа URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2021/6883>

4. Łukasz Makowski, Jakub Łaskowski, Mariusz Tyranski Influence of Modification of the Geometry of the Wave-Plate Mist Eliminators on the Droplet Removal Efficiency - CFD Modelling // Processes. - 2021. - V. 1499. - № 9. - 30 p. // Электрон. дан. - Режим доступа URL: <https://doi.org/10.3390/pr9091499>.

5. Weiwei Maa, Xiaolin Wua, Zhongli Jib Design and performance measurement of wave-plate mist eliminator with microstructural feature plate surface Desalination and Water Treatment. – 2019. - V. 160. - №8. - Pp. 378-387 // Электрон. дан. – Режим доступа URL: https://www.deswater.com/DWT_articles/vol_160_papers/160_2019_378.pdf
6. Chen Zhao, Jigang Zhao, Mei Cong Simulation Study on the Corrugated Plate Gas–Liquid Separator with the Assistance of the Drainage Hook // ACS Omega. – 2022.- V. 48.- №7.- Pp. 44134–44146 // Электрон. дан. – Режим доступа URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.2c05581>
7. Маннанов Т.И. Исследование гидродинамических характеристик устройств ввода сырья и каплеотбойных устройств для колонного и сепарационного оборудования: автореф. дис. ... канд. техн. наук. - Уфа, 2023. - 24 с.
8. Девянин В.А. Выбор оптимальных условий работы жалюзийных сепараторов для парогенерирующих установок ТЭС и АЭС: автореф. дис. ... канд. техн. наук. - М., 1985. - 20 с.
9. Рафаелян А.В. Повышение эффективности сепарирующих устройств аппаратов барботажного типа ТЭС и АЭС: автореф. дис. ... канд. техн. наук. - М., 1989. - 18 с.
10. Сорокин Ю.Л. Разработка методов учета и проектирования паросепарационных устройств энергооборудования: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. - Л., 1986. - 40 с.
11. Козлов Ю. В. Осушители пара и их использование в различных аппаратах на АЭС / Труды ВТИ. - М., 1974. - Вып. 2.- С. 111-119.
12. Кигур, Ю.Н. Экспериментальное исследование и совершенствование сепараторов оросительных камер кондиционеров: автореф. дис. ... канд. техн. наук. - М., 1969. - 24 с.
13. Тихонов В. М. Экспериментальное исследование уноса и сепарации капель в вакуумных опреснителях: Дисс. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук.- М., 1978.- 298 с.

ABOUT EFFICIENCY OF DROPLE MOISTURE DEPOSITION IN LOUVER SEPARATORS OF STEAM BOILERS AND DESALINATION PLANTS

¹Alexandr Georgievich Filonov, PhD, associate professor of Energy Department;

²Shcherbakov Ilya Igorevich, post-graduate student of Energy Department

^{1,2}Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,
e-mail: ¹sudfac@yandex.ru; ²konnor19992013@gmail.com

Based on literary sources analysis, it was established that the main criteria for assessing louvered steam separators effectiveness are steam after the separator humidity and critical steam speed in separator. The influence of steam velocity, salinity of evaporated water, steam pressure, humidity in front of separator, and channel profile geometric parameters on separators efficiency is shown. The objectives of further research into effectiveness of louvered separators of steam boilers and desalination plants have been identified.

УДК 639.2

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОГО УПРАВЛЕНИЯ РЫБНЫМИ РЕСУРСАМИ

¹Ампилогов Владимир Алексеевич, доцент кафедры прикладной математики и информационных технологий

¹Калининградский государственный технический университет,
Калининград, Россия, e-mail: vladimir.ampilogov@klgtu.ru

Изучается нелинейная математическая модель управления рыбным промыслом, для понимания, как изменяется количество рыбных ресурсов в некоторой водной среде в зависимости от производительности выращивания рыбы, ее смертности и промысла. Модель состоит из двух зон – зоны рыболовства, т.е. свободного промысла и заповедной (зарезервированной, резервной) зоны, где рыболовство запрещено. Далее в статье проводится анализ математической модели и определяются точки равновесия: биологическая и биоэкономическая, а также изучается динамика этих точек, выводятся условия устойчивости и неустойчивости системы. Поведение этой динамической модели управления морскими промыслами было проиллюстрировано с помощью численного моделирования для подтверждения представленных аналитических результатов.

1. Введение

В последние годы такие экологические проблемы, как загрязнение воздуха и воды, изменение климата, чрезмерная эксплуатация морских экосистем, истощение ископаемых ресурсов и сохранение биоразнообразия, привлекают пристальное внимание общественности, всех заинтересованных сторон и ученых, как на местном, так и на глобальном уровнях. Известно, что деятельность человека наносит серьезный ущерб окружающей среде и экологии, наиболее драматичным и примерами которого являются необратима потеря видов, разрушение среды обитания или климатические катастрофы. В этом контексте сохранение и управление возобновляемыми природными ресурсами в морских и прибрежных районах представляет большую озабоченность для поступательного развития страны.

Устойчивое саморазвитие требует необходимость организации и контроля динамики и сложных взаимодействий между человеком, производственной деятельностью и природными ресурсами, чтобы способствовать их сосуществованию в общей экосистеме.

Эффективное и устойчивое управление природными ресурсами, мера контроля таких систем, во многом, зависит от существенного понимания механизмов их эволюции во времени, где математическое моделирование в терминах нелинейных дифференциальных уравнений (ODE) играет значительную роль. В результате математическое моделирование широко используется для обсуждения различных типов реальных явлений, что приводит к разработке лучших стратегий прогнозирования, предотвращения, управления и контроля.

Для примера отметим работу Biswas и др. [3], которые исследовали потенциальные последствия глобального изменения климата в республике Бангладеш. Mondal и Biswas [15] разработали математическую модель для описания передачи вируса Nipah между летучими мышами и человеком. Neilan и LenHart [17] показали применение стратегии оптимального управления в моделировании заболеваний. Biswas и Haque [5] обсудили необходимость использования нелинейной динамической системы для контроля инфекционного заболевания. Можно сослаться на другие работы, посвященные этой теме [1, 4, 6, 8, 9, 16] для ознакомления с альтернативными приложениями математического моделирования в области биологии.

За последние десятилетия многие исследователи представили свои математические модели для оптимизации промыслового производства рыбы, потому что именно математическое модели-

рование – это искусство перевода проблем из прикладной области в прослеживаемую математическую формулировку с помощью теоретического и численного анализа.

Например, Leung и Wang [13] представили математическую модель для коммерческого рыболовства. Clark и др. [7] исследовали влияние существенных инвестиций на оптимальную политику эксплуатации запасов возобновляемых ресурсов. Kitabatake [11] разработал динамическую модель для рыбных ресурсов с отношениями хищник-жертва на основе данных наблюдений для озера Kasumigaura (Япония).

Mesterton-Gibbons [14] также исследовали оптимальную политику для максимизации прибыли от совместного лова хищника и жертвы. Zhang и др. [19] предложили и проанализировали модель для изучения оптимальной политики рыболовства в рамках структурированной задачи и вывели необходимые и достаточные условия для сосуществования и вымирания видов.

Song и Chen в работе [18] обсудили оптимальную политику добычи рыбы, вывели условие равновесия для двухвидовой конкурентной системы и вывели условия для существования асимптотически стабильного положительного равновесия, а также вывели лимиты для добычи зрелой популяции.

Dubeu и др. [10] предложили динамическую модель для одновидового промысла, который частично зависит от растущего ресурса.

На основе перечисленной литературы и в соответствии с моими представлениями предлагается математическая модель для оптимизации производства рыбы с использованием системы нелинейных дифференциальных уравнений. В статье обсудим точки равновесия, динамическое поведение этих точек и получены условия устойчивости и неустойчивости предложенной модели. Наконец, обсудим численное моделирование и графическое представление предложенной математической модели.

2. Формулировка модели

Рассмотрим рыбный ресурс промысла, состоящий из двух зон: зоны свободного рыболовства и зоны зарезервированных (заповедных) участков, в системе жертва-хищник. Пусть среда состоит из двух участков, один из которых доступен как для хищника, так и для жертвы, а другой является убежищем для жертвы.

Предположим, что каждый участок однороден. Убежище для жертвы представляет собой заповедную зону и в ней запрещен лов рыбы, в то время как другая зона является открытой зоной для рыболовства. Предположим, что жертва мигрирует между двумя участками случайным образом, а в каждой зоне рост популяции рыбы происходит по логистической модели. Учитывая все это, система уравнений приобретает вид:

$$\frac{dx}{dt} = rx \left(1 - \frac{x}{K}\right) - \sigma_1 x + \sigma_2 y - qEx \quad (1)$$

$$\frac{dy}{dt} = sy \left(1 - \frac{y}{L}\right) + \sigma_1 x - \sigma_2 y \quad (2)$$

Здесь $x(t)$ – плотность биомассы некой популяции в пределах зоны свободного рыболовства, а $y(t)$ – плотность биомассы той же популяции внутри заповедной зоны соответственно в тот же момент времени t .

Пусть E – это как бы та «мощность», «усилие», приложенное для промысла рыбной популяции на незарезервированном участке, тогда величина qE – будет промысловой смертностью рыбной популяции. Опять r и s – собственная скорость роста популяции рыб в незарезервированных и заповедных зонах соответственно.

Пусть рыба популяции не заповедного участка мигрирует в заповедный район со скоростью σ_1 , а рыбная популяция заповедной области мигрирует в незарезервированную область со скоростью σ_2 . Производительность видов рыб в незарезервированной и резервированной зоне K и L соответственно, q – коэффициент лова популяции видов рыб в свободной зоне.

Если не происходит миграции рыб из зарезервированной зоны в нерезервированную (т.е. $\sigma_2 = 0$) и $r - \sigma_1 - qE < 0$, то $\frac{\partial x}{\partial t} < 0$, Аналогично, если нет миграции рыбной популяции из нерезервированной зоны в резервированную (т.е. $\sigma_1 = 0$) и $s - \sigma_2$, то $\frac{\partial y}{\partial t} < 0$.

3. Анализ модели

Проанализируем нелинейную систему уравнений (1)-(2). Для того, чтобы найти точки равновесия, исследуем динамическое поведение этих точек, а также проверим устойчивость при анализе точек равновесия, которая направлена на рост популяций рыб.

3.1. Анализ позитивности

Сначала мы докажем, что все переменные в уравнениях модели системы (1) и (2) положительны.

Лемма 1. Если $x(t) \geq 0$ и $y(t) \geq 0$, то решения $x(t)$ и $y(t)$ системы уравнений (1) и (2) являются положительными.

Доказательство: чтобы доказать эту лемму, из уравнения (1) получаем (3)

$$\frac{dx}{dt} = rx(t) \left(1 - \frac{x}{K}\right) - \sigma_1 x + \sigma_2 y - qEx \quad (3)$$

Далее преобразуем: $\frac{dx}{dt} + \sigma_1 x + qEx \geq 0 \Rightarrow \frac{dx}{dt} + (\sigma_1 + qE)x \geq 0$ интегрируем, получаем интегрирующий фактор, $IF = \int e^{(\sigma_1 + qE)t} dt = e^{(\sigma_1 + qE)t}$

Умножив на IF с обеих сторон, получим, $e^{(\sigma_1 + qE)t} \frac{dx}{dt} + e^{(\sigma_1 + qE)t} (\sigma_1 + qE)x \geq 0 \Rightarrow \frac{d}{dt} (e^{(\sigma_1 + qE)t} x) \geq 0 \Rightarrow x \geq c_1 e^{-(\sigma_1 + qE)t}$, где c_1 - целочисленная константа. Для значения постоянной c_1 применяем начальные условия, когда $t = 0$, тогда $x(t) = x(0)$, следовательно, $x(0) \geq c_1$.

Подставляя значение c_1 в уравнение, получаем, $x(t) \geq x(0)e^{-(\sigma_1 + qE)t}$. Поскольку $x(t) \geq 0$ и $\sigma_1 + qE \geq 0$, следовательно, $x(t) \geq 0$ для всех $t \geq 0$.

Аналогично, из уравнения (2) получаем,

$\frac{dy}{dt} = sy \left(1 - \frac{y}{L}\right) + \sigma_1 x - \sigma_2 y \Rightarrow \frac{dy}{dt} + \sigma_2 y \geq 0$, интегрируем, получаем интегрирующий фактор, $IF = \int e^{\sigma_2 t} dt = e^{\sigma_2 t}$.

Теперь, умножая $e^{\sigma_2 t}$ обе стороны, имеем, $e^{\sigma_2 t} \frac{dy}{dt} + e^{\sigma_2 t} \sigma_2 y \geq 0 \Rightarrow \frac{d}{dt} (e^{\sigma_2 t} y) \geq 0 \Rightarrow e^{\sigma_2 t} y \geq c_2 \Rightarrow y \geq c_2 e^{-\sigma_2 t}$, где c_2 - целочисленная константа. Для значения постоянной c_2 применяем начальные условия, когда $t = 0$, тогда $y(t) = y(0)$, следовательно, $y(0) \geq c_2$. Подставляя значение c_2 в уравнение, получаем, $y(t) \geq y(0)e^{-\sigma_2 t}$. Поскольку $y(t) \geq 0$ и $\sigma_2 \geq 0$, следовательно, $y(t) \geq 0$ для всех $t \geq 0$. Вывод. Таким образом мы доказали, что $x(t)$ и $y(t)$ положительны при всех $t \geq 0$.

3.2. Доказательство существования равновесия

Теперь мы докажем утверждение о наличии устойчивых состояний системы, приравняв производные в левых частях к нулю и решив полученные алгебраические уравнения. В результате мы должны получить два возможных устойчивых состояний, а именно $p(0,0)$ и $p(x^*, y^*)$. Здесь (x^*, y^*) – это положительные решения следующих алгебраических уравнений:

$$rx \left(1 - \frac{x}{K}\right) - \sigma_1 x + \sigma_2 y - qEx = 0 \quad (4)$$

$$sy \left(1 - \frac{y}{L}\right) + \sigma_1 x - \sigma_2 y = 0 \quad (5)$$

Исключив y из уравнений (4) и (5), получим (6),

$$\sigma_2 y = \sigma_1 x + qEx - rx \left(1 - \frac{x}{K}\right) \Rightarrow y = \frac{K\sigma_1 x + qExK - rxK + rx^2}{\sigma_2 K} \quad (6)$$

Подставляя значение y в уравнение (5)

$$s \left(\frac{K\sigma_1 x + qExK - rxK + rx^2}{\sigma_2 K} \right) \left(1 - \frac{K\sigma_1 x + qExK - rxK + rx^2}{\frac{\sigma_2 K}{L}} \right) +$$

$$\sigma_1 x - \sigma_2 \frac{K\sigma_1 x + qExK - rxK + rx^2}{\sigma_2 K} = 0 \Rightarrow$$

$\Rightarrow ax^3 + bx^2 + cx + d = 0$, где $a = \frac{sr^2}{L\sigma_1^2 K^2}$, $b = 2sr(r - \sigma_1 - qE)$ и

$$c = \frac{s(r - \sigma_1 - qE)^2}{L\sigma_2^2} - \frac{(s - \sigma_2)r}{L\sigma_2}, \quad d = \frac{(s - \sigma_2)}{\sigma_2}(r - \sigma_1 - qE) - \sigma_1$$

Приведенное выше уравнение имеет единственное положительное решение $x = x^*$, если выполняются следующие неравенства:

$$\frac{s(r - \sigma_1 - qE)^2}{L\sigma_2^2} < \frac{(s - \sigma_2)r}{L\sigma_2} \quad (7)$$

$$(s - \sigma_2)(r - \sigma_1 - qE) < \sigma_2 \sigma_1 \quad (8)$$

Подставляя x^* , y^* из (3), и при условии их положительности, мы будем иметь:

$$x^* > (k/r)(r - \sigma_1 - qE)$$

3.3. Исследование динамических равновесных состояний

Исследование динамических равновесных состояний может быть изучено путем вычисления матриц, соответствующих каждому положению равновесию.

В уравнении (1) мы отмечаем, что тривиальное равновесие p_0 является неустойчивым. Используя критерий, Рунта-Гурвица, можно легко проверить, что все собственные значения такой матрицы, соответствующей некоторому значению p^* , имеют отрицательные вещественные части, и поэтому p^* локально асимптотически устойчива на плоскости.

Это означает, что мы можем найти такую малую окружность с центром p^* такую, что любое решение $(x(t), y(t))$ системы (2), находящееся внутри круга в некоторый момент времени $t = t_1$, будет оставаться внутри круга при всех $t \geq t_1$ и будет стремиться к (x^*, y^*) при $t \rightarrow \infty$. В следующей лемме мы покажем, что все решения модели (2) положительны и равномерно ограничены.

Лемма 2. Множество $\varphi = \{(x, y) \in R_+^2 : w = x + y \leq \frac{\mu}{\vartheta}\}$ является областью существования для всех решений, начинающихся в

где ϑ - положительная константа, а $\mu = \frac{K}{4r}(r - \vartheta - eq)^2 + \frac{L}{4s}(s + \vartheta)^2$.

Доказательство:

Пусть, $w(t) = x(t) + y(t)$ и $\vartheta > 0$ - константа. Тогда имеем,

$$\begin{aligned} \frac{dw}{dt} &= \frac{rx^2}{K} + (r - \vartheta - eq)^2 x^2 - \frac{sy^2}{L} + (s - \vartheta)y \leq \\ &\leq \frac{K}{4r}(r - \vartheta - eq)^2 + \frac{L}{4s}(s + \vartheta)^2 = \mu \end{aligned}$$

Исходя из теории дифференциальных неравенств [2] имеем,

$$0 < w(t), x(t), y(t) \leq \frac{\mu}{\vartheta}(1 - e^{-\vartheta t}) + w(0), x(0), y(0), e^{-\vartheta t}, \text{ когда } t \rightarrow \infty \text{ и } 0 < w < \frac{\mu}{\vartheta}.$$

В следующей теореме мы обсудим глобальную устойчивость равновесий p^* .

Теорема 1. Точка равновесия p^* глобально асимптотически устойчива.

Доказательство: рассмотрим следующую дефинитивную функцию относительно p^* .

$$V = \left(x - x^* \ln \frac{x}{x^*} \right) + K_1 \left(y - y^* - y^* \ln \frac{y}{y^*} \right)$$

Дифференцируя V по времени t , получаем:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{r}{K}(x - x^*)^2 - \frac{y^* \sigma_2 s}{x^* \sigma_1 L}(y - y^*)^2 - \frac{\sigma_2}{x^* x y}(x y^* - y x^*) < 0$$

Это показывает, что производная $\frac{dV}{dt}$ отрицательна, и, отсюда, на основании критерия устойчивости Ляпунова [12] следует, что положительное равновесие можно считать глобально и асимптотически устойчивым.

3.4. Устойчивость равновесных состояний

Пусть две функции $u = u(x, y) = \frac{dx}{dt}$ и $v = v(x, y) = \frac{dy}{dt}$ соответствуют устойчивому состоянию $(x^*, y^*) = (0, 0)$ уравнения (1)

и (2). Тогда якобиан системы имеет вид:

$$J_{(\bar{x}, \bar{y})} = \begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r - \frac{2rx}{k} - \sigma_1 - qE & \sigma_2 \\ \sigma_1 & s - \frac{2y}{L} - \sigma_2 \end{pmatrix}$$

Для устойчивых состояний $(x, y) = (0, 0)$ получаем,

$$J_{(0,0)} = \begin{pmatrix} r - \sigma_1 - qE - \omega & \sigma_2 \\ \sigma_1 & s - \sigma_2 - \omega \end{pmatrix}$$

Теперь, пусть $r - \sigma_1 - qE - \omega = 0$ или $s - \sigma_2 - \omega = 0 \Rightarrow$

$\omega_1 = r - \sigma_1 - qE$, $\omega_2 = s - \sigma_2$. Здесь собственные значения ω матрицы J определяют устойчивость состояний.

В зависимости от ω следующие условия устойчивости:

1. Если собственное значение $\omega < 0$, то устойчивое состояние стабильно,
2. Если собственное значение $\omega > 0$, то система неустойчива.

4. Численные результаты и обсуждение

В этом разделе рассмотрим численные примеры рассмотренных нами моделей (1), (2). А также на этих примерах обсудим их устойчивость и неустойчивость. Ранее обсудили теоретические аспекты существования равновесия, анализ позитивности и динамическую стабильность устойчивых состояний.

Для численного решения системы дифференциальных уравнений будем использовать метод Рунге-Кутты. Для моделирования были взяты параметры из [11].

При моделировании очень важен выбор начальных данных модели.

Пусть общая убыль популяции рыбы в свободной зоне за счет вылова равен $E=0.2$. Производительность рыб в заповедной и не в заповедной зонах соответственно $K = 110$ и $L = 200$. Внутренняя скорость роста популяций рыбы составляет в свободной зоне $r=0,03$, в заповедной зоне $s=0.04$. Коэффициент вылова (способность вылова) $q=0,001$.

Пусть рыба популяции свободной зоны мигрирует в заповедный район со скоростью $\sigma_1 = 0,05$, а рыбная популяция заповедной области мигрирует в незарезервированную область со скоростью $\sigma_2=0,05$. В качестве базового периода времени берем 90 дней.

Результат моделирования отображается на рис. 1.

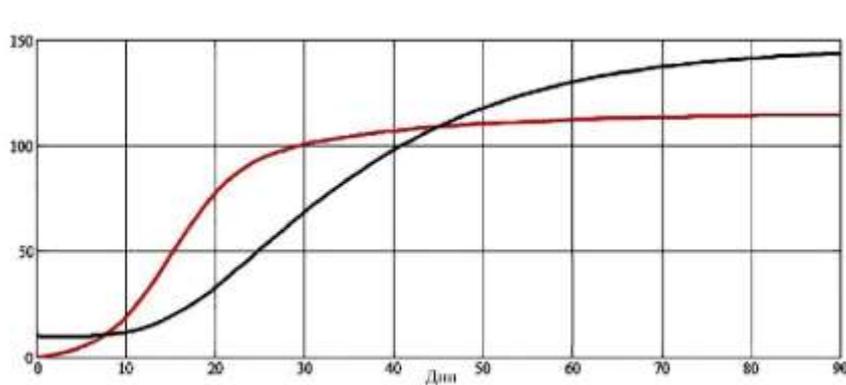


Рис.1- График изменения популяции (согласно модели) с течением времени (90 дней)

На этом графике (Рис.1) показана относительная плотность биомассы на заповедной (пунктир) и свободной (сплошная линия) зонах рыбоводства. Сначала рост биомассы стремителен, однако начиная с некоторого времени устанавливается относительный не большой рост, не такой интенсивный как на начальном участке. Очевидно, это можно объяснить стремлением к относительному равновесию при данной ресурсной базе.

На рисунке 2 показана динамика изменения биомассы рыбы при других параметрах. Соответственно меняется динамика популяции рыбы в заповедной зоне и в не заповедной. А через 90 дней разница составляет более 400 единиц. Если мы вводим значение общего объема, применяемого для добычи популяции рыбы и увеличиваем вылов рыбы, то популяция уменьшается.

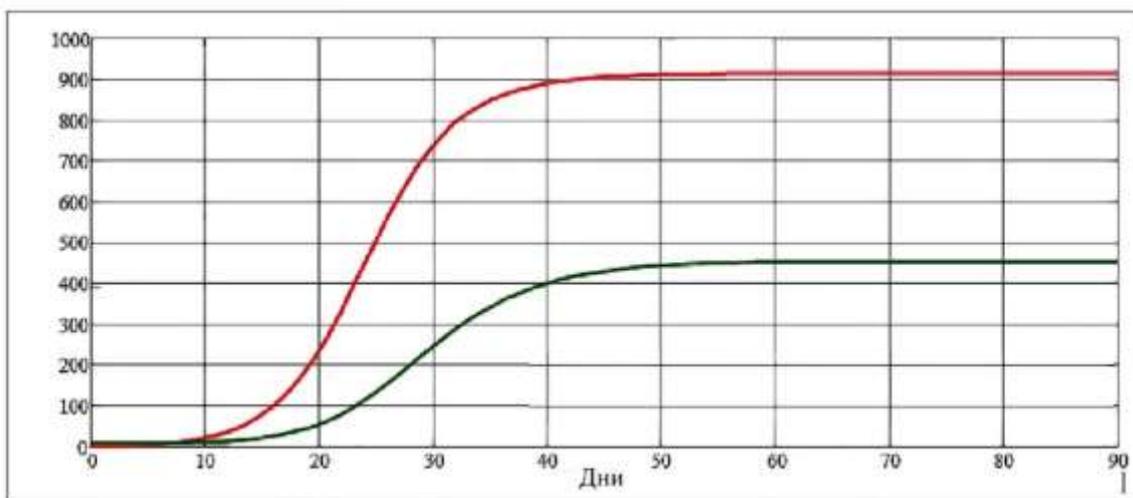


Рис.2- Изменение численности популяции со временем (90 дней) при $E = 0.002$, $K = 1000$, $L = 200$, $r = 0.03$, $s = 0.04$, $q = 0.001$

На рис. 2 показано, что при уменьшении промысла, все равно численность популяции рыб в заповедной зоне увеличивается. Но и в заповедной и свободной зоне численность рыб стремится к какому-то постоянному значению.

Меняя промысловую смертность рыбной популяции - qE , производительность видов рыб K , L , скорости миграции σ_1 и σ_2 , скорости роста популяции рыб r и s в широком диапазоне можно строить самые различные вариации модели развития рыбных ресурсов, соответственно, изменяются и графики, что показано на рис. 3 и рис. 4.

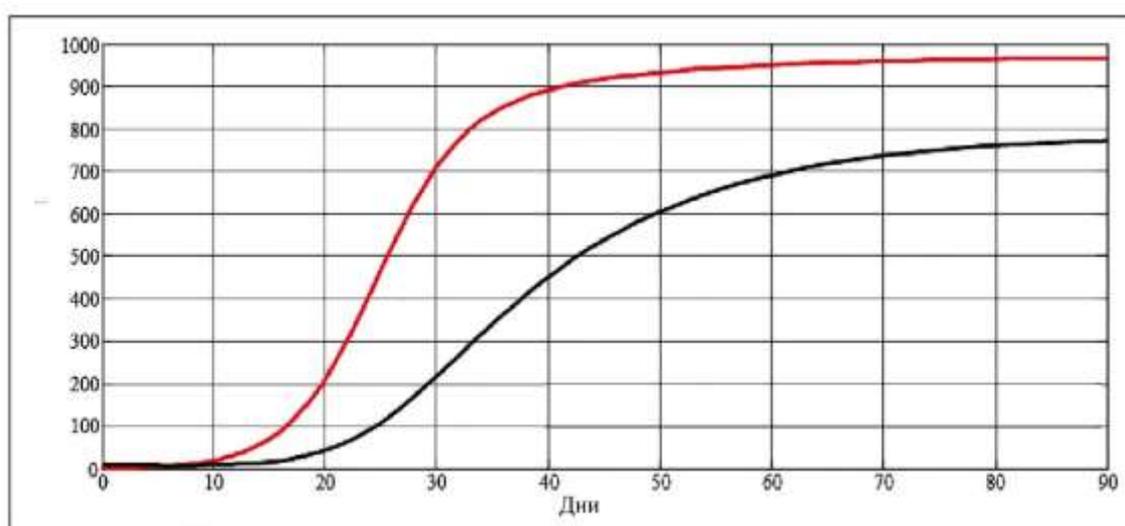


Рис.3. Изменение численности популяции рыб со временем (90 дней) при $E = 0.002$, $K = 1000$, $L = 200$, $r = 0.299$, $s = 0.004$, $q = 0.00001$

На рис.3 численность популяций тоже возрастает.

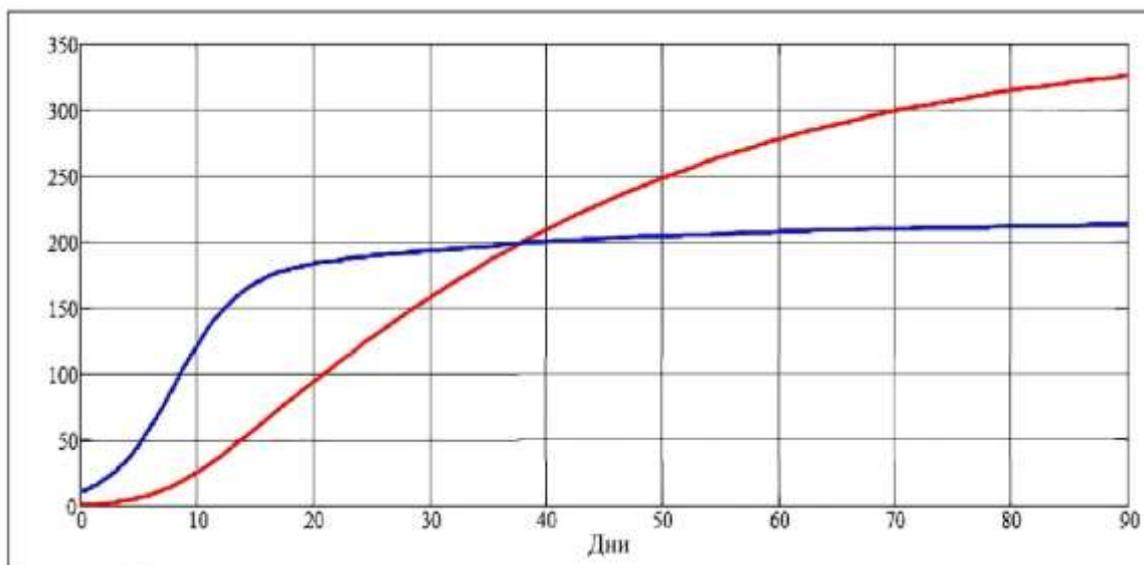


Рис. 4. Изменение популяции рыб со временем (90 дней) при $E = 0.002$, $K = 1000$, $L = 200$, $r = 0.03$, $s = 0.4$, $q = 0.00001$

На рисунке 4 численность биомассы в заповедной зоне в начале не догоняет численности популяции рыб в свободной зоне, затем они достигают равных значений, примерно на 37-38 день, затем численность популяций в заповедной зоне превышает численность популяции в свободной зоне.

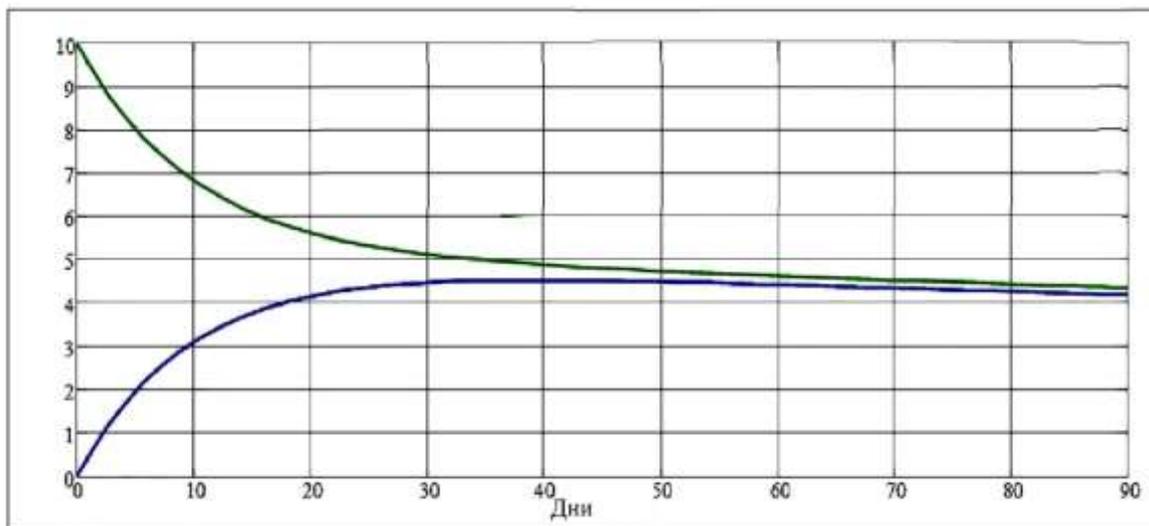


Рис.5. Изменение численности популяции со временем (90 дней) при $E = 4$, $K = 1000$, $L = 200$, $r = 0.03$, $s = 0.004$, $q = 0.1$

На рисунке 5 довольно интересная ситуация с ростом численности рыб. Хотя происходит рост популяции в заповедной зоне (нижняя кривая) и уменьшения поголовья рыб в свободной зоне (верхняя кривая) достигается некоторое равновесное состояние. Когда поголовье рыб и в свободной зоне, и в промышленной примерно сравнивается.

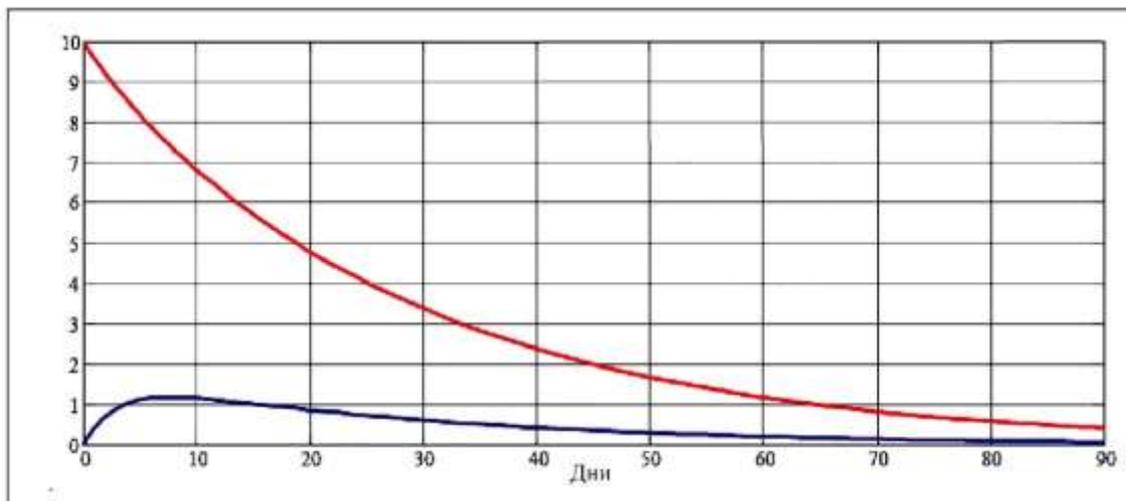


Рис. 6. Изменение численности популяции со временем (90 дней) при $E = 2.8$, $K = 1000$, $L = 200$, $r = 0.3$, $s = 0.006$, $q = 0.2$

На рис. 6 смоделирована другая ситуация, когда рост в заповедной зоне (нижний график) уменьшается практически до нуля. Но и верхний (зона свободного рыболовства) тоже резко стремиться к нулю. Это связано с резким возрастанием величины qE и небольшим ростом в заповедной зоне.

На графиках видно, что максимальное производство рыбной популяции зависит от темпов роста собственных возможностей популяции в нерезервированной и резервированной территории и скорости вылова рыбы или от промысловой смертности.

Таким образом, модель управления популяций рыб может быть выведена из минимального и максимального объема производства в заповедной и не на зарезервированной, т.е. свободной территории.

4. Заключение

В данной статье были проанализированы две экосистемы: одна свободная зона для рыболовства и другая - заповедная зона на основе выведенной математической модели. Была сформулирована и доказана лемма о позитивности переменных входящих в уравнения моделей (1) и (2).

Затем было высказано и приведены доказательства предположения о наличии равновесных состояний в предложенной модели. Мы выявили существование равновесия - глобально асимптотически устойчивого и неустойчивого. И проведено исследование динамических равновесных состояний в предложенной модели, через доказательство леммы 2и теоремы 1., при этом используя критерий Рута – Гурвица и критерии Ляпунова.

При этом ставилась задача исследования устойчивости равновесных состояний.

На основании полученных данных, результаты исследований были проиллюстрированы числовыми результатами. На основе графиков были выявлено существование равновесия - глобально асимптотически устойчивого и неустойчивого. Важно отметить, что сохранение экосистемы является ключевым фактором для поддержания рыболовства на долгосрочной основе. Заповедные зоны являются важным инструментом для сохранения экосистемы и обеспечения устойчивого развития рыболовства. Однако, необходимо учитывать экономические факторы, связанные с выловом рыбы, чтобы разработать правильную политику управления рыболовством и обеспечить устойчивое развитие рыболовства в будущем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. L. Berezansky, L. Idels, M. Kipnis, Mathematical model of marine protected areas, IMA J. Appl. Math. 76 (2011) 312-325.
2. G. Birkhoff, G.S. Rota, Ordinary Differential Equations, Ginn, Boston, 1882.

3. M.H.A. Biswas, T. Rahman, N. Haque, Modeling the Potential Impacts of Global Climate Change in Bangladesh: An Optimal Control Approach, *J. Fundam. Appl. Sci.* 8 (2016) 1-19.
4. M.H.A. Biswas, On the Evolution of AIDS/HIV Treatment: An Optimal Control Approach, *Curr. HIV Res.* 12(2014) 1-12.
5. M.H.A. Biswas, M.M. Haque, *Nonlinear Dynamical Systems in Modeling and Control of Infectious Diseases*, Springer Pro. Math. & Stat. Vol.164 (2016).
6. M.H.A. Biswas, L.T. Paiva, M.D.R. de Pinho, A SEIR model for control of infectious diseases with constraints, *Math. Bios. and Engi.* 11(2014) 761-784.
7. C.W. Clark, *Mathematical Bioeconomics: The Optimal Management of Renewable Resources*, Wiley, New York, 1976.
8. T. Das, R.N. Mukherjee, K.S. Chaudhuri, Bioeconomic harvesting of a prey-predator fishery, *J. Bio. Dyn.* 3 (2009) 447-462.
9. M. De Lara, L. Doyen, *Sustainable Management of Natural Resources: Mathematical Models and Methods*, Springer, Verlag Berlin, 2008.
10. B. Dubey, P. Chandra, P. Sinha, A Model for Fishery Resource with Reserve Area, *Nonl. Ana.: Real Worldl Appl.* 4 (2003) 625-637.344 Haider Ali Biswas et al. / *Procedia Engineering* 194 (2017) 337 – 344
11. Y. Kitabatake, A Dynamic Predator-Prey Model for Fishery Resources: a Case of Lake Kasumigaura, *Environ, Plan. A.* 14 (1982) 225-235.
12. J. La Salle, S. Lefschetz, *Stability by Liapunov's Direct Method with Applications*, Academic Press, New York, London, 1961.
13. A. Leung, A. Wang, Analysis of models for commercial fishing: mathematical and economical aspects, *Econometrica.* 44 (1976) 295-303.
14. M. Mesterton-Gibbons, On the Optimal Policy for Combined Harvesting of Predator Prey, *Nat. Res. Model.* 3 (1996) 235-244.
15. M.K. Mondal, M.H.A. Biswas, Modeling the Transmission Dynamics of the Nipah Virus Infection, *Proc. of 1st Int. Con. on Math. and Its Appl., Mathematics Discipline, Khulna University, Khulna, Bangladesh, 23rd December 2015*, pp. 22-26.
16. J.D. Murray, *Mathematical Biology: Biomathematics*, Second Edition, Springer, New York, 1989.
17. R.M. Neilan, S. Lenhart, An Introduction to Optimal Control with an Application in Disease Modeling, *DIMACS Series in Disc. Math.* 75 (2010) 67-81.
18. X. Song, L. Chen, Optimal Harvesting and Stability for a Two-species Competitive System with Stage Structure, *Math. Biosci.* 170 (2001) 173-186.
19. X. Zhang, L. Chen, A.U. Neumann, The Stage Structured Predator-prey Model and Optimal Harvesting Policy, *Math. Biosci.* 168 (2000) 201-210.

MATHEMATICAL MODELING OF SUSTAINABLE MANAGEMENT OF FISHERY RESOURCES

¹Ampilogov Vladimir Aleks, Associate Professor, Department of Applied Mathematics and Information Technologies

¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kaliningrad State Technical University", Kaliningrad, Russia,
e-mail: vladimir.ampilogov@klgtu.ru

The paper studies a nonlinear mathematical model of fisheries management to understand how the amount of fish resources in a certain aquatic environment change depending on the productivity of fish growth, mortality and fishing. The model consists of two zones - a fishing zone, i.e. free fishing, and a reserved (reserved, re-lake) zone where fishing is prohibited. The paper further analyzes the mathematical model and defines the equilibrium points: biological and bionomic, and studies the dynamics of these points, deriving the conditions of stability and instability of the system. The behavior of this dynamic model of marine fisheries management is illustrated by numerical simulations to confirm the analytical results presented.

ПРОБЛЕМЫ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ В РЫБНОЙ ОТРАСЛИ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

¹Долина Валентина Михайловна, канд. пед. наук, доцент кафедры промышленного рыболовства

¹Калининградский государственный технический университет,
Калининград, Россия, e-mail: valentina.dolina@klgtu.ru

Цель данной статьи – проанализировать современное состояние организации Северного морского пути для перевозки рыбы, выявив проблемы и рассмотреть направления их решения. Проведённый анализ показал, что главным фактором, сдерживающим развитие морских перевозок, является отсутствие единой организационной системы перевозок из удалённых районов Дальнего Востока в европейскую часть России, а также неразвитая береговая инфраструктура, недостаточное количество судов-перевозчиков. Подчёркивается рациональность использования для морских перевозок рыбы и рыбной продукции современных рефрижераторных контейнеров.

Арктика является важнейшим стратегическим регионом России, освоение которого включает в себя развитие Северного морского пути (СМП) как национальной транспортной артерии. Российская Арктика включает часть Северного Ледовитого океана и его окрестности, и обладает своими экосистемами и определённым биоразнообразием. Помимо нефти и газа, добываемых в шельфовой зоне, немаловажную роль в этом регионе играют и биологические ресурсы, получаемые рыболовством и добычей нерыбных объектов промысла, а также их переработка и транспортировка. В целом, эта деятельность имеет огромное экономическое значение для столь удалённой территории России, так как, во-первых, способствует развитию непосредственно самих арктических регионов, во-вторых, играет активную жизнеобеспечивающую роль для местного населения.

Экспедиция О.Ю.Шмидта в 1932 году первой в истории прошла северными морями из Архангельска до Берингова пролива, положив начало освоению Северного морского пути. Таким образом, Россия в 2022 году отметила 90-летие СМП. В настоящее время СМП называют северным морским коридором между двумя океанами: Атлантическим и Тихим, протяжённость которого 5770 морских миль. Этот морской путь является наиболее коротким между российскими портами европейской и дальневосточной частями нашей страны и проходит через Чукотское, Восточно - Сибирское, море Лаптевых, Карское и Баренцево моря. На маршруте имеется несколько портовых городов, среди которых наиболее значимые Сабетта, Дудинка, Хатанга, Тикси, Певек. На рисунке 1 Северный морской путь указан схематично красной линией. В последние годы российское правительство немало делает по формированию полноценной системы управления важнейшей северным морским коридором.

Согласно Федеральному закону от 31.07.1998 № 155-ФЗ «О внутренних морских водах, территориальном море и прилежащей зоне Российской Федерации», Северный морской путь - это «исторически сложившаяся национальная единая транспортная коммуникация Российской Федерации в Арктике» [1]. Позже данный закон был доработан, после чего был принят Федеральный закон от 5 декабря 2022 г. N 510-ФЗ "О внесении изменений в Федеральный закон "О внутренних морских водах, территориальном море и прилежащей зоне Российской Федерации" [2], при этом дополнения не коснулись определения СМП

Севморпуть в навигационном отношении представляет собой одну из самых сложных и опасных морских транспортных артерий, которая отличается значительной протяженностью, множеством мелководных участков, находящихся вдали от берега. К тому же гидрографический рельеф дна многих районов пока изучен слабо. Усугубляют обстановку тяжёлые климатические условия и длительный ледовый период. По СМП проходят только суда ледовых классов.

Для рыбной отрасли СМП открывает новый перспективный путь доставки рыбы и морепродуктов.

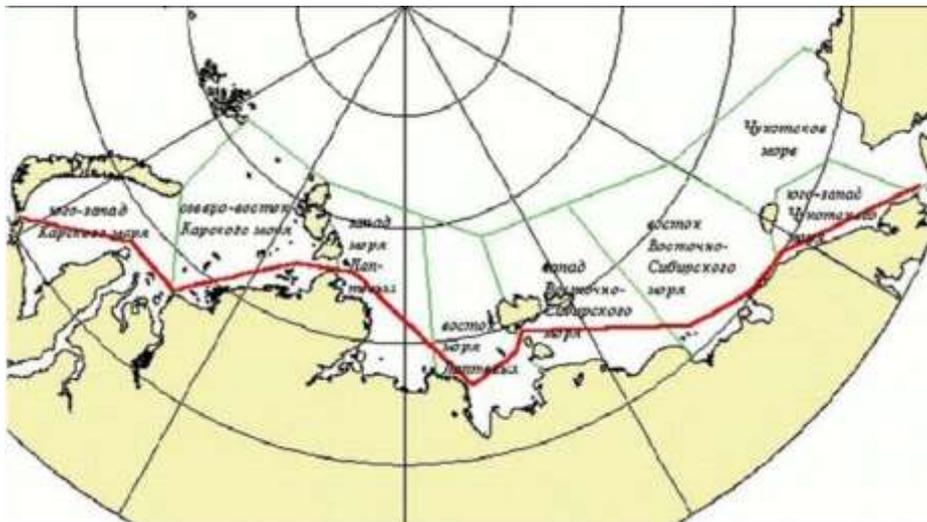


Рисунок 1 – Северный морской путь

В 2018 году президент РФ Путин В.В. поручил правительству и госкорпорации "Росатом" разработать перспективный план организации регулярных транзитных грузовых перевозок по СМП, начиная с 2022 года, в результате чего был определён круг проблемных вопросов, сдерживающих расширение практики использования Севморпути в качестве транспортного коридора. [4] По мнению разработчиков, триггером в решении существующих проблем является консолидация всех направлений деятельности: проведение научных исследований арктического региона, строительство и эксплуатация современных судов-перевозчиков, совершенствование проводок транспортных судов в зимний ледовый период, организация планомерной загрузки морских рейсов, строительство новой и улучшение существующей инфраструктуры вдоль Севморпути.

В водах Северного Ледовитого океана вылавливается около 20% всех рыбных ресурсов страны. Основным промысел арктических вод России составляют: сельдь, камбала, скумбрия, палтус, треска, пикша, путассу, краб, креветка, общий объём вылова которых составляет 700 тыс. тонн в год. Изменение климата усиливает миграцию рыбы на север выше 70° с.ш., при этом квоты по добыче рыбы и морепродуктов год от года увеличиваются. На сегодняшний день по Северному морскому пути сможет доставляться около 100 тыс. тонн рыбной продукции в год, и это седьмая часть рыбопродукции, которая перевозится с Дальнего Востока в западном направлении всеми видами транспорта. [3]

Для решения поставленных задач в области добычи биоресурсов могут быть весьма полезны результаты научных исследований ФАО, куда Россия вступила в апреле 2006 года. Став членом ФАО, наша страна получила возможность доступа к научной информации и опыта ФАО для развития российской рыбной отрасли, а также её интеграции в мировую систему рыбного хозяйства и торговли. По классификации ФАО, российская Арктика и трасса Севморпути затрагивают три основных рыбопромысловых зоны: Баренцево, Белое и Карское моря, зонами исследования морских ресурсов: море Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское моря [4].

3 октября 2018 года на встрече в городе Илуллиссате (Гренландия) пять приарктических государств договорились начать коммерческое рыболовство в арктическом районе после того, как будет собрано достаточной научной информации об экосистеме Арктического региона и будут установлены необходимые регулирующие механизмы рыболовства, в связи с чем было принято соответствующее соглашение, которое подписано и другими заинтересованными государствами: США, Канадой, Норвегией, Данией, Исландией, Японией, Китаем, Республикой Корея, Россией и Евросоюзом. Подписание данного документа стало важным шагом к устойчивому ведению промысла в центральной части Северного Ледовитого океана. В основу соглашения положен научно обоснованный осторожный подход к рыболовству путём запрета ННН-рыболовства в центральной части Северного Ледовитого океана. 25 июня 2021 года вступило в силу Соглашение о предотвращении нерегулируемого рыболовства в открытом море в центральной части Северного Ледовитого океана.

На основе этого документа осуществляется совместная научная программы для сохранения экосистемы при ведении промышленного рыболовства, кроме того стороны могут принимать решения по созданию региональных рыбохозяйственных организаций и принятию иных договоренностей. [5]

Однако пока на регулярной основе изучается только ледовая обстановка по спутниковым наблюдениям. Глубокие океанологические, биологические, гидрологические исследования, изучение среды обитания водных биоресурсов сегодня проводятся лишь в небольших объёмах.

Севморпуть должен стать в будущем основным элементом единой Арктической транспортной системы, которая включала бы весь комплекс транспортных средств как морского, так и речного флота, полярной авиации, трубопроводов, железнодорожного и автомобильного транспорта, а также формирование и поддержание береговой инфраструктуры. Начиная с 2010 года, наметилась активизация деятельности в данном направлении: возросла интенсивность судоходства, увеличилась доля крупнотоннажных судов, расширилась сеть судоходных маршрутов и расширилась площадь акватории, на которой используется режим круглогодичной навигации

В распоряжении Правительства РФ от 1августа 2022г. № 2115-р содержится перспективный план развития Северного морского пути. Несмотря на все сложности, в настоящее время идёт активное развитие ледокольного флота, постепенно совершенствуется ледовое сопровождение рефрижераторов-контейнеровозов, транспортирующих контейнеры с рыбой и морепродуктами, что способствует развитию круглогодичной навигации СМП. [6]

Дальнейшее развитие Северного морского пути предусматривает изменение состава и структуры арктического транспортного флота: планируется расширение использования нефтяных танкеров, танкеров для перевозки сжиженного природного газа (СПГ) и контейнеровозов. По техническим параметрам танкеры СПГ, эксплуатируемые на Северном морском пути, соответствуют уровню мирового флота, но в то же время по своим габаритам они значительно меньше мировых, так как имеют ограничение по глубине. На мелководных участках СМП осадка судов составляет всего 9,5 м, что для используемых маршрутов является предельной.

В стратегический проект развития Севморпути вопрос модернизация и расширение магистральной инфраструктуры входит как один из важнейших, сопутствующих дальнейшему развитию российской Арктики. Плохая инфраструктура и слабое её развития вдоль трассы СМП в настоящее время являются сдерживающим фактором в создании новых арктических транспортных маршрутов. Острая необходимость построения береговой инфраструктуры для Севморпути возникает ещё и потому, что в отдельных местах до сих пор отсутствуют даже железные дороги. Создание опорных зон развития может стать основой для выполнения поставленных задач по развитию СМП. В соответствии с новой редакцией государственной программы «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации», опорные зоны представляют собой комплексные проекты социально-экономического развития территориального и отраслевого направления, а также механизмы реализации инвестиционных проектов, основанных как на государственном, так и на частном капитале.

Арктике необходимы специальные терминальные площадки с мощным энергоснабжением, подъездные пути к ним, вместительные холодильники для хранения рыбы и других скоропортящихся продуктов по типу корейских хабов в Пусане, где морозильные ёмкости могут принять до 5 млн т рыбы, то есть больше, чем добывают все российские рыбаки за год. Стоимость таких терминалов порядка 1млрд рублей каждая, поэтому очень важно, чтобы российская рыбная отрасль сама строила фитинговые платформы, а также сама производила и рефконтейнеры, которые пока закупаются в основном в Китае в статусе б/у [7].

Для решения данных вопросов, а также на совершенствование ледовой проводки судов и их загрузки в обоих направлениях, то есть для создания планомерного грузопотока, необходимо увеличение субсидий. Инвестиции позволят сделать поставки рыбы с Дальнего Востока в европейскую часть страны по СМП регулярными и экономически выгодными. В Росрыболовстве оценивают ежегодный грузооборот рыбной продукции через российские порты к 2030 году в объёме не менее 3 млн т. Основной прирост объёмов рыбных грузов (до 900 тыс. т) планируется с терминалов Дальнего Востока. Для обеспечения таких объёмов потребуется дополнительный ввод в эксплуатацию холодильных мощностей единовременного хранения не менее 150 тыс. т. Суммарный объём инвестиций для этого должен составить до 15 млрд руб.

Ещё одним важнейшим условием внедрения развёрнутого плана развития СМП в рыбную отрасль является достаточное количество плавбаз на добывающем флоте. Остаётся надеяться, что механизм инвестиционных квот, внедренный Росрыболовством, обеспечит выпуск современных крупнотоннажных судов-процессоров в ближайшее десятилетие. Это сделает процесс доставки рыбы по Севморпути более дешёвым по стоимости, но высокотехнологичным, так как во время транспортировки может осуществляться процесс переработки рыбного и нерыбного сырья.

Однако пока обновление рыболовного флота России происходит медленно. В сентябре 2020 года введён в строй головной траулер-процессор проекта КМТ01 «Баренцево море». Этот тип кормовых морозильных траулеров предназначен для тралового рыбного промысла и частичной или полной переработки выловленной рыбы: обезглавливание, потрошение, производство филе, икры и печени трески, рыбной муки и рыбьего жира на борту судна сразу после вылова [4]. Всего планируется построить 4 судна данного проекта. В настоящее время уже заключено 25 договоров на строительство рыбопромысловых судов для Северного рыбохозяйственного бассейна, объёмом инвестиций около 10 млрд рублей. Рыболовными базами заключено 11 договоров на строительство новых рыбоперерабатывающих заводов в Арктической зоне России: в Архангельской, Мурманской областях и в Республике Карелия.

В России работает единственное в мире транспортное судно с ядерной энергетической установкой «Севморпуть» (рис. 2). 7-го июля 2023 года «Севморпуть» прибыл в Приморье, выполнив первый субсидируемый каботажный рейс, при этом на переход из Санкт-Петербурга в бухту Находка он затратил 23 дня. Здесь уместно заметить, что рыбные порты Мурманска и Архангельска не могут принять атомный контейнеровоз, поскольку ему не хватает глубины, а также имеется проблема с причальными стенками. Контейнеровоз может войти только в торговый порт Мурманска, где он выгружался в прошлые годы, а в Астрахани выгрузка осуществлялась на рейде на более мелкие суда. [8]

Развитие ледокольного и танкерного флота в рыбопромысловых районах поможет упорядочить организацию контейнерных перевозок морским транспортом по СМП.

Несмотря на то, что сегодня уже ведётся работа по расширению практики использования СМП для перевозки рыбной продукции с Дальнего Востока в центральные районы РФ: решаются сложные вопросы организации загрузки, строительства опорных портов-хабов Северного морского коридора в Петропавловске-Камчатском и других городах севера России, до сих пор для данного района пока не существует единого механизма управления Арктическим рыболовством.



Рисунок 2- Атомный контейнеровоз "Севморпуть" в порту Владивосток

Ожидается, что освоение Арктики в среднесрочной и долгосрочной перспективе приведёт к повышению коммерческого интереса к этой деятельности, а это приведёт к увеличению объёмов рыболовства в центральной части Северного Ледовитого океана.

По мнению Росрыболовства, экспериментальные рейсы лихтеровоза "Севморпуть" в 2019 и 2020 годах не были экономически неэффективными из-за их недостаточной загрузки в обоих направлениях: как в западном, так и в восточном. Причина этого кроется, в первую очередь, в плохой организации.

Однако и дорогостоящий специализированный подвижной ж/д состав остаётся не слишком востребованным, видимо потому, что его тариф дороже в два с половиной раза по сравнению с обычным.

По подсчётам Росрыболовства, стоимость перевозки рыбы 40-футовыми контейнерами по железной дороге из Владивостока в Москву составляет примерно 18 руб. за 1кг, в авторефрижераторах – 19 руб., а по Северному морскому пути каждый килограмм рыбной продукции обходится в 20 руб.

Если сравнивать скорость передвижения по железной дороге и по Северному морскому пути, то и тут морской транспорт несколько проигрывает. По СМП суда идут порядка 3-х недель, а по железной дороге 10-15 суток. Но если сравнить перевозку рыбы по Севморпути и через Суэцкий канал, где дорога занимает от 32 до 37 дней и зависит от очередности в самом канале, а также наличия пиратов в Красном море и других международных торговых проволочек, то по СМП перевозить рыбу значительно быстрее. В этом смысле Севморпуть выигрывает, поскольку проходит главным образом в морях исключительной экономической зоны России - без очередей и без рисков пиратских нападений.

У Севморпути есть и другие плюсы: рыбу морским путём перевозят исключительно в рефрижераторных контейнерах, оборудованных датчиками температуры, обеспечивающими постоянную температуру на всём пути следования, как на транспортных судах, так и на плавбазах. Поскольку рыба - товар достаточно нежный, самое нежелательное для её транспортировки – это перепад температуры, поскольку сырьё при этом катастрофически теряет качество. При доставке через Северный морской путь этой проблемы нет. Возможность поддержания постоянной температуры заморозки обеспечивает высокое качество рыбы. В транспортных контейнерах рыба с Дальнего Востока прибывает в центральную часть страны без перевалок, а значит, сохраняется не только качество, но и снижается конечная цена рыбной продукции за счёт сокращения транспортно-логистических издержек. Кроме того, при транспортировке на плавбазах эффективно используется время в дороге, когда прямо на борту осуществляется частичная или глубокая переработка рыбного сырья для получения филе, фарша, консервов или пресервов. Поэтому перевозка рыбы морским путём имеет свои экономические выгоды – большие, чем перевозка по железной дороге, примерно на 20–30% [9].

Активное использование Севморпути позволило бы разгрузить порт в Петропавловск-Камчатском, особенно в периоды пугины, когда скапливаются большие объёмы грузов с рыбой, которые невозможно все сразу перевезти по железной дороге.

Ранее, в течение долгих прошлых лет, рыбная отрасль постоянно высказывала нарекания в адрес железной дороги, занимающейся перевозкой рыбопродукции, которая не обеспечивала перевозку всего её объёма при сохранении высокого качества продукции, особенно в пиковые периоды. Но в последние 3–4 года ситуация изменилась, поскольку российские железные дороги ввели 5 новых ежедневных, которые сократили срок доставки рыбопродукции до Москвы почти в два раза.

При эксплуатации СМП имеются свои особенности, создающие дополнительные проблемы: перевозить продукцию морским путём можно лишь в небольшой период времени, когда условия навигации на СМП максимально благоприятны. Получается, что Северный морской путь – это непростой вариант и недешёвый вариант перевозки. Но если сравнивать этот способ транспортировки с железнодорожным или автомобильным, то именно морские перевозки позволяют сохранять качество перевозимой рыбной продукции. И всё же несмотря на ощутимые выгоды, организация транспортных перевозок рыбной продукции по Северному Ледовитому океану пока не удовлетворяет современным требованиям.

Поэтому основные потоки рыбной продукции по-прежнему проходят по суше. Но и здесь возникают свои проблемы: при доставке по железной дороге рыба перегружается минимум 2-3 раза, при этом возникают потери температурного режима и неизбежное повреждение и снижение качества сырья. ОАО «РЖД» не планирует обновлять рынок рефрижераторных вагонов, но любой отказ в работе рефрижераторной системы грозит в каждом случае разморозкой рыбного сырья, а, значит, его потерей [9].

В ближайшие планируется списать порядка 650 рефрижераторных вагонов, в связи с окончанием срока их эксплуатации. Эти вагоны способны поддерживать необходимую для перевозки рыбы температуру в минус 18 градусов и ниже, как предписывает новый единый технический регламент ЕАЭС. Вагоны-рефрижераторы будут заменяться на неэлектрифицированных участках во мно-

гих регионах страны вагонами-термосами, которые в отличие от вагонов-рефрижераторов не имеют рефрижераторной системы, и сохранение температуры в пути следования у них обеспечивается только за счёт теплоизоляции грузового помещения. Таких вагонов достаточно, но сохранение качества мороженой рыбы при перевозке на большие расстояния они гарантировать не могут.

В последнее время руководство рыбной отрасли увеличивает автоперевозки, которые развиваются благодаря расширению сети дорог. В Приморье уже начала работу компания, которая перевозит продукцию из Владивостока в центр России и на запад страны автотранспортом. Представители грузоперевозчиков утверждают, что доставка по железной дороге и автотранспортом сопоставима по цене.

Северный морской путь – это в настоящее время непростой и недешевый способ перевозки рыбы и рыбной продукции, при этом он ещё и нерегулярный. Именно поэтому СМП не может считаться пока приоритетным вариантом для рыбной отрасли. С другой стороны, и власти, и перевозчики сходятся во мнении, что перевозка рыбы по СМП в целом оптимальный вариант с точки зрения сохранения качества перевозимого товара и ценообразования. Однако решить вопрос о налаживании постоянных поставок рыбы Севморпутем, по мнению руководителей рыбной отрасли, можно будет только тогда, когда движение по нему станет системным, а трафик – регулярным. К 2024 году объём перевозки груза по СМП должен возрасти до 80 млн тонн, но и это для Дальнего Востока цифры небольшие. [10]

Ещё один весьма важный для выполнения задуманного плана развития СМП вопрос – это кадры: в современных условиях без должного количества хорошо подготовленных специалистов для работы на высокотехнологичном оборудовании решать поставленные задачи невозможно. Этот вопрос потребует тщательной проработки и дополнительных инвестиций.

Сегодня Арктика сталкивается и другими проблемами, которые касаются климатического и природоохранного направления. Бесконтрольное вмешательство человека в происходящие в регионе естественные процессы может иметь крайне негативные последствия для всей экосистемы арктического региона, а ведь это ключевой вопрос освоения Арктики.

Можно резюмировать, что для осуществления плана развития СМП необходимо создание государственного Арктического пароходства, которое будет иметь построенные на российских судостроительных заводах морские суда арктического класса и рефрижераторные контейнеры. Только пароходство сможет наладить Единую систему перевозки грузов по трассе СМП. Это пароходство может быть создано на базе Мурманского пароходства, которое изначально было создано для обеспечения перевозок грузов в Арктике.

По мнению руководства рыбной отрасли, при условии создания единой системы морских перевозок с Дальнего Востока страна будет полностью обеспечена высококачественной и недорогой рыбной продукцией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон от 31.07.1998 г. № 155-ФЗ «О внутренних морских водах, территориальном море и прилегающей зоне Российской Федерации»
2. Федеральный закон от 5 декабря 2022г. N 510-ФЗ "О внесении изменений в Федеральный закон «О внутренних морских водах, территориальном море и прилегающей зоне Российской Федерации»
3. Перспективы развития перевозок рыбы и морепродуктов по Севморпути <https://777hawk.livejournal.com/2523936.html>
4. Путин поручил к 2022 году организовать грузоперевозки по Севморпути <https://radiosputnik.ria.ru/20211018/putin-1755087005.html>
5. Северный морской путь: настоящее и будущее. <https://cyberleninka.ru/article/n/severnoy-morskoy-put-nastoyashee-i-budushee>
6. Распоряжение Правительства РФ от 1 августа 2022г. N 2115-р Об утверждении плана развития Северного морского пути на период до 2035 г. <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/405010751/>
7. Влияние перевозок по Северному морскому пути на развитие рыбохозяйственного комплекса Российской Арктики. <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-perevozk-po-severnomu-morskomu-puti-na-razvitie-rybohozyaystvennogo-kompleksa-rossiyskoy-arktiki>
8. Севморпуть: состояние, проблемы, перспективы. https://www.fishnet.ru/news/novosti_otrasli/sevmorput-sostoyanie-problemy-perspektivy/

9. Почему рыбаки не отдают рыбу Северному морскому пути Подробнее на fishretail.ru: <https://fishretail.ru/news/pochemu-ribaki-ne-otdayut-ribu-severnomu-morskomu-puti-432149>

10. Путин рассказал, что в 2024 году по Севморпути пройдет до 80 миллионов тонн грузов <https://www.kp.ru/online/news/4424057/>

PROBLEMS OF THE NORTHERN SEA ROUTE IN THE FISHING INDUSTRY AT THE PRESENT STAGE

Valentina Dolina, Ph.D., assistant Professor of the Department of commercial fisheries

State Technical University, Kaliningrad, Russia, e-mail: valentina.dolina@klgtu.ru

The purpose of this article is to analyze the current state of the organization of the Northern Sea Route for the transportation of fish, identifying problems and considering ways to solve them. The analysis showed that the main factor hindering the development of maritime transport is the lack of a unified organizational system of transportation from remote areas of the Far East to the European part of Russia, as well as undeveloped coastal infrastructure, an insufficient number of carrier ships. The rationality of using modern refrigerated containers for sea transportation of fish and fish products is emphasized.

УДК 639.2.081.1; 550.34.01

СОЗДАНИЕ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ПРОГРАММНОГО ПРОДУКТА ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИНТЕТИЧЕСКИХ ШНУРОВ ОРУДИЙ ПРОМЫШЛЕННОГО РЫБОЛОВСТВА

¹Коновалова Карина Витальевна, аспирант;

²Недоступ Александр Алексеевич, доцент, канд. техн. наук;

³Ражев Алексей Олегович, вед. науч. сотрудник, канд. техн. наук

^{1,2,3}Калининградский государственный технический университет,

Калининград, Россия, e-mail: ¹karina.konovalova4382@mail.ru; ²nedostup@klgtu.ru;

³progacpp@live.ru

Рассматривается проблема создания и проведение функциональных испытаний экспериментального программного продукта для проектирования синтетических шнуров, применяемых при постройке орудий рыболовства. В работе применяется программа для ЭВМ «Проектирование синтетических шнуров орудий промышленного рыболовства» на основании которой, приводятся результаты моделирования изгиба, иллюстрирующие напряжение протекающее, в изделии с учетом изгибной жесткости.

Введение

В сфере промышленного рыболовства синтетические шнуры применяются в процессе оснастки небольших судов или постройке сетных полотен. Часто они оказываются незаменимыми во время проведения промышленных альпинистских работ, где они применяются в качестве элемента страховочного или аварийно-спасательного оборудования.

С позиции механики нитевидные изделия являются гибкими нитями и определяют одно из главных качеств орудий промышленного рыболовства - отсутствие постоянной формы [1].

Неоценимый вклад в расчет механики нити и становление промышленного рыболовства внесли: Фридман А.Л. [1], Герман, Б.И. [2], М.М. Розенштейн, [3], Стрекалова В.Н. [4], Недоступ А.А. и Ражев А.О. [5, 6], LeeW. Chun [7], Wienbeck, W. Moderhak [8].

Но не обращая внимания на многообразие представленных в литературе способов для расчета гибких нитей они, как правило, не связаны меж собой и применяются для решения конкретных задач – это связано с неполнотой изучения поперечной и изгибной жесткости (EJ) и с отсутствием данных для синтетических изделий.

На основании выше сказанного встал вопрос о разработке продукта, позволяющего прогнозировать свойства в динамике синтетических шнуров.

Постановка задачи

Для достижения поставленной цели авторами были определены основные физико-механические свойства синтетических шнуров, а также выявлена взаимосвязь между ними. На основании полученных математических зависимостей были созданы два блока линейных алгоритмов отвечающие за конструктивные (рис. 1.) и динамические (рис. 2.) изменения, протекающие в изделии, которые с помощью метода конечных элементов могут рассчитать, спрогнозировать свойства шнуров и визуализировать напряжение при изгибе.

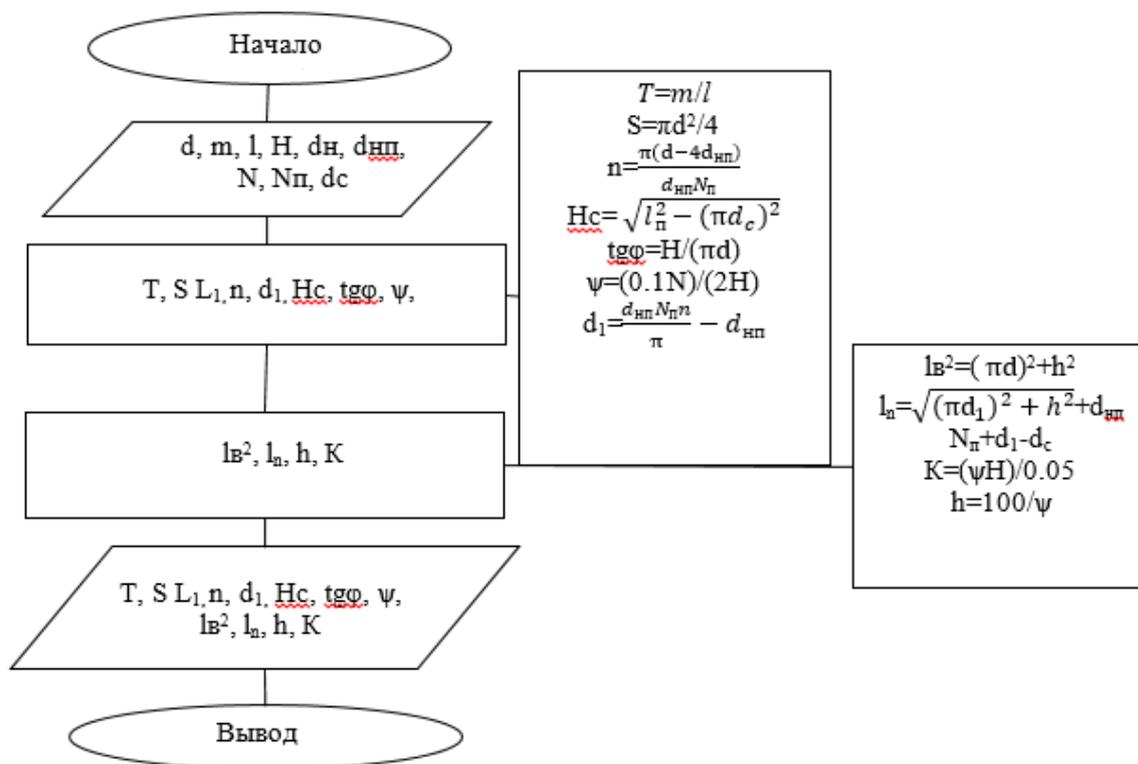


Рис. 1. Алгоритм для прогнозирования физико-механических свойств шнуров.

Для выявления участков потенциального разрушения и визуализации напряжения, протекающего в изделии был написан алгоритм, представленный на рис. 2.

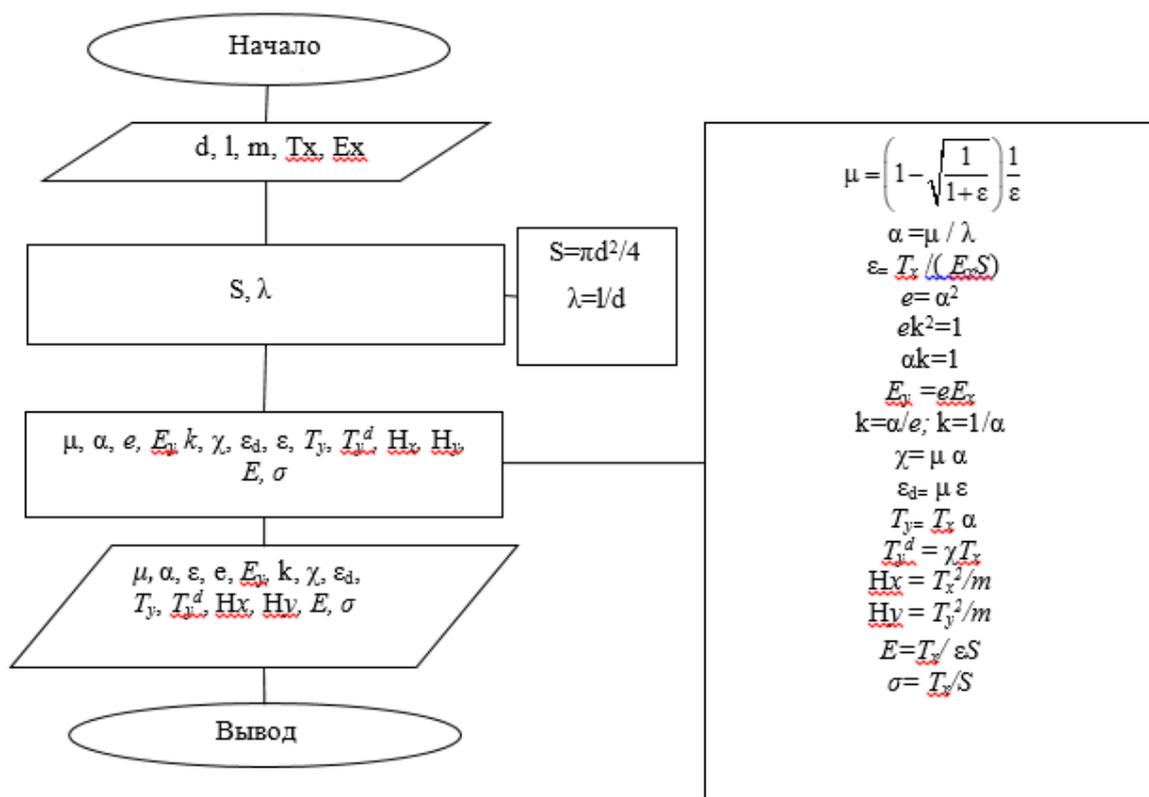


Рис. 2. Алгоритм для визуализации напряжения

На основе полученных математических зависимостей была создана программа для ЭВМ «Проектирование синтетических шнуров орудий промышленного рыболовства» (Свидетельство о регистрации программ для ЭВМ №2023662966 (24 мая 2023г.). Она позволяет после ввода исходных данных произвести прогнозирование нитевидных изделий.

Из алгоритмов, представленных на рис.1и 2. были выделены основные свойства для расчета шнуров – входные данные. Входные данные в программу вводятся пользователем через клавиатуру. Выходные данные отображаются на экране.

В таблицах 1. и 2. представлены входные выходные данные для программы.

Таблица 1

Входные данные

Наименование	Размерность	Начальное значение	Диапазон	Знаков после запятой	Шаг изменения значения
d – диаметр	мм	1	[1-30]	0,0	0.0
l – Длина	мм	150	[10-5000]	0,00	0.0
H – шаг плетения	мм	6	[2-100]	0	0
d _{нп} – диаметр нити пряди	мм	0,013	[0.009-2.5]	0,000	0.0
d _с – диаметр сердечника	мм	0	[0-29]	0,000	0.0
N – количество прядей	-	16	[8-64]	0	0
N _п – количество прядей на одном слое	-	8	[8-64]	0	0
D _ш – диаметр штыря	мм	2	[2-30]	0	0
m – Масса	г	0.08	[0.005-400]	0,00	0.0
T _x – приложенная сила растяжения	h	10	[10-500]	0,00	0.0
E _x – продольный модуль упругости	мпПа	100	[100-1000]	0,00	0.0
EJ – изгибная жесткость	10 ⁵ Нм ²	100	[1-15000]	0,00	0.00

Выходных данные

Наименование	Размерность	Знаков после запятой
λ – конструктивное удлинение,	-	0,00
μ – коэффициент Пуассона	-	0,0000
t - линейная плотность , текс	Текс	0,00
s - площадь сечения, мм ²	мм ²	0,00
α – безразмерное сужение	10 ⁻³	0,00
e – отношение модулей упругости	10 ⁻⁶	0,000
e_y – поперечный модуль упругости, мПа	Па	0,000
k – коэффициент пропорциональности	-	0,00
χ – безразмерная компенсационная сила	10 ⁻³	0,00
ε_d – относительная поперечная деформация, %	%	0,0
t_y – сила сжатия	Мн	0,00
t_y^d - компенсационная сила (противодействия в поперечном направлении)	Мн	0,00
h_y/h_y - производительность условных продольных/поперечных сил	н ² /Т	0,00
e- модуль Юнга	МПа	0,00
σ – напряжение	МПа	0,00
n - количество нитей в пряди	-	0
l_b - длина нити на витке, мм	мм	0,00
l_n - увеличение длины оплетки до момента ее обжатия нитей сердечника	мм	0,00
шаг витка оплетки при обжатии нитей сердечника, мм		
d_1 – диаметр нижнего слоя оплетки, мм	мм	0,00
h - ширина пряди , мм	мм	0,00
tg ϕ - угол плетения	°	0,00
ψ - плотность плетения	-	0,00
k_o – число прядей в оплетке	-	0
ε - относительная продольная деформация	%	0

В современных условиях все более актуальными становятся вопросы организации взаимодействия пользователя с техническими средствами – это взаимодействие обеспечивает интерфейс программы.

Пользовательский интерфейс – это все элементы программного продукта, способные оказать влияние на взаимодействие человека с программой. Интерфейс представляет собой совокупность средств и правил, обеспечивающих взаимодействие устройств, программ.

При запуске программы перед пользователем открывается основное рабочее пространство (рис. 3.), с таблицей Входных и Выходных данных со спектром силы натяжения и 3D моделью:

Вверху основного окна размещается меню вкладок:

1. Файл – загрузка и сохранение параметров;
2. Моделирование (рис. 4.) - процесс моделирование; таблица для изменения осей и перспективы; окно для ввода координат снятых с модели;
3. График (рис. 5.) – открывается окно с возможностью ввода функции;
4. Справка – сведения о программе.

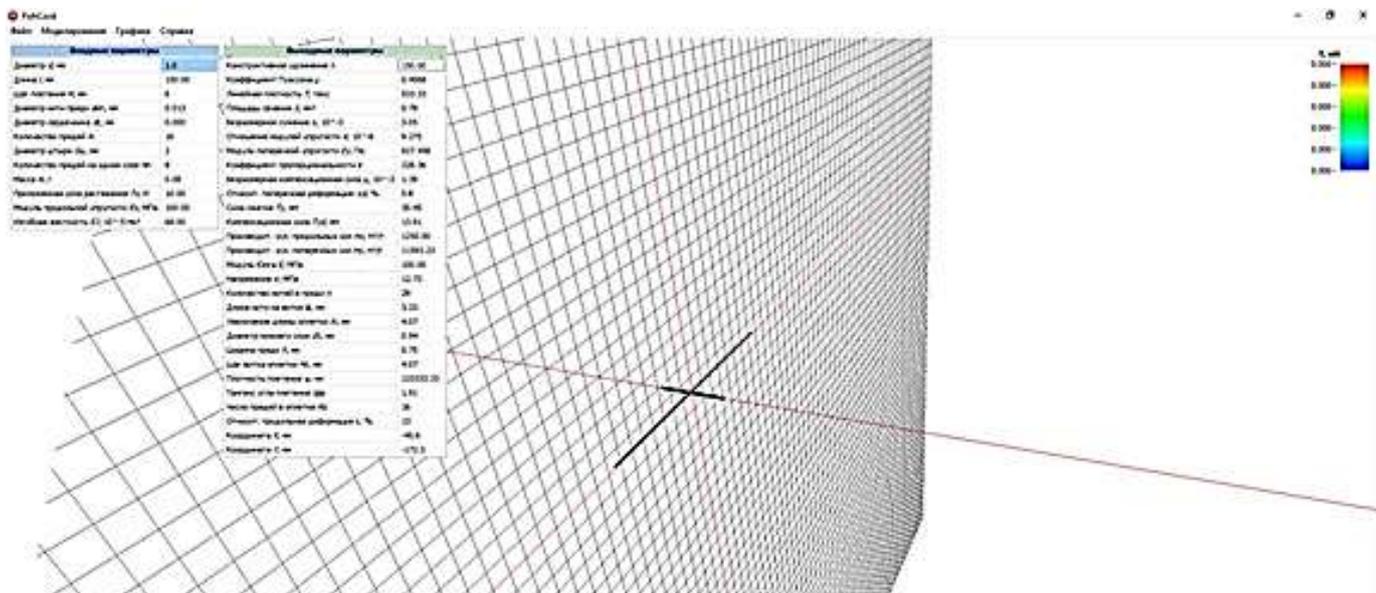


Рис. 3. Окно рабочего пространства

Окно «Моделирование»

Перед началом работы с блоком «Моделирование» необходимо ввести входные параметры модели. Запускать процесс моделирование можно с помощью вкладки «Моделирование» при нажатии на которую появляется кнопки «Старт», «Стоп» и «Настройки». При нажатии на кнопку «Настройки» перед пользователем на рабочем пространстве появляется панель, где можно контролировать положение камеры в плоскости и отображение осей координат.

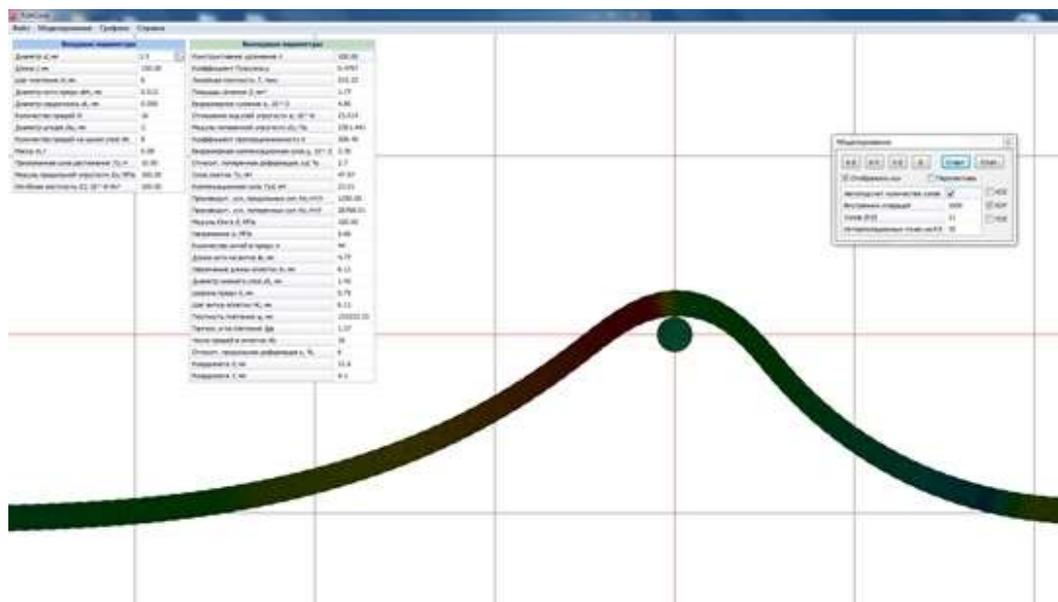


Рис. 4. Окно «Моделирование»

Окно «График»

При открытии вкладки «График» перед пользователем появляется окно, где представлены графики зависимости расчетных данных необходимые для выявления участка потенциального разрушения.

В разработанной программе представлены следующие графики зависимостей расчетных физико-механических свойств синтетических шнуров: $\epsilon=f(T_x)$; $\epsilon_d=f(T_x)$; $\mu=f(T_x)$; $\chi=f(\lambda)$ и $\alpha=f(\lambda)$; $E_y/E_x=f(\epsilon, \lambda)$; $E_y/E_x=f(T_y/T_x)$; $T_y/T_x=f(\epsilon, \lambda)$; $H_y/H_x=f(E_y/E_x)$

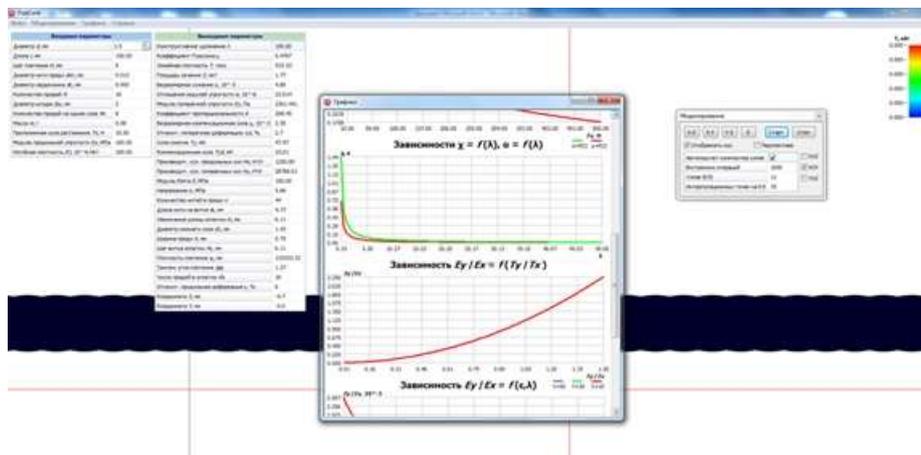


Рис. 5. Окно «График»

Для проверки работоспособности разработанного программного продукта было проведено сопоставление натуральных и численных результатов испытаний с различными образцами синтетических шнуров. При проведении экспериментов были сопоставлены силовые и геометрические характеристики.

Эксперименты были проведены на базе Калининградского государственного технического университета. На стенд были установлены штыри различного диаметра на них размещались исследуемые образцы и под воздействием сил тяжести образцы прогибались. Часть результаты полученных в ходе натуральных экспериментов представлены в таблице 3.

Таблица 3

Физико-механические и конструктивные свойства шнуров

№ п/п	Линейная плотность T текс (г/км)	Кол-во волокон n	Кол-во прядей N	Диаметр d мм	Шаг плетения H	Угол плетения	Максимальная нагрузка F_{max} кН	Максимальная деформация D_{max} Мм	Предел прочности R_{max} кН/мм ²	Относительное удлинение L_{max} %
ПА однопрядный										
1	1700	16	16	2	22	74	0,88	87,1	290,05	58,763
2	3520	16	16	3	20	65	1,6	114,56	229,45	76,37
3	6960	32	16	4	34	70	3,31	101,19	263,55	65,96
ПП однопрядный										
4	1690	16	16	2	22	74	0,73	96,87	239,84	64,44
5	3500	16	16	3	25	69	1,57	105,69	222,53	71,44
6	5200	48	16	4	25	63	2,14	120,6	160,98	80,4
ПэФ однопрядный										
7	1650	16	16	2	13	64	0,4	144,24	127,73	96,14
8	3200	32	16	3	22	67	0,81	152,83	115,06	101,42
9	5200	48	16	4	25	63	1,085	151,15	86,38	100,76
№ п/п	Номер из таблицы 1	Длина L М	Масса m г	Диаметр шкива D мм		b Н·м ²	B Н·м ²	EI Н·м ²		
ПА 2мм										
1	1	0,1	0,17	2		0,00052	0,00050	0,00103		
2	1	0,12	0,21	2		0,00031	0,00030	0,00060		
3	1	0,16	0,27	2		0,00028	0,00027	0,00055		
4	1	0,20	0,34	2		0,00054	0,00053	0,00107		
5	1	0,24	0,4	2		0,00091	0,00089	0,00179		
ПА 3мм										
6	2	0,1	0,35	2		0,00967	0,00929	0,01895		
7	2	0,12	0,43	2		0,00666	0,00644	0,01310		
8	2	0,16	0,57	2		0,00114	0,00111	0,00225		
9	2	0,20	0,7	2		0,00124	0,00121	0,00245		
10	2	0,24	0,86	2		0,00238	0,00232	0,00470		

7. Lee Woo Chun, Jihoon Lee, Moo-Youl Choe. Low-Carbon Fishing Gear Design Using Numerical Methods // First International Symposium on Fishing Vessel Energy Efficiency E-Fishing (Vigo, Spain, May 2010). URL: <https://www.researchgate.net/publication/268805144> (дата обращения:).

8. Herrmann, B., Wienbeck, H., Moderhak, W., Stepputtis, D., and Krag, L. 2013b. The influence of twine thickness, twine number and netting orientation on codend selectivity. *Fisheries Research*, 145: 22–36.

CREATION AND FUNCTIONAL TESTING OF A SOFTWARE PRODUCT FOR THE DESIGN OF SYNTHETIC CORDS FOR INDUSTRIAL FISHING GEAR

¹Konovalova Karina Vitalyevna, graduate student;

²Nedostup Aleksandr Alekseevich, associate professor, PhD in Technical Sciences;

³Razhev Aleksey Olegovich, PhD, Junior Researcher

^{1,2,3}Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,

e-mail: karina.konovalova4382@mail.ru; nedostup@klgtu.ru; progacpp@live.ru

The article deals with the problem of creating and conducting functional tests of an experimental software product for designing synthetic cords used in the construction of fishing gear. In the work the computer program "Designing synthetic cords for industrial fishing gear" is used on the basis of which, the results of bending simulation are given, illustrating the stresses flowing in the product with regard to bending stiffness.

УДК 639.2

МОДУЛЬ САПР ТРАЛОВ «МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗНОГЛУБИННОГО ТРАЛА (ЗАДАНЫ БЕЗРАЗМЕРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ)»

¹Недоступ Александр Алексеевич, доцент, канд. техн. наук, заведующий кафедрой промышленного рыболовства;

²Ражев Алексей Олегович, канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник

^{1,2}Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия, e-mail: nedostup@klgtu.ru

Система автоматизированного проектирования тралов (САПР тралов) является неотъемлемым инструментом при проектировании разноглубинных и донных тралов. Входящие в САПР тралов алгоритмы и математические модели адекватно воспроизводят действующие процессы. Имитационные модели САПР тралов обеспечивают понятные задачи при расчете и проектировании тралов, а также позволяют наглядно отображать выходные параметры и зависимости. Модуль САПР тралов «Моделирование разноглубинного трала», представленный в статье, может применяться при расчете таких параметров, как гидродинамическое сопротивление канатно-сетной части трала; горизонтальное и вертикальное раскрытия устья трала и др. Возможности модуля «Моделирование разноглубинного трала» не ограничиваются расчетом геометрических и силовых параметров разноглубинных тралов, также возможно подобрать необходимый ассортимент дели и оснастку для эффективного тралового промысла соответствующего косяка рыб. Модуль «Моделирование разноглубинного трала» оформлен в виде компьютерной программы «Моделирование характеристик разноглубинного трала (заданы безразмерные параметры)».

Система автоматизированного проектирования тралов (САПР тралов) является неотъемлемым инструментом при проектировании разноглубинных и донных тралов [1,2]. САПР тралов позволяют с достаточной точностью, которая обеспечивается адекватными математическими и имитационными моделями процессов тралового лова. Ошибка в расчете геометрических и силовых характеристик траловых конструкций, а также моделирование процессов буксировки тралов должна не превышать 10%. Это связано с общепринятыми техническими условиями при проектировании орудий промышленного рыболовства [3]. Разработка САПР тралов является сложным инженерным процессом, которая обеспечивается должным финансированием, а также привлечением к разработке компетентных специалистов из различных областей: промышленного рыболовства, ИТ-индустрии, материаловедения, гидродинамики и др. Сложности создания САПР тралов связаны с дополнительными входными параметрами, которые связаны с поведением гидробионтов, это: размеры скоплений, реакция на раздражители, скорость отдельной особи и всего скопления или косяка, плотность распределения и т.д. В настоящей статье приводится модуль «Моделирование разноглубинного трала», оформленный в виде компьютерной программы «Моделирование характеристик разноглубинного трала (заданы безразмерные параметры)», который является расчетным модулем геометрических и силовых характеристик разноглубинного трала при его буксировке.

Назначение компьютерной программы - моделирование процесса эксплуатации разноглубинного трала, а именно: расчет циклов кройки сетных пластин, массы канатных связей канатной части и сетных пластин сетной части, размеров сетных пластин, агрегатного сопротивления трала; на основании известных безразмерных характеристик оснастки моделирование гидродинамики ваеров, кабелей, гидродинамического щитка, траловых досок, раскрытия устья трала; сопоставление агрегатного сопротивления трала с располагаемой тягой траулера. Программное обеспечение для моделирования процесса эксплуатации разноглубинных тралов включает в себя их расчет и проектирование.

Компьютерная программа разработана в среде визуального проектирования программного обеспечения Embarcadero RAD Studio на языке программирования C++.

На рис. 1 изображено окно «Канатная часть - верх/низ» компьютерной программы «Моделирование характеристик разноглубинного трала (заданы безразмерные параметры)».

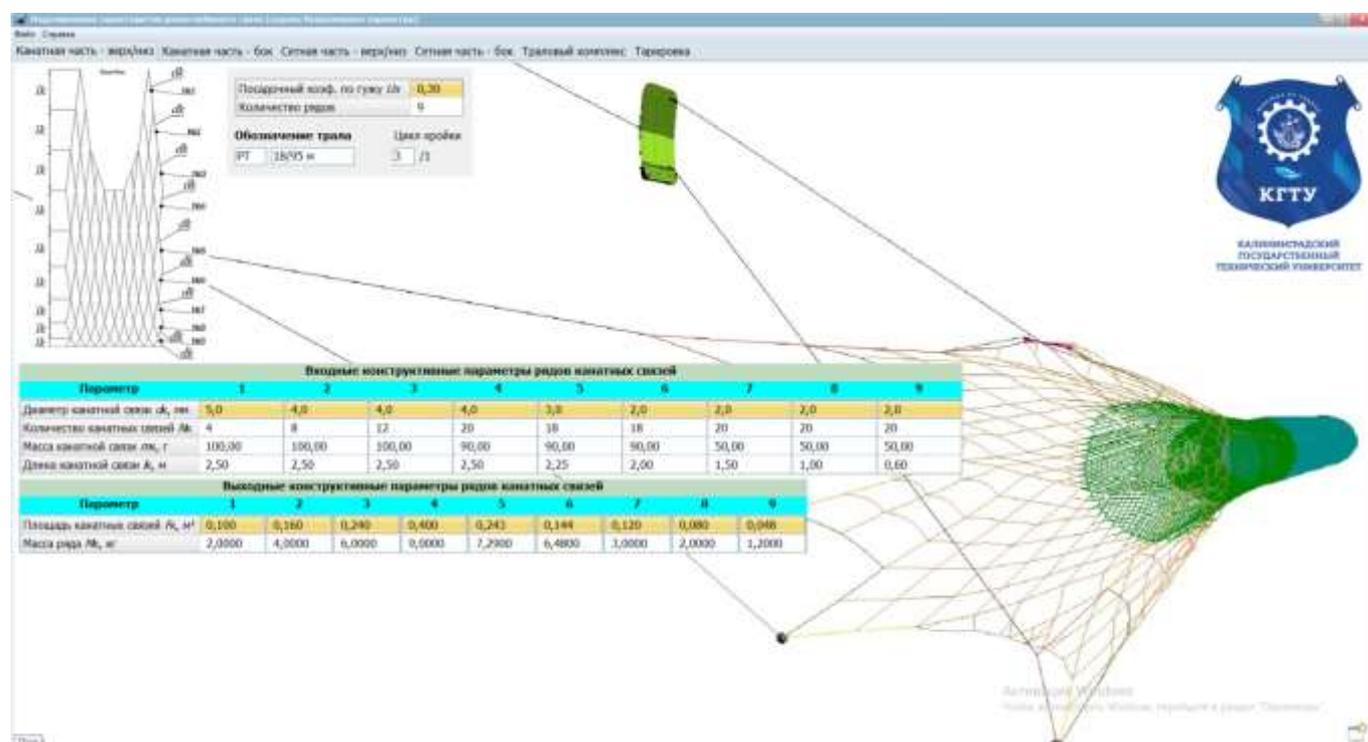


Рис. 1. Окно «Канатная часть - верх/низ» компьютерной программы «Моделирование характеристик разноглубинного трала (заданы безразмерные параметры)»

Как видно из рис. 1, входными параметрами для расчета траловой конструкции являются: диаметр канатной связи, количество канатных связей, масса канатной связи, длина канатной связи, посадочный коэффициент по гужу трала (коэффициент, обеспечивающий полупериметр устья трала и раскрытие устья), цикл кройки канатной части (условный цикл кройки) и обозначение трала. Также на рис. 1 изображены выходные (расчетные) параметры, определяющие материалоемкость (расход материала) на изготовление канатной части - «верх/низ»: площадь канатных связей и масса ряда канатных связей. Количество рядов (начиная с крыльев) в компьютерной программе ограничено 12 рядами (это связано с максимальным количеством рядов канатных связей в разноглубинных тралах).

Окно «Канатная часть бок» компьютерной программы «Моделирование характеристик разноглубинного трала (заданы безразмерные параметры)» выглядит аналогично окну «Канатная часть - верх/низ».

На рис. 2 изображено окно «Сетная часть - верх/низ» компьютерной программы «Моделирование характеристик разноглубинного трала (заданы безразмерные параметры)».

Циклы кройки

Пластина 1: 0,5
 Пластина 2: 0,5
 Пластина 3: 0,5
 Пластина 4: 1,08
 Пластина 5: 1,01

Рубашка: 30/0
 Мешок: 50/0

Количество пластин: 5

Параметры сетных пластин (Нижние конструктивные параметры)

Параметр	1	2	3	4	5
Шаг ячейки d, мм	200	100	20	10	10
Диаметр нитки (веревки) d, мм	2,0	1,8	1,7	1,2	1,2
Ячей по верхней кромке n1	30	36	130	138	112
Ячей по нижней кромке n2	18	26	110	100	77
Ячей по высоте m	12,0	10,0	20,0	60,0	53,0
Количество сетных пластин J	2	2	2	2	2
Масса м² факт. площади Mф, г/м²	61,50	61,50	61,50	61,50	61,50

Параметры сетных пластин (Верхние конструктивные параметры)

Параметр	1	2	3	4	5
Длина по верх. кром. в ягуге (L1, м)	12,00	7,20	5,20	4,52	3,14
Длина по ниж. кром. в ягуге (L2, м)	7,20	5,20	4,40	3,20	2,16
Высота в ягуге H, м	4,80	2,00	0,80	1,92	1,48
Фиктивная площадь Fф, м²	92,160	24,900	7,680	14,623	7,853
Площадь ниток (веревки) Fн, м²	0,922	0,446	0,461	1,097	0,673
Масса M, кг	5,668	1,525	0,472	0,899	0,483

Рубашка Мешок

Рубашка	Мешок
10	8
1,2	1,0
100	100
80	80
30,0	50,0
2	2
38,10	38,10

Рис. 2. Окно «Сетная часть - верх/низ» компьютерной программы «Моделирование характеристик разноглубинного трала (заданы безразмерные параметры)»

На рис. 2 изображены входные и выходные (расчетные) параметры, так как входным параметрам относятся: шаг ячеей, диаметр нитки (веревки), количество ячеей по верхней кромке пластины, количество ячеей по нижней кромке пластины с учетом рубашки и мешка, количество ячеей по высоте пластины, количество пластин (ограничено 12), масса 1м² фиктивной площади. К выходным параметрам относятся: длина по верхней кромке сетной пластины, длина по нижней кромке сетной пластины, высота сетной пластины, фиктивная площадь, площадь ниток (веревки), масса сетной пластины, циклы кройки сетных пластин, причем (см. рис. 3), расчетные циклы кройки представляются десятичными цифрами, которые переводит оператор в дробные (для обозначений на чертеже сетных частей трала). К примеру: расчетное значение цикла кройки сетной пластины оказалось - 0,5, тогда оператор вводит значение цикла кройки - 1/2. Если десятичное (расчетное) значение цикла кройки - 0,33, тогда оператор вводит значение - 1/3 и т.д. При расчете цикла кройки оказалось значение 0,47 или другое, то оператор меняет количество ячеей с учетом конусности сетной части трала.

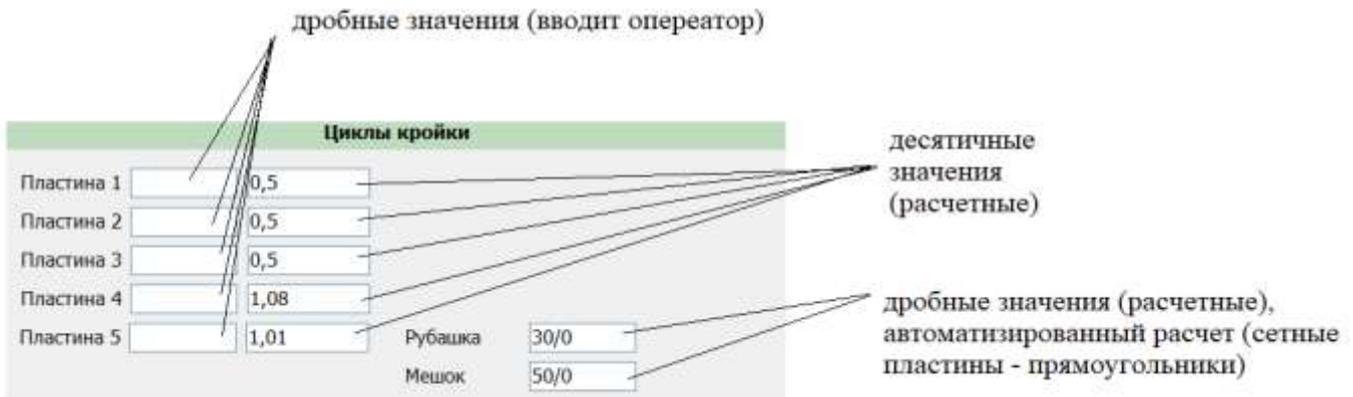


Рис. 3. Циклы кройки сетных пластин

Окно «Сетная часть - бок» компьютерной программы «Моделирование характеристик разноглубинного трала (заданы безразмерные параметры)» выглядит аналогично окну «Сетная часть - верх/низ».

Окно «Траловый комплекс» компьютерной программы «Моделирование характеристик разноглубинного трала (заданы безразмерные параметры)» представляет набор входных и выходных параметров тралового комплекса, окно программы изображено на рис. 4.

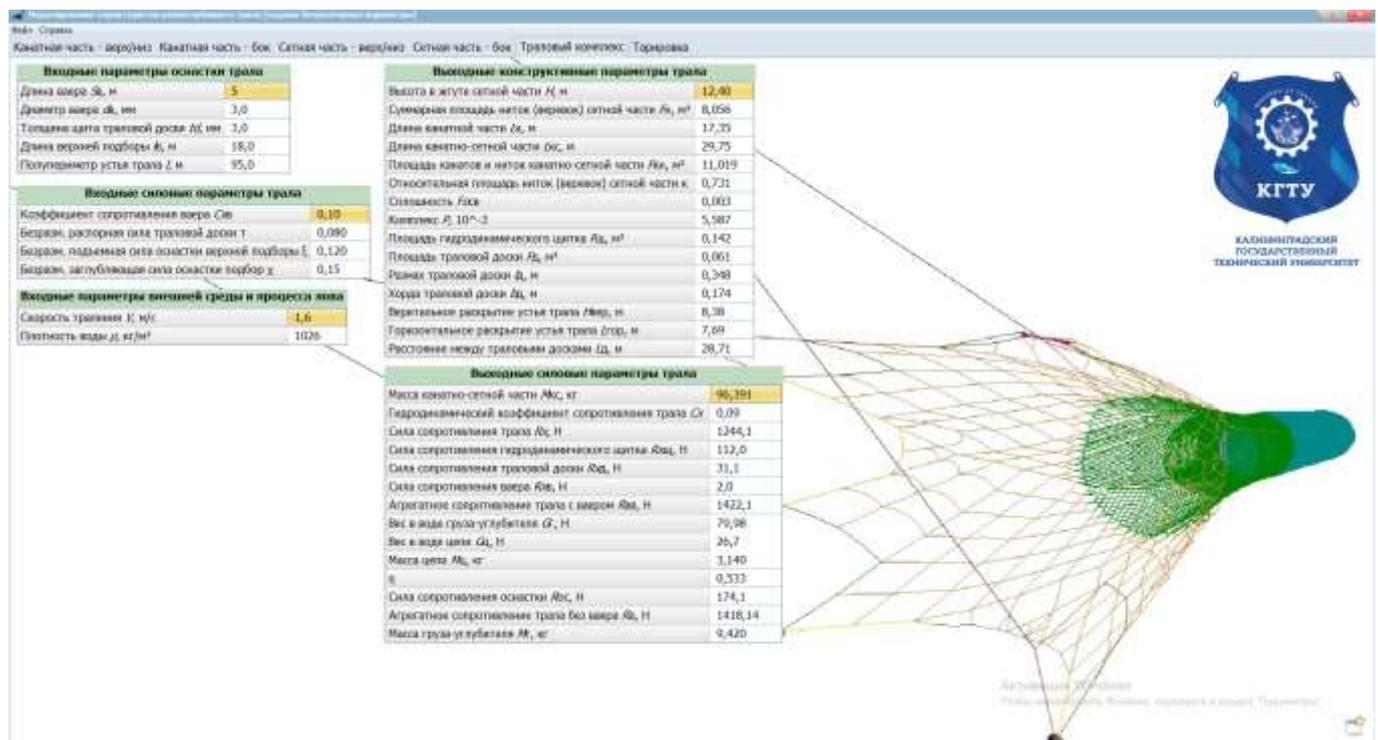


Рис. 4. Окно «Траловый комплекс» компьютерной программы «Моделирование характеристик разноглубинного трала (заданы безразмерные параметры)»

К входным параметрам относятся: длина ваера, диаметр ваера, толщина щита траловой доски, длина верхней подборки трала, полупериметр устья трала, коэффициент сопротивления ваера, скорость траления, плотность воды, а также безразмерные параметры: безразмерная распорная сила траловой доски, безразмерная подъемная сила оснастки верхней подборки и безразмерная заглубляющая сила оснастки нижней подборки и грузов-углубителей. Безразмерные силы задаются в строгом диапазоне (получен на основании исследований) [3], при этом компьютерная программа не позволяет оператору отклониться от диапазона вводимых чисел. Выходные (расчетные) конструктивные и силовые параметры приводятся на рис. 5 и 6.

Выходные конструктивные параметры трала	
Высота в жгуте сетной части H , м	12,40
Суммарная площадь ниток (веревки) сетной части A_n , м ²	8,056
Длина канатной части L_k , м	17,35
Длина канатно-сетной части L_{kc} , м	29,75
Площадь канатов и ниток канатно-сетной части A_{kn} , м ²	11,019
Относительная площадь ниток (веревки) сетной части к	0,731
Сплошность $G_{сп}$	0,003
Комплекс P , 10^{-3}	5,587
Площадь гидродинамического щитка $A_{щ}$, м ²	0,142
Площадь траловой доски A_d , м ²	0,061
Размах траловой доски d , м	0,348
Хорда траловой доски l_d , м	0,174
Вертикальное раскрытие устья трала $H_{вер}$, м	8,38
Горизонтальное раскрытие устья трала $L_{гор}$, м	7,69
Расстояние между траловыми досками l_d , м	28,71

Рис. 5. Выходные конструктивные параметры окна «Траловый комплекс»

Выходные силовые параметры трала	
Масса канатно-сетной части A_{kc} , кг	96,391
Гидродинамический коэффициент сопротивления трала C_x	0,09
Сила сопротивления трала R_x , Н	1244,1
Сила сопротивления гидродинамического щитка $R_{щ}$, Н	112,0
Сила сопротивления траловой доски R_d , Н	31,1
Сила сопротивления ваера $R_{в}$, Н	2,0
Агрегатное сопротивление трала с ваером $R_{ав}$, Н	1422,1
Вес в воде груза-углубителя G_T , Н	79,98
Вес в воде цепи G_c , Н	26,7
Масса цепи M_c , кг	3,140
Π	0,533
Сила сопротивления осыпки $A_{ос}$, Н	174,1
Агрегатное сопротивление трала без ваера R_b , Н	1418,14
Масса груза-углубителя M , кг	9,420

Рис. 6. Выходные силовые параметры окна «Траловый комплекс»

На рис. 7 изображено окно «Траловый комплекс» компьютерной программы «Моделирование характеристик разноглубинного трала (заданы безразмерные параметры)». На данном рисунке изображен параметр (окошко) - скорость траления, которое оператор может менять скользящим курсором.

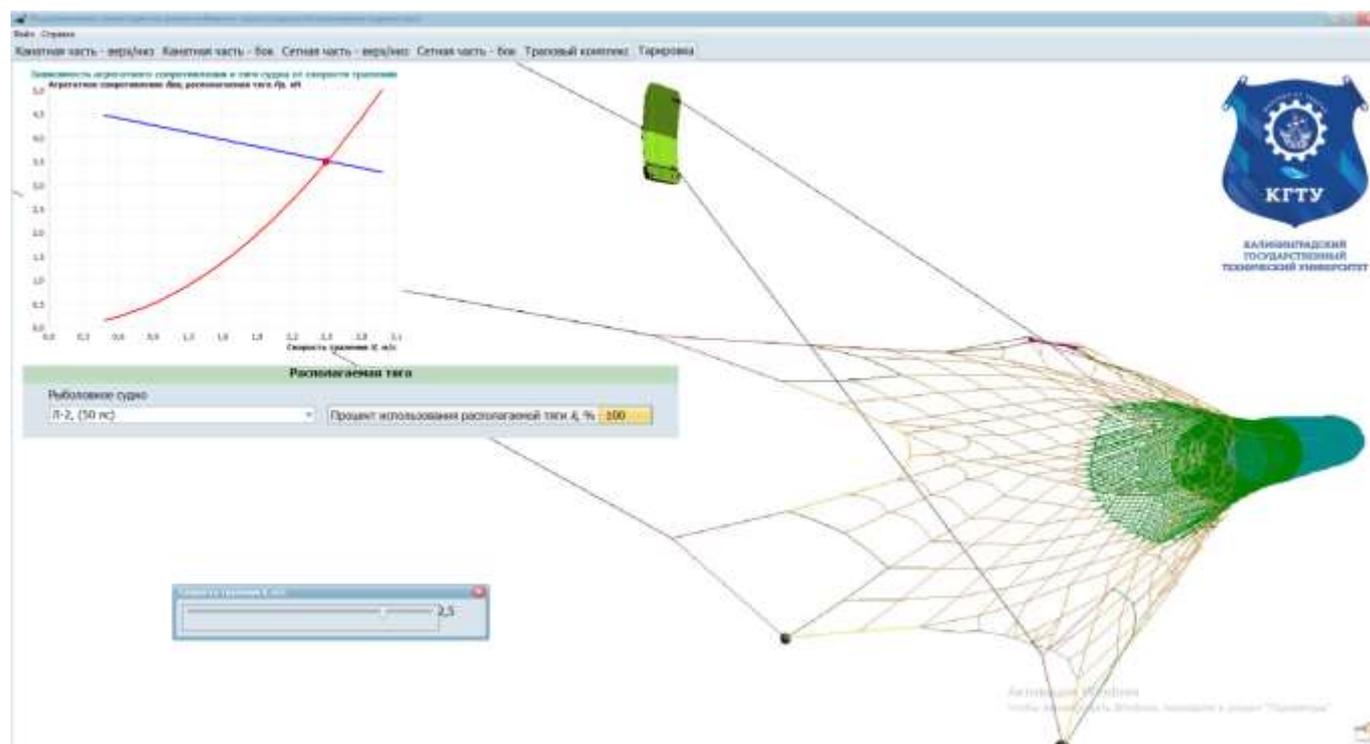


Рис. 7. Окно «Тарировка» компьютерной программы «Моделирование характеристик разноглубинного трала (заданы безразмерные параметры)»

В данном окне оператор задает параметры рыболовного судна: тип судна и процент использования располагаемой тяги (см. рис. 8).

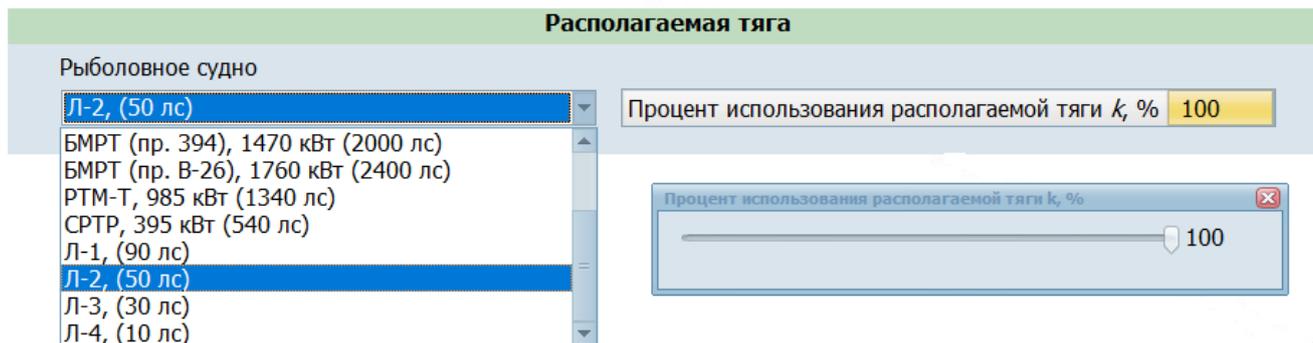


Рис. 8. Ввод типа судна и процент использования его располагаемой тяги

В окне «Тарировка» оператор определяет точку пересечения кривой располагаемой тяги судна и агрегатного сопротивления трала (см. рис. 9), это точка означает наилучшее использование тяги судна.

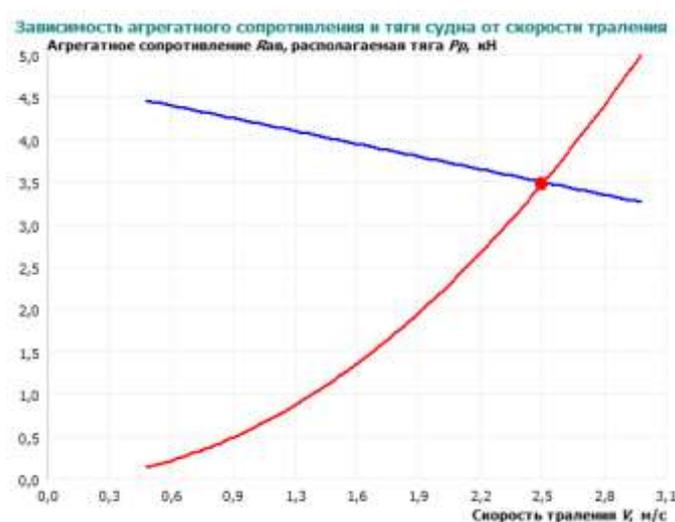


Рис. 9. Зависимость располагаемой тяги судна и агрегатного сопротивления трала от скорости траления

Приведенный модуль системы автоматизированного проектирования тралов является неотъемлемым инструментом при проектировании разноглубинных и донных тралов. Входящие в САПР тралов алгоритмы и математические модели адекватно воспроизводят действующие процессы. Имитационные модели САПР тралов обеспечивают понятные задачи при расчете и проектировании тралов, а также позволяют наглядно отображать выходные параметры и зависимости. Модуль САПР тралов «Моделирование разноглубинного трала», представленный в статье, может применяться при расчете таких параметров, как гидродинамическое сопротивление канатно-сетной части трала; горизонтальное и вертикальное раскрытия устья трала и др. Возможности модуля «Моделирование разноглубинного трала» не ограничиваются расчетом геометрических и силовых параметров разноглубинных тралов, также возможно подобрать необходимый ассортимент дели и оснастку для эффективного тралового промысла соответствующего косяка рыб. Модуль «Моделирование разноглубинного трала» обеспечивается компьютерной программой «Моделирование характеристик разноглубинного трала (заданы безразмерные параметры)».

Исследование выполнено в рамках выполнения государственного задания по теме «Разработка физических, математических и предсказательных моделей процессов эксплуатации донного и разноглубинного траловых комплексов».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Недоступ А.А., Ражев А.О. Моделирование орудий и процессов рыболовства. Часть I : учебное пособие. - Калининград: Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ». - 2019. - 433 с.
2. Недоступ А.А., Ражев А.О. Моделирование орудий и процессов рыболовства. Часть II: учебное пособие. - Калининград: Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ». - 2019. - 444 с.
3. Розенштейн М.М., Недоступ А.А. Механика орудий рыболовства. Гриф УМО. М. - Моркнига. - 2011. 528 с.

TRAWL CAD MODULE "MODELING THE CHARACTERISTICS OF A MID-WATER TRAWL (DIMENSIONLESS PARAMETERS ARE SET)"

¹Nedostup Aleksandr Alekseevich, associate professor, PhD in Technical Sciences;

²Razhev Aleksey Olegovich, Leading Researcher, PhD in Technical Sciences

^{1,2}Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia, e-mail: nedostup@klgtu.ru

The system of computer-aided design of trawls (CAD trawls) is an integral tool in the design of mid-water and bottom trawls. The algorithms and mathematical models included in the trawl CAD system adequately reproduce the existing processes. Trawl CAD simulation models provide clear tasks in the calculation and design of trawls, and also allow you to visually display output parameters and dependencies. The CAD module for trawls "Modeling of a mid-water trawl", presented in the article, can be used to calculate such parameters as the hydrodynamic resistance of the rope-net part of the trawl; horizontal and vertical opening of the mouth of the trawl, etc. The capabilities of the module "Modeling of the mid-water trawl" are not limited to the calculation of the geometric and power parameters of the mid-water trawls, it is also possible to select the necessary assortment of nets and equipment for effective trawl fishing of the corresponding school of fish. The module "Simulation of a mid-water trawl" is provided by the computer program "Simulation of the characteristics of a mid-water trawl (dimensionless parameters are set)".

УДК 639.2; 532.58

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ МОДЕЛИ ЛОДКИ «WYATBOAT - 430»

¹Недоступ Александр Алексеевич, доцент, канд. техн. наук, заведующий кафедрой промышленного рыболовства;

²Сергеев Егор Ильич, аспирант кафедры промышленного рыболовства;

³Ражев Алексей Олегович, канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник;

⁴Чуреев Евгений Андреевич, директор НИЦС ФГБОУ ВО «КГТУ»

^{1,2,3,4}Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия, e-mail: nedostup@klgtu.ru

Рассматривается гидродинамика моторной лодки типа «Wyatboat - 430». Лодки «Wyatboat - 430» применяются для прибрежного лова, а также во внутренних водоемах, проведения научных исследований запасов гидробионтов в водоемах Российской Федерации. Для обоснования тяговых характеристик моторной лодки «Wyatboat - 430» были проведены экспериментальные исследования в опытовом бассейне ФГБОУ ВО «КГТУ».

Гидродинамическое сопротивление катамарана зависит от многих характеристик: формы корпуса лодок, шероховатости поверхности корпуса, в частности, днища лодок, размеров лодок, скорости буксировки, расстояния между лодками (крепления) и др. Предложена схематизация катамаран, математическая модель, основанная на дифференциальных уравнениях в частных производных Навье-Стокса, расчетная область, начальные и граничные условия.

Проблема достижения оптимальных параметров моторных лодок при их движении и буксировки активных орудий промышленного рыболовства сопряжены с множеством проблем, это [1-4]:

- отсутствие в ряде районов разрешений на промысел активными орудиями рыболовства;
- отличия в соответствии располагаемой тяги моторной лодки и сопротивления орудия промышленного рыболовства;

- отсутствие на моторных лодок механизации промысловых операций.

Это не полный список ограничений в эксплуатации моторных лодок в прибрежной зоне и во внутренних водоемах Российской Федерации активных орудий промышленного рыболовства.

Эти ограничения накладывают определенные условия работы, а также ставят задачи, которые решаются различными методами:

- физическими экспериментами;
- имитационным моделированием.

В данной статье рассматривается исследование гидродинамики с помощью 3D модели моторной лодки типа «Wyatboat - 430». Лодки «Wyatboat - 430» для прибрежного лова, а также во внутренних водоемах, проведения научных исследований запасов гидробионтов в водоемах Российской Федерации. Гидродинамическое сопротивление лодки «Wyatboat - 430» зависит от многих характеристик: формы корпуса, шероховатости поверхности корпуса, в частности днища, размеров лодки, скорости буксировки и др. Для расчетов сопротивления корпуса судна в программе Maxsurf Resistance было создана трехмерная модель лодки с помощью специализированной программы «Blender».

На рис. 1 изображена моторная лодка «Wyatboat - 430». Техничко-технические характеристики «Wyatboat - 430» приводятся в табл. 1.

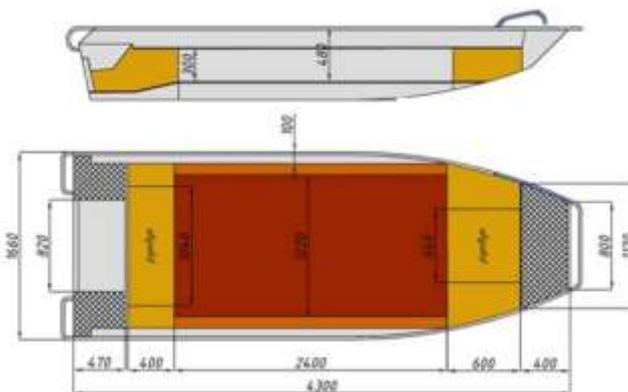


Рис. 1. Моторная лодка «Wyatboat - 430»

Таблица 1

Характеристики моторной лодки «Wyatboat - 430»

Длина м	Ширина м	Материал корпуса	Масса кг
4,3	1,6	алюминий	189

Параметры лодочного мотора Mercury приводятся в табл. 2.

Таблица 2

Параметры лодочного мотора Mercury

Мощность л/с, кВт	Масса кг	Двигатель	Гребной винт	Расход топлива л/ч
25 л/с, 18,3 кВт	51	двухтактный	- кол-во лопастей – 3 шт.; - шаг – 9 дюйм; - диаметр – 9 см.	13

Схематизация 3D модели моторной лодки «Wyatboat - 430» приводится на рис. 2.



Рис. 2. Схематизация 3D модели моторной лодки «Wyatboat - 430»

Maxsurf Resistance специализированная программа для оценки требования к сопротивлению и мощности любой конструкции, используя стандартные методы прогнозирования. Благодаря созданной 3D модели, на основе полученного с натуры теоретического чертежа, были произведены расчеты сопротивления корпуса лодки.

На рис. 3-1 изображены результаты расчетов.

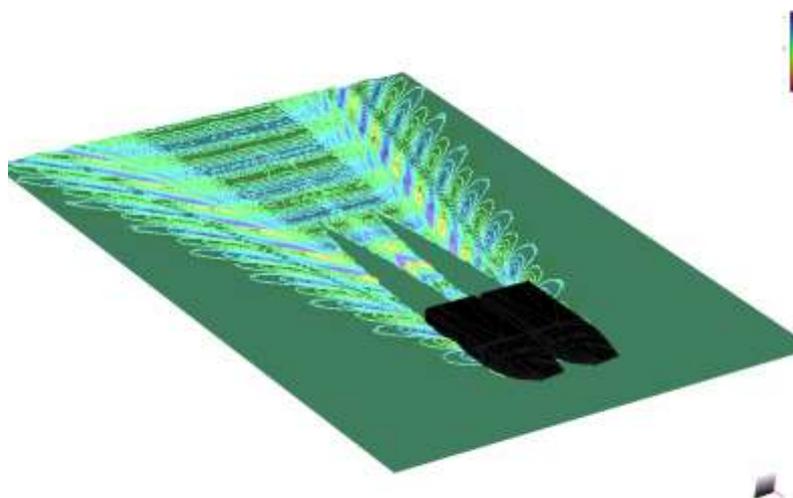


Рис. 3. Картина волнообразования. Расстояние между корпусами 0 м.

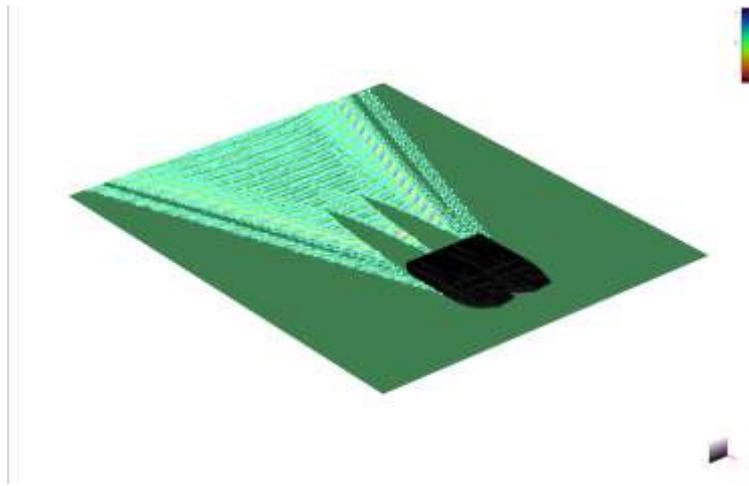


Рис. 4. Картина волнообразования. Расстояние между корпусами 0,25 м.

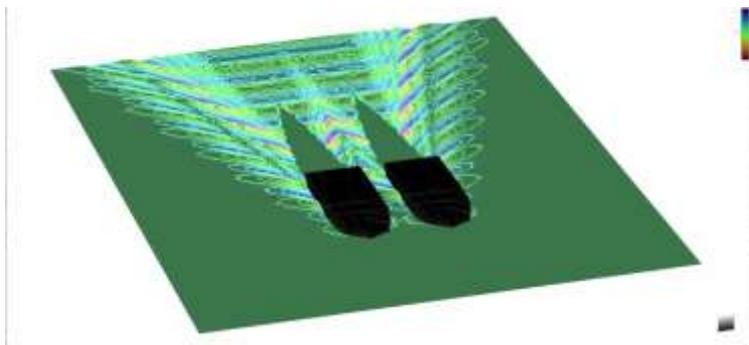


Рис. 5. Картина волнообразования. Расстояние между корпусами 0,5 м.

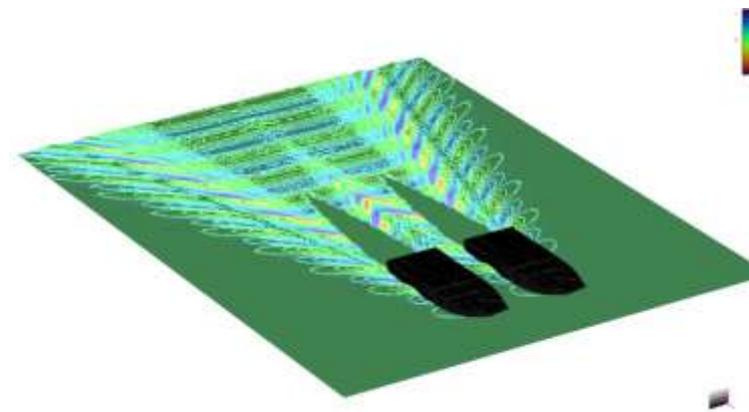


Рис. 6. Картина волнообразования. Расстояние между корпусами 0,75 м.

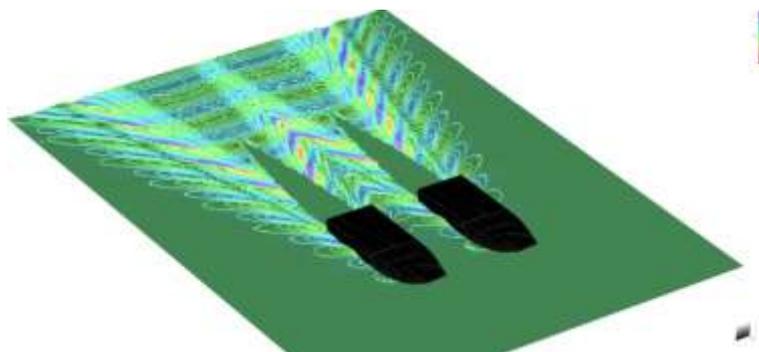


Рис. 7. Картина волнообразования. Расстояние между корпусами 1 м.

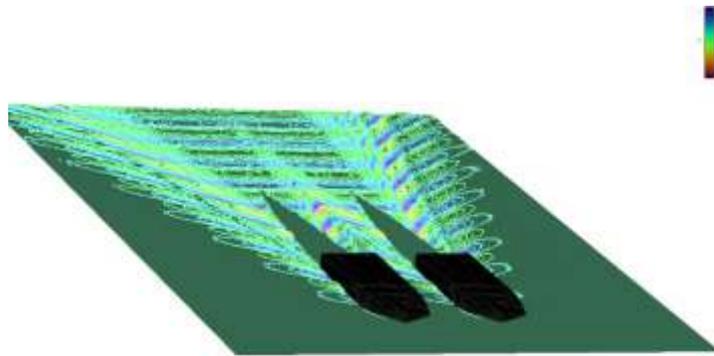


Рис. 8. Картина волнообразования. Расстояние между корпусами 1,25 м.

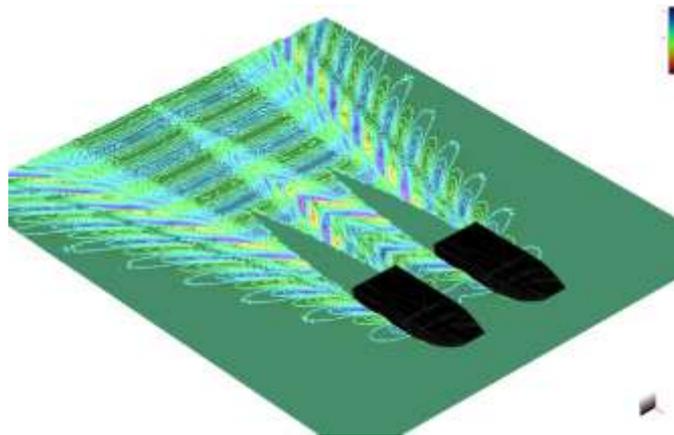


Рис. 9. Картина волнообразования. Расстояние между корпусами 1,5 м.

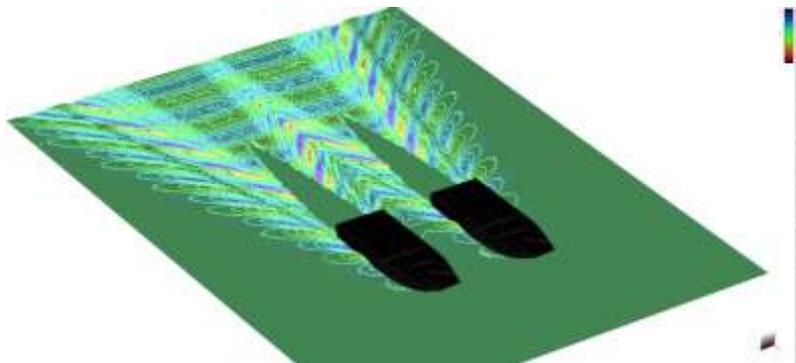


Рис. 10. Картина волнообразования. Расстояние между корпусами 1,75 м.

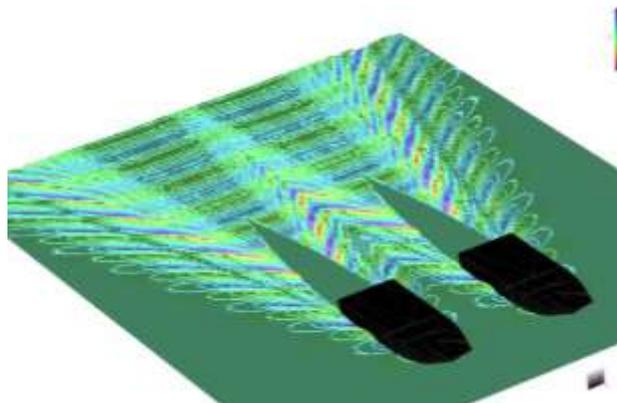


Рис. 11. Картина волнообразования. Расстояние между корпусами 2 м.

Результаты расчетов представлены в табл. 3.

Таблица 3

Сводная таблица результатов расчетов

Расстояние м/у борта В, м	Масштаб плотности воды, C_p
0	158,18
0,25	158,04
0,5	158,18
0,75	158,04
1	158,18
1,25	158,04
1,5	158,18
1,75	158,04
2	158,18

График результатов расчетов представлен на рис. 12.

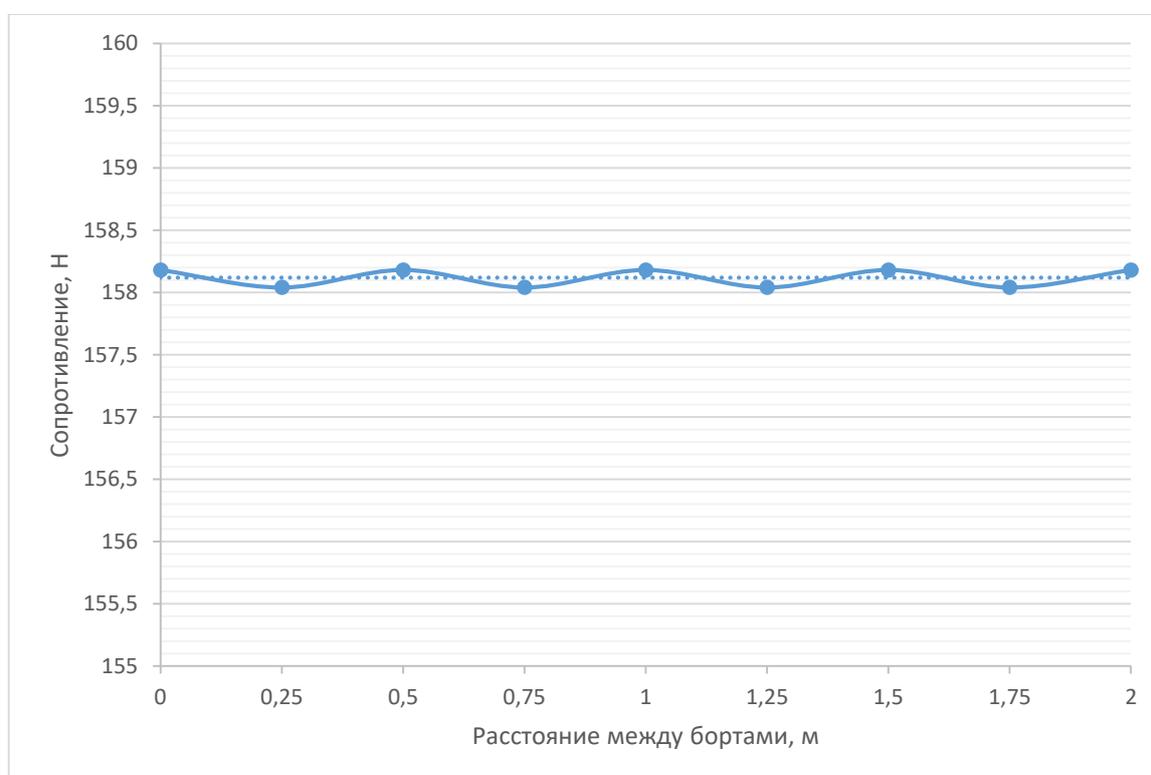


Рис. 12. График зависимости сопротивления от расстояния между бортами.

Проведены опыты по исследованию гидродинамических характеристик модели лодки «Wyatboat - 430». Эксперименты обоснованы с учетом методики проведения опытов с корпусами моделей судов [5].

Результаты исследования показали, что влияние расстояний между корпусами не оказывает заметного влияния на мореходные характеристики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Денисов Л. И. Рыболовство на водохранилищах. Издательство: Пищевая промышленность. - М.: - 1978. - 288 с.
2. Исаев А. И., Карпова Е. И. Рыбное хозяйство водохранилищ. Справочник. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: ВО «Агропромиздат», 1989. - 255 с.

3. Северов Ю.А., Сайфуллин Р.Р. Техника и орудия сбора ихтиологического материала во внутренних водоемах: методическое пособие / Ю.А. Северов, Р.Р. Сайфуллин - Казань: КФУ, 2015. - 40 с.

4. Самбаев Н.С. Промысловое состояние на Шардаринском водохранилище и применяемые орудия лова/ Каспий и глобальные вызовы: материалы Международной научно-практической конференции. Секция 5. Приоритетные направления развития аквакультуры в Прикаспии. - Астрахань. - 2022. - С. 568-574.

5. Радциг А.Н. Экспериментальная гидроаэромеханика. - М.: Издательство МАИ, 2004. - 296 с.

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE HYDRODYNAMICS OF THE MODEL BOAT «WYATBOAT - 430»

¹Nedostup Alexander Alekseevich, Associate Professor, Ph.D.,

Head of the Department of Commercial Fishing;

²Sergeev Egor Pyich, postgraduate student of the Department of Commercial Fishing;

³Razhev Aleksey Olegovich, Leading Researcher, PhD in Technical Sciences;

⁴Chureev Evgeniy Andreevich, director Research Center

^{1,2,3,4}Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia, e-mail: nedostup@klgtu.ru

In this article, the hydrodynamics of a motor boat of the "Wyatboat - 430" type is achieved. Boats "Wyatboat - 430" are used for coastal fishing, as well as in inland waters, conducting scientific research on hydrobiont stocks in the waters of the Russian Federation. To substantiate the traction characteristics of the motor boat "Wyatboat - 430", experimental and technical studies were carried out in the experimental pool of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "KSTU".

The hydrodynamic resistance of a catamaran depends on many characteristics: the shape of the hull of the boats, the roughness of the body surface, in particular the days of the boats, the size of the boats, the speed of towing, the distance between the boats (mounts), etc. A catamaran schematization is proposed, a mathematical model based on differential equations in first Navier-Stokes derivatives, computational domain, initial and boundary conditions. In this case, the hydrodynamic result of a motor boat of the Wyatboat - 430 type was found. Boats "Wyatboat - 430" are used for coastal fishing, as well as in inland waters, conducting scientific research on hydrobiont stocks in the waters of the Russian Federation. To substantiate the traction characteristics of the motor boat "Wyatboat - 430", experimental studies were carried out with a boat model in the experimental pool of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "KSTU". The hydrodynamic resistance of the boat "Wyatboat-430" depends on many characteristics: the shape of the hull, the roughness of the surface of the hull, in particular the bottom, the size of the boat, the speed of towing, etc.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОМЫСЛОВЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ КАТАМАРАНОВ

¹Недоступ Александр Алексеевич, доцент, канд. техн. наук,
заведующий кафедрой промышленного рыболовства;

²Суконнов Анатолий Владимирович, доцент, канд. техн. наук,
доцент кафедры промышленного рыболовства;

³Сергеев Егор Ильич, аспирант кафедры промышленного рыболовства;

⁴Горобец Олег Витальевич, студент кафедры промышленного рыболовства

^{1,2,3,4}Калининградский государственный технический университет,
Калининград, Россия, ¹nedostup@klgtu.ru

*Проектирование низкоэнергетических промысловых комплексов, эксплуатирующих разно-
глубинные тралы является первостепенной задачей для рыбохозяйственного комплекса Россий-
ской Федерации. Цель исследования заключена в разработке проекта низкоэнергетического про-
мыслового комплекса, эксплуатирующего разноглубинный трал для лова ряпушки (*Coregonus
albula*) в озере Виштынецкое, с помощью которого возможно моторными лодками облавливать
скопления на глубинах 40-50 м. Данный проект трала направлен на снижение вредного воздей-
ствия тралового промысла на окружающую среду восточной части Калининградской области. В
рамках проведенного исследования предложен проект разноглубинного трала, который может
эксплуатироваться с моторными лодками, моторы которых имеют минимальные выхлопы угле-
кислого газа. Результатом разработки низкоэнергетического разноглубинного трала для лова ря-
пушки (*Coregonus albula*) в озере Виштынецкое является снижение углеродного следа за счёт
уменьшения энергозатрат.*

Низкоэнергетический промысловый комплекс или низкоэнергетический траловый ком-
плекс (далее НТК), эксплуатирующий разноглубинные тралы - термин, обозначающий комплекс с
низкими затратами энергии на его траление по сравнению со стандартным комплексом или про-
мысловой единицы «судно-трал».

Проектирование низкоэнергетических промысловых комплексов, эксплуатирующих разно-
глубинные тралы является первостепенной задачей для рыбохозяйственного комплекса Россий-
ской Федерации. Мощные рыболовные суда оказывают на окружающую среду. С внедрением ме-
ханизма инвестквот такое воздействие значительно усилилось [1]. Риски загрязнения окружающей
среды в рыбном хозяйстве связаны с выхлопами углекислого газа, а также с выбросами парнико-
вых газов в процессе тралового промысла (переходы, траления, выгрузка улова) [2]. В этой связи
проектирование низкоэнергетических промысловых комплексов, эксплуатирующих разноглубин-
ные тралы является одной из основных задач современного тралового промысла - снижение вы-
бросов. Цель исследования заключена в разработке проекта низкоэнергетического промыслового
комплекса, эксплуатирующего разноглубинный трал для лова ряпушки (*Coregonus albula*) в озере
Виштынецкое, с помощью которого возможно моторными лодками облавливать скопления на
глубинах 40-50 м. Данный проект трала направлен на снижение вредного воздействия тралового
промысла на окружающую среду восточной части Калининградской области. В рамках проведен-
ного исследования предложен проект разноглубинного трала, который может эксплуатироваться с
моторными лодками, моторы которых имеют минимальные выхлопы углекислого газа. Проект
трала выполнялся в ПО САПР разработки кафедры промышленного рыболовства Калининград-
ского государственного технического университета.

При эксплуатации трала, обладающего минимальным агрегатным сопротивлением, обычно
применяется маломерные суда с малым потреблением топлива на переход и траление, минимиза-
ция энергоёмкости лебедок и канатно-сетного барабана на постановку и выборку трала, произво-
дительность лова, промысловая мощность, промысловое усилие, промысловая эффективность,
уловистость, низкий уровень углеродного следа, селективность, отсутствие гидроподпора в конце-

вой части трала и траловом мешке [3]. Такие траловые комплексы уменьшают выброс углекислого газа в атмосферу, тем самым способствуя устойчивому развитию рыбохозяйственного комплекса [4]. В состав НТК входит разноглубинный трал 18/95 м, две соединенные между собой (в катамаран) моторные лодки «Wellboat» (мотор мощностью 25 л/с или 18,3 кВт), две электрические лебедки Tor S10000, канатно-сетной барабан, два аккумулятора Exide AGM 95 а/ч. Промысловая команда состоит из четырех человек (два члена экипажа управляют моторами лодок, один управляет электрическими лебедками, он же с четвертым членом экипажа выполняет операции по постановке и выборке трала, при условии проведения исследований (снятие показаний с датчиков натяжения в ваерах, оборотов барабана лебедок, потребления тока, скорости постановки и выборки ваеров, глубины хода верхней подборы, показаний эхолота и гидролокатора) команда увеличивается до шести человек.

Две соединенные между собой (в катамаран) в притык моторные лодки «Wellboat» (мотор мощностью 25 л/с или 18,3 кВт) представлены на схеме (см. рис. 1).

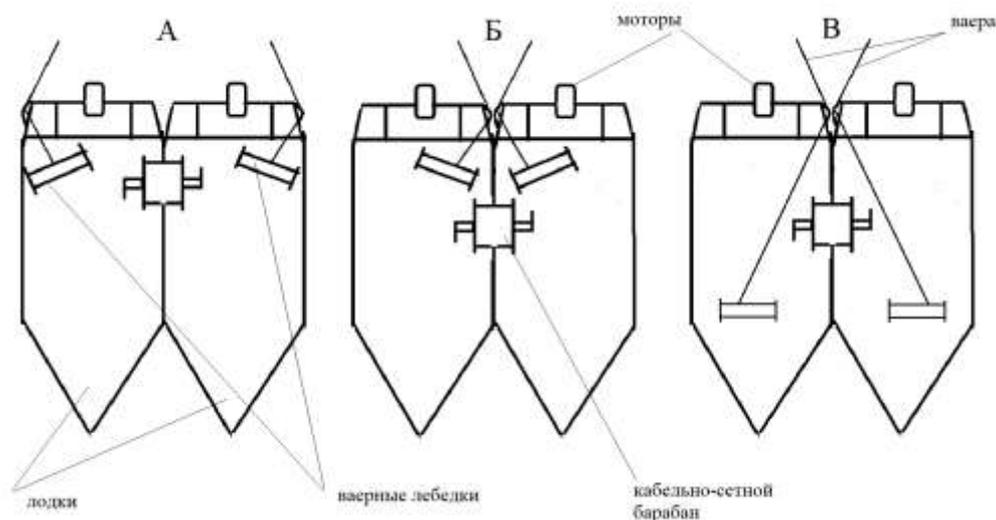


Рис. 1. Схематизация соединенных между собой (в катамаран) моторных лодок «Wellboat» в притык бортами

При проведении экспериментов на оз. Виштынецкое [5] вследствие крепления лодок впритык оказалось, что жесткая конструкция катамарана менее устойчива, а также имеет недостаточную остойчивость. Было предложено сделать катамаран с промысловой палубой с шарнирами, для увеличения остойчивости катамарана.

Для увеличения остойчивости предложено две моторные лодки «Wellboat» (мотор мощностью 25 л/с или 18,3 кВт) соединенность между собой (в катамаран) с зазором и промысловой палубой (см. рис. 2).

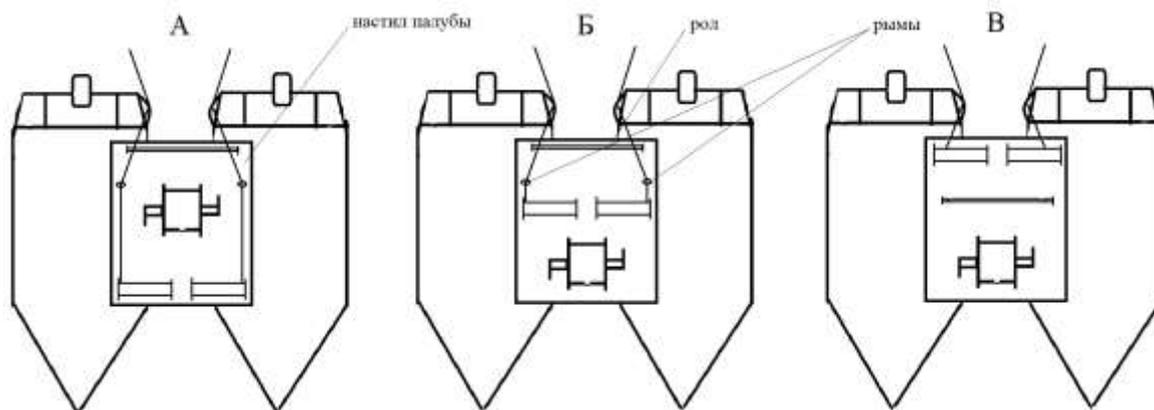


Рис. 2. Схематизация соединенных между собой (в катамаран) моторных лодок «Wellboat» с зазором и палубой

Характеристики моторной лодки «Wellboat» приводятся в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики моторной лодки «Wellboat»

Длина, м	Ширина, м	Водоизмещение при 400 кг	Материал корпуса	Кол-во экипажа, чел
4,3	1,6	0,39 т	алюминий	4

Параметры лодочного мотора Mercury приводятся в табл. 2.

Таблица 2

Параметры лодочного мотора Mercury

Мощность, л/с, кВт	Масса, кг	Двигатель	Гребной винт	Расход топлива, л/ч
25 л/с, 18,3 кВт	51	двухтактный	- кол-во лопастей – 3 шт.; - шаг – 9 дюйм; - диаметр – 9 см.	13

Параметры электрической лебедки Tor S10000 приводятся в табл. 3.

Таблица 3

Параметры электрической лебедки Tor S10000

Мощность кВт	Масса кг	Габариты лебедки, мм	Канатоемкость барабана при диаметре ваера 2,5 мм	Двигатель	Скорость оборотов/тяга м/с, кН	Потребляемая сила тока А/об при тяге 0; 8,9; 17,8; 26,6; 35,6; 44,5, кН
4,0	37	Длина – 537 Ширина – 160 Высота - 183	89 м	4,0 кВт/5,5 л.с. (12В)	0,18 м/с, 0 кН; 0,075 м/с, 8,9 кН 0,056 м/с, 17,8 кН 0,048 м/с, 26,6 кН 0,04 м/с, 35,6 кН 0,026 м/с, 44,5 кН	75А при 0 кН 180А при 8,9 кН 220А при 17,8 кН 290А при 26,6 кН 360А при 35,6 кН 450А при 44,5 кН

Параметры канатно-сетного барабана приводятся в табл. 4.

Таблица 4

Параметры канатно-сетного барабана

Масса, кг	Габариты, мм	Вместимость, кг
15	Длина – 540 Ширина – 440 Высота - 540	176

Параметры НТК приводятся в табл. 5.

Таблица 5

Параметры НТК

Кол-во моторных лодок «Wellboat»	Масса с оборудованием и экипажем (4 человека), кг	Водоизмещение, т
2	547	0,9

Проект НТК схема рис 2А представлен на рис. 3.



Рис. 3. Проект НТК

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. Федеральный закон от 2 июля 2021 года №296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов».
2. Linking renewable energy, globalization, agriculture, CO₂ emissions and ecological footprint in BRIC countries: A sustainability perspective / Ugur Korkut Pata // *Renewable Energy*. 2021. No173. P.197–208.
3. Usman M., Makhdum M. S. A. What abates ecological footprint in BRICS-T region? Exploring the influence of renewable energy, non-renewable energy, agriculture, forest area and financial development // *Renewable Energy*, 2021. No 179. P. 12–28. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148121010193?via%3Dihub>.
4. Балашов Н.А., Годван Д.Ф. Углеродный след: как государства и компании пытаются его уменьшить // *Бизнес-образование в экономике знаний*. 2020. № 3 (17). С. 17–19.
5. Недоступ А.А., Ражев А.О., Насенков П.В., Львова Е.Е., Сысенко В.В., Аскарров Д.В., Белозер И.С. Экспериментальные исследования разноглубинного трала 18/95 м на оз. Виштынецкое. Вопросы рыболовства. – Т.24. - №2. – 2023. – С. 92-98.

NUMERICAL EXPERIMENTS IN THE HYDRODYNAMICS OF NETTING STRUCTURES

¹Nedostup Aleksandr Alekseevich, Associate Professor, Ph.D.,
Head of the Department of Commercial Fishing;

²Sukonnov Anatoly Vladimirovich, Associate Professor, Ph.D.,
Associate Professor of the Department of Commercial Fishing;

³Sergeev Egor Ilyich, postgraduate student of the Department of Commercial Fisheries;

⁴Gorobets Oleg Vitalievich, student of the Department of Commercial Fisheries

^{1,2,3,4}Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia, e-mail: nedostup@klgtu.ru

The design of low-energy fishing complexes operating various deep trawls is a primary task for the fisheries complex of the Russian Federation. The purpose of the study is to develop a project of a low-energy commercial complex operating a multi-depth trawl for catching grouse (Coregonus albula) in Lake Vishtynetskoye, with the help of which it is possible to catch accumulations at depths of 40-50 m by motor boats. This trawl project is aimed at reducing the harmful impact of trawl fishing on the environment of the eastern part of the Kaliningrad Region. Within the framework of the conducted research, a project of a multi-depth trawl has been proposed, which can be operated with motor boats whose engines have minimal carbon dioxide emissions. The result of the development of a low-energy multi-depth trawl for grouse (Coregonus albula) fishing in Lake Vishtynetskoye is a reduction in the carbon footprint due to lower energy consumption.

СОВРЕМЕННЫЕ НИТЕВИДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ОРУДИЙ ПРОМЫШЛЕННОГО РЫБОЛОВСТВА

¹Пивоварова Юлия Сергеевна, аспирант кафедры промышленного рыболовства;

²Недоступ Александр Алексеевич, доцент, канд. техн. наук,
заведующий кафедрой промышленного рыболовства;

³Насенков Павел Владимирович, заведующий лабораториями
кафедры промышленного рыболовства, младш. науч. сотрудник

^{1,2,3}Калининградский государственный технический университет,
Калининград, Россия, e-mail: nedostup@klgtu.ru

Описаны основные современные химические материалы, из которых в настоящее время изготавливаются нитевидные материалы для дальнейшего производства нитей, шнуров и канатов. Данные изделия применяются для изготовления элементов орудий промышленного рыболовства. Оптимальный подбор материала позволяет подстроиться под задачи определенного элемента орудия рыболовства.

В промышленном рыболовстве при изготовлении орудий лова в настоящее время применяются современные синтетические материалы. В прошлом веке орудия лова изготавливались из натуральных волокон, таких как хлопок, манил, кокосовая койра, сизаль, джут. Такой материал подвергался биологическому разложению, что влекло за собой короткий срок службы изделия и большие затраты на его техническое обслуживание.

Наука не стоит на месте, наряду с её развитием, в частности химии, физики, термодинамики, появлением более точных новых приборов, позволяющих проводить разнообразные, глубокие исследования в изучении технологии волокон, в промышленном рыболовстве началась новая эпоха применения современных материалов.

Современные материалы превосходят натуральные высокой прочностью на разрыв; обладают большим сопротивлением износу, истиранию, изгибу; повышенной стойкостью к воздействию агрессивных химических веществ, воды, ультрафиолетовых лучей и светопогоды, а также микроорганизмов; не поддаются деформации при длительной нагрузке и способны восстанавливать свою первоначальную форму. Обладая при этом низкой гигроскопичностью волокон орудия промышленного рыболовства быстро сохнут, обладают малым удельным весом и тем самым значительной прочностью в сравнении с орудиями рыболовства изготавливаемыми из натуральных материалов [1].

Канатно-веревочные элементы в орудиях промышленного рыболовства должны обладать высокой прочностью в силу того, что в процессе эксплуатации орудия лова испытывают динамические нагрузки, которые могут в разы превышать статистические нагрузки.

Наиболее важными синтетическими волокнами, используемыми в промышленном рыболовстве, являются полиамид (РА), полиэстер (PES), полиэтилен (PE), полипропилен (PP).

Полиамид (РА). Данный вид волокон получают из таких органических природных ресурсов как нефть, газ, древесный уголь. Визуально это бесцветный полимер с глянцевой фактурой, но в качестве сырья зачастую выпускается окрашенным (рис.1).



Рис. 1. Полиамид

Основными качествами, которыми обладают волокна из полиамида, являются прочность и долговечность.

Также к положительным качествам можно отнести гибкость, т.е. при сильных нагрузках и растягивании не происходит деформации формы. Орудия промышленного рыболовства, изготовленные из полиамида, обладают в общем высокой прочностью, в силу того, что одна отдельная нить в изделии может выдерживать колоссальную нагрузку в 1,5 кг. Орудия лова быстро сохнут, стойки к плесени, грибкам и ультрафиолету; не подвергаются к разъеданию солями, кислотами и щелочами; обладают низкой поглощаемостью влаги и низким удельным весом, что придает ему «невесомость».

Полиамиды являются жесткими материалами и характеризуются своей устойчивостью к циклическим нагрузкам, сохраняя при этом свои характеристики в широком диапазоне температур, и при этом, не теряют эластичность при низких температурах.

При изготовлении сетеполотен из полиамидной нити для промышленного рыболовства упрощается вязка за счет простого одинарного узла. Усадка при последующей обработке паром обеспечивает надежную его фиксацию, что сказывается на технологической простоте производства орудия рыболовства. [2]

Полиэстер (PES). Получают волокна из полиэстера сложными химическими процессами. Для изготовления материала перерабатывается нефть и углеводород. Разнообразие свойств волокон достигается путем введения различных изменений в технологическом процессе.

Полиэстер, более известный как лавсан, особенно популярен в странах Скандинавского полуострова, Японии, США, Канаде. Нити из полиэстера лидируют в области построения, оснащения и ремонта сетных орудий лова.

Канатно-веревочные изделия из полиэстера отличаются повышенной прочностью и износостойкостью. Благодаря низкой растяжимости, отрицательной плавучести и нулевой гигроскопичности, полиэстеровые изделия особенно популярны в рыболовстве. Такие изделия устойчивы к воздействию ультрафиолета и химически агрессивным средам и у них отсутствует усадка при намокании. Стойкость к истиранию обеспечивает длительный срок эксплуатации орудий рыболовства, что является весомым аргументом в выборе изделий из полиэстера.

С появлением современных высокопрочных полимерных материалов, которые обладают высокими прочностными характеристиками, увеличивается ресурс эксплуатации, что, например, важно при создании садковых рыбоводных хозяйств. При намокании нить из полиэстера обладает нулевой гигроскопичностью и не имеет усадки. В связи с этим канатно-веревочные изделия из полиэстера применяют при изготовлении рамовых сетей.

Востребованность полиэстера не ограничивается изготовлением только рыболовных нитей, в силу того, что материал является по своим характеристикам наиболее перспективным для использования в отраслях, связанных с водой, он используется также для производства шнуров и канатов (рис.2).



Рис. 2. Шнур из полиэстера

Плетеные шнуры из полиэстера отличаются повышенной прочностью, высокой износостойкостью, низкой растяжимостью и нулевой гигроскопичностью. Устойчивы к воздействию ультрафиолета и агрессивных химических сред, а также стойки к истиранию, что обеспечивает их применение на длительный срок. [3,4]

Полиэтилен. Самый распространенный пластик в мире. Полиэтилен (рис.3) обладает белым цветом, но при его растягивании, и если сделать тонким, то он становится прозрачным.



Рис. 3. Полиэтилен

Канатно-веревочные изделия из высокомолекулярного полиэтилена достаточно прочны и имеют небольшой удельный вес. Обладают при этом исключительной устойчивостью к истиранию, опережая по этому показателю широко известный материал тефлон. Однако термостойкость материала при этом довольно невысока - температура плавления высокомолекулярного полиэтилена составляет $+90^{\circ}\text{C}$. Такие изделия характеризуются высокой износостойкостью и положительной плавучестью, сохраняя свои свойства при температуре до -150°C .

На основе полиэтилена было создано синтетическое волокно, получившее название Дакрон (Dakron), а синтетическое арамидное волокно стало выпускаться под маркой Кевлар (Kevlar). Кевлар как материал по всем основным показателям превосходит Дакрон, но, при этом, обладает все же двумя существенными недостатками - высокой стоимостью и высокой жесткостью. По своим характеристикам материя крепче и прочнее металла, при этом она очень тонкая и легкая. Кевларовая нить (рис.4) прочнее стали в 5 раз [5].



Рис. 4. Кевларовая нить

В настоящее время предпочтение отдается новому материалу Дунеета – полиэтилену сверхвысокой молекулярной массы (рис. 5), который обладает высокой прочностью на разрыв, растяжение; высокой стойкостью к атмосферным воздействиям; низкими затратами на техническое обслуживание и длительным сроком службы.



Рис. 5. Дунеета

Полипропилен. Это пластмасса, один из самых популярных термопластичных полимеров в мире, востребована в десятках отраслей промышленности и производства. Востребованность пластика обусловлена универсальностью своих качеств и общей долговечностью, стойкостью к климатической и химической агрессии. Он достаточно легкий и при этом прочный. В зависимости от технологии полимеризации при его производстве полипропилен может получать различные свойства и визуально заметные текстуры.

Ключевыми характеристиками полипропилена являются способность выдерживать значительные нагрузки при растяжении, оптимальная ударная вязкость и стойкость к усталости. Последнее качество означает, что полимер способен сохранять первоначальную форму даже при постоянном механическом воздействии.

Канаты, веревки и шпагаты из полипропилена обладают высокой прочностью и стойкостью к воздействию влаги, что позволяет использовать их в сфере судостроения и промышленного рыболовства.

Преимуществом канатно-веревочных изделий из полипропилена является низкая цена и незначительная усадка в воде благодаря отсутствию гигроскопичности. К достоинствам изделий можно также отнести низкий удельный вес и термостойкость. К недостаткам относят более низкие прочностные характеристики по сравнению с полиэстером и полиамидом, отсутствие устойчивости к ультрафиолету. При производстве, например, шнуров применяется полипропилен со свето-стабилизирующими добавками, повышающими устойчивость изделий к УФ излучению. [6]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Плетеные шнуры: материалы для изготовления. - URL [Электронный источник]: <https://petrokanat.ru/tech-spec/kanaty-i-shnury/pletenye-shnury-materialy-dlya-izgotovleniya/>;
2. Полиамиды. - URL [Электронный источник]: <https://castpolymer.ru/poliamids/>;
3. Полиэстер: описание материала - характеристики, плюсы и минусы. - URL [Электронный источник]: <https://fashion-fabric.ru/blog-news/polyester-chto-eto?ysclid=lly9mxgptl506751681>;
4. Капрон или полиэстер что лучше. - URL [Электронный источник]: <https://tulasprav.ru/articles/kapron-ili-poliester-chto-luchshe.html>;
5. Описание кевларовой нити. - URL [Электронный источник]: <https://gidpotkanyam.ru/kevlarovaya-nit.html?ysclid=llyd7600ht634849273>;
6. Полипропилен – свойства, применение и все, что нужно о нем знать. - URL [Электронный источник]: <https://www.products.pcc.eu/ru/blog/%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D0%B8%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%BF%D0%B8%D0%BB%D0%B5%D0%BD-%D1%81%D0%B2%D0%BE%D0%B9%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%B0-%D0%BF%D1%80%D0%B8%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5-%D0%B8/>

MODERN FILAMENT MATERIALS FOR COMMERCIAL FISHING GEAR

¹Pivovarova Yuliya Sergeevna, post-graduate student of the Department of Commercial Fishing;

²Nedostup Alexander Alekseevich, Associate Professor, Ph.D.,

Head of the Department of Commercial Fishing;

³Nasenzov Pavel Vladimirovich, Head of Laboratories of the Department of Commercial Fishing, Junior Researcher

^{1,2,3}Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia, e-mail: nedostup@klgtu.ru

The article describes the main modern chemical materials from which filamentous materials are currently made for the further production of threads, cords and ropes. These products are used for the manufacture of elements of commercial fishing gear. The optimal selection of material allows you to adjust to the tasks of a certain element of the fishing tool.

УДК 639.2

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ЗАКИДНОГО НЕВОДНОГО ЛОВА В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

¹Соколова Елена Валерьевна, канд. техн. наук,
доцент кафедры промышленного рыболовства

¹Калининградский государственный технический университет,
Калининград, e-mail: elena.sokolova@klgtu.ru

Приводится анализ состояния закидного неводного лова в Российской Федерации. Анализ проведён на основании нормативно-правовых актов Российской Федерации (правила рыболовства для рыбохозяйственных бассейнов Российской Федерации) и учебной литературы по теме исследования. Цель работы – определить техники закидного неводного лова и конструкции закидных неводов, которые применяются в рыбохозяйственных бассейнах Российской Федерации. Получен сравнительный анализ закидного неводного лова по рыбохозяйственным бассейнам Российской Федерации.

Конструкции закидных неводов и техника лова ими описаны отечественными учеными в области рыболовства. Например, труды В.Н. Войниканис-Мирского [1], В.Н. Мельникова и В.Н. Лукашова [2].

В СССР закидной неводной лов являлся одним из главных видов рыболовства во внутренних водоёмах и применялся в большинстве рек и озёр; в морском рыболовстве лов закидными неводами применялся в прибрежных зонах морей для лова косяков рыбы, собирающихся у берега моря илидвигающихся вдоль него [1].

Техника лова закидными неводами различается в зависимости от водоёма, Так техника лова в реках будет отличаться от техники лова в озёрах или в морях (прибрежной зоне). В зависимости от техники лова закидные невода имеют различную конструкцию (рис. 1). Равнокрылые закидные невода применяются в озёрном и морском рыболовстве; неравнокрылые закидные невода применяются в речном и морском рыболовстве.

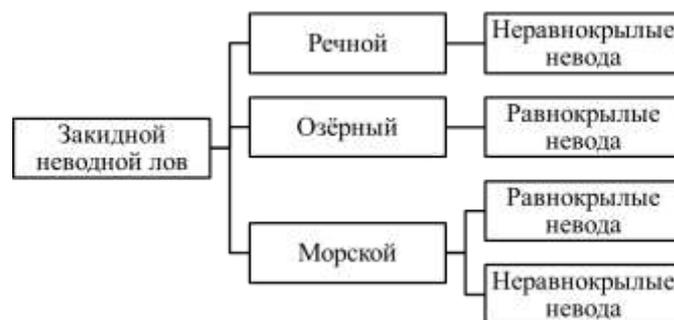


Рис. 1. Классификация закидного неводного лова по виду водоёма и конструкции

Также закидной неводной лов по периодичности его ведения подразделяется стационарный и перекидной (рис. 2). Стационарный лов подразделяется на постоянный (на тоне ведётся непрерывный лов на протяжении всей путины) и временный (лов на тоне ведётся в течение части путины). Перекидной (обтяжной) лов представляет собой один-два замёта на тоне [1].



Рис. 2. Классификация закидного неводного лова по продолжительности ведения

В Российской Федерации установлены восемь рыбохозяйственных бассейнов (рис. 3) [3] (таблица 1). Для каждого бассейна утверждены Правила рыболовства [4 - 11]. Правила рыболовства утверждаются приказом Минсельхоза России.



Рис. 3. Рыбохозяйственные бассейны Российской Федерации в соответствии с Федеральным законом Российской Федерации "О рыболовстве и сохранении водных биологических ресурсов"

Районами ведения закидного неводного лова [13, 14] являются низовья бассейна реки Енисей (во время летней путины для вылова проходной, полупроходной и подверженной местным миграциям рыбы), водоёмы Сибири, озёра Иркутской, Томской областей, Республики Бурятия, водоёмы Красноярского края, Чано-Барабинская система озёр, озеро Байкал, Куршский и Вислинский заливы Балтийского моря, Финский залив, Северный Каспий, озеро Судацье, р. Амур, Приморье, Баренцево море, Северный Сахалин, Охотское побережье (Де-Кастри), Республика Дагестан, реки Урал, Кигач, дельта реки Волги, реки Луга, Лена, Ангара, Обь, Дон.

Основные причины, обуславливающие малое использование закидных неводов: несовершенство их конструкций; утрачивание навыков их постройки; отсутствие средств механизации лова; нерациональные затраты времени и труда [13].

Соотнесение указанных районов с рыбохозяйственными бассейнами Российской Федерации приведено в таблице 2.

Таблица 1

Водные объекты Российской Федерации, в которых ведется закидной неводной лов

Рыбохозяйственный бассейн	Водный объект	Техника лова	Конструкция невода
Азово-Черноморский рыбохозяйственный бассейн	р. Дон	Речной лов	Неравнокрылые невода
Байкальский рыбохозяйственный бассейн	Озера Иркутской области	Озерный лов	Равнокрылые невода
	Водоёмы Республики Бурятия	Озерный лов	Равнокрылые невода
	оз. Байкал	Озерный лов	Равнокрылые невода
Волжско-Каспийский рыбохозяйственный бассейн	Северный Каспий	Озерный лов	Равнокрылые невода
	Республика Дагестан	Морской лов	Неравнокрылые невода
	р. Кигач (Астраханская область)	Речной лов	Неравнокрылые невода
	Дельта р. Волги (Астраханская область)	Речной лов	Неравнокрылые невода
Дальневосточный рыбохозяйственный бассейн	Приморский край	Морской лов	Равнокрылые невода
	Северный Сахалин	Морской лов	Неравнокрылые невода
Западно-Сибирский рыбохозяйственный бассейн	Озера Томской области	Озерный лов	Равнокрылые невода
	Водоёмы Красноярского края	Озерный лов	Равнокрылые невода
	Чано-Барабинская система озёр (Новосибирская обл.)	Озерный лов	Равнокрылые невода
	р. Енисей	Речной лов	Неравнокрылые невода
	р. Обь	Речной лов	Неравнокрылые невода
Западный рыбохозяйственный бассейн	Куршский залив Балтийского моря	Озерный лов	Равнокрылые невода
	Вислинский залив Балтийского моря	Озерный лов	Равнокрылые невода
	Финский залив	Озерный лов	Равнокрылые невода
	оз. Судацье (Ленинградская обл.)	Озерный лов	Равнокрылые невода
	р. Луга (Ленинградская обл., Новгородская обл.)	Речной лов	Неравнокрылые невода
Северный рыбохозяйственный бассейн	Баренцево море	Морской лов	Равнокрылые невода

Таким образом, речной лов ведется в Азово-Черноморском, Волжско-Каспийском, Западно-Сибирском и Западном бассейнах. Озёрный лов ведется в Байкальском, Волжско-Каспийском, Западно-Сибирском, Западном бассейнах. Морской лов ведется в Волжско-Каспийском, Дальневосточном и Северном бассейнах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Войниканис-Мирский, В.Н. Техника промышленного рыболовства : учебник : [в 2ч.] / В.Н. Войниканис-Мирский. - Москва : Пищевая промышленность, 1969. - Текст : непосредственный. Ч. 2: Орудия и способы промышленного рыболовства. - Изд. 3-е, доп. и перераб. - 1969. – 455 с.
2. Мельников, В.Н. Техника промышленного рыболовства : учебник / В.Н. Мельников, В.Н. Лукашов. - Москва : Легкая и пищевая промышленность, 1981. - 310 с.
3. Федеральный закон от 20.12.2004 N 166-ФЗ (ред. от 29.12.2022) "О рыболовстве и сохранении водных биологических ресурсов" (с изм. и доп., вступ. в силу с 30.03.2023). Рыбохозяйственные бассейны включают в себя моря и озера с бассейнами впадающих в них рек, а также иные водные объекты рыбохозяйственного значения.
4. Приказ Минсельхоза России от 09.01.2020 N 1(ред. от 02.03.2023) "Об утверждении правил рыболовства для Азово-Черноморского рыбохозяйственного бассейна" (Зарегистрировано в Минюсте России 12.03.2020 N 57719) URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_347819/2b44a0484d6c9fda682a426cfcfc4c0a7f534b38/ (дата обращения 11.07.2023).
5. Приказ Минсельхоза России от 24.04.2020 N 226 (ред. от 22.07.2022) "Об утверждении правил рыболовства для Байкальского рыбохозяйственного бассейна" (Зарегистрировано в Минюсте России 09.10.2020 N 60326). URL : https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_365042/ (дата обращения 11.07.2023).
6. Приказ Минсельхоза России от 13.10.2022N 695 "Об утверждении правил рыболовства для Волжско-Каспийского рыбохозяйственного бассейна" (Зарегистрировано в Минюсте России 29.11.2022N 71185). URL : https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_432720/ (дата обращения 11.07.2023).
7. Приказ Минсельхоза России от 26.06.2020 N 347 "Об утверждении правил рыболовства для Восточно-Сибирского рыбохозяйственного бассейна" (Зарегистрировано в Минюсте России 15.07.2020 N 58954).URL : http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_357707/ (дата обращения 11.07.2023).
8. Приказ Минсельхоза России от 06.05.2022N 285 (ред. от 10.03.2023) "Об утверждении правил рыболовства для Дальневосточного рыбохозяйственного бассейна" (Зарегистрировано в Минюсте России 01.06.2022N 68693). URL : https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_418287/2ff7a8c72de3994f30496a0ccbb1ddafdadff518/ (дата обращения 11.07.2023)
9. Приказ Минсельхоза России от 30.10.2020 N 646 (ред. от 21.02.2022) "Об утверждении правил рыболовства для Западно-Сибирского рыбохозяйственного бассейна" (Зарегистрировано в Минюсте России 16.03.2021N 62767). URL : https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_379425/a24338e38a941a53cef9e06c80f7d28293714693/ (дата обращения 11.07.2023).
10. Приказ Минсельхоза России от 21.10.2020 N 620 "Об утверждении правил рыболовства для Западного рыбохозяйственного бассейна" (Зарегистрировано в Минюсте России 03.03.2021N 62649). URL : https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_378456/d53460e9e6f6e1bda9859cd9186f860cdf36b02/ (дата обращения 11.07.2023).
11. Приказ Минсельхоза России от 13.05.2021N 292(ред. от 28.02.2022) "Об утверждении правил рыболовства для Северного рыбохозяйственного бассейна" (Зарегистрировано в Минюсте России 31.05.2021N 63687). URL : http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_385323/98ecaacc51be0b6c997df5b3519a9394c10401d4/ (дата обращения 11.07.2023).
13. Конструирование закидного невода для рыболовства в условиях Восточной Сибири: производственно-практическое издание. – Тюмень: ФГУП Госрыбцентр, 2010. – 69 с.
14. Андреев, Н.Н. Справочник по орудиям лова, сетеснастным материалам и промысловому снаряжению / Н.Н. Андреев. - Москва : Пищепромиздат, 1962. – 503 с.

ANALYSIS OF THE STATE OF SEINE FISHING IN THE RUSSIAN FEDERATION

¹Sokolova Elena Valer'evna, Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of the Department of Industrial Fisheries

¹Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia, e-mail: elena.sokolova@klgtu.ru

The article provides an analysis of the state of seine fishing in the Russian Federation. The analysis was carried out on the basis of regulatory legal acts of the Russian Federation (fishing rules for fishery basins of the Russian Federation) and educational literature on the subject of the study. The purpose of the work is to determine the techniques of seine fishing and seine designs that are used in the fisheries basins of the Russian Federation. A comparative analysis of seine fishing by fishery basins of the Russian Federation has been obtained.

УДК 5995

АНАЛИЗ ПРОМЫСЛОВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В КУРШСКОМ ЗАЛИВЕ И ПОВЫШЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЫБОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

¹Цыцорина Вера Александровна, магистр 2 курс, специалист по учебно-методической работе Центра по обеспечению деятельности НМС РХ ФУМО СПО по УГПС КГТУ

¹Калининградский государственный технический университет,
Калининград, Россия, e-mail: vera.tsytsorina@klgtu.ru

Рыболовство одна из отраслей сельского хозяйства, играющая важную роль в становлении и развитии отечественного и международного рынка. На территории Калининградской области рыболовство играет важную роль, от бесперебойного функционирования и эффективности рыболовческих предприятий зависит снабжение населения продуктами рыбной промышленности. Данная продукция является источником белка, насыщенных жирных кислот и фосфора для человеческого организма, в связи с чем возрастает актуальность повышения показателей эффективности рыбодобывающих предприятий. В работе проанализирована промысловая деятельность в Куршском заливе и предложены пути повышения показателей эффективности рыбодобывающих предприятий.

ВВЕДЕНИЕ

В период 90-ых годов прошлого века рыбная промышленность в России стала приходить в упадок, на что повлияла приватизация рыбодобывающих предприятий и сокращение рабочих мест на этих предприятиях. В настоящее время современное промышленное рыболовство представляет собой сложную систему, в которую входят орудия промысла, промысловые суда, оснащённые промысловым оборудованием для работы с орудиями лова, приборами для поиска рыбы, приборами для контроля параметров орудий лова, автоматами и компьютерными системами, управляющими процессом лова рыбы и т. д.

Согласно статистике сайта Росрыболовства на период 10 июня 2020 года по стране добыча водных биологических ресурсов составила 2250,2тысяч тонн. Соответственно темп роста к аналогичным периодам 2019 года составляет 107,9 %. Для сравнения добыча водных биоресурсов на 2019 год – 4893 тыс. тонн, темп роста к аналогичному периоду 2018 года – 98,6%. Прибыль организаций рыболовной отрасли на период 10 июня 2020 года составила 37,6 млрд. рублей, а на 2019 год – 136 млрд. рублей.

ОБЪЕКТЫ ИСЛЕДОВАНИЯ

Деятельность рыбодобывающих предприятий в Куршском заливе.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

- 1) проанализировать промысловую деятельность в Куршском заливе;
- 2) оценить эффективность рыбодобывающего предприятия ООО «Артемида» Калининградской области;
- 3) дать предложения по повышению его показателей эффективности.

Для достижения целей бакалаврской работы необходимо решить следующие задачи:

- 1) собрать информацию о физико-географическом положении и гидробиологическом состоянии Куршского залива;
- 2) собрать данные и провести анализ эффективности на примере выбранного рыбодобывающего предприятия в Куршском заливе.

МЕТОДЫ ИСЛЕДОВАНИЯ

Анализ, синтез, классификация, обобщение.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСЛЕДОВАНИЯ

В Балтийское море впадает около 250 рек с годовым стоком почти 400 км³ (примерно 20 % составляет сток Невы). С мировым океаном его связывают так называемые Датские проливы – Зунд, Большой и Малый Бельты. Площадь Балтийского моря по разным источникам составляет от 372 до 419 тыс. км², объем – 21,5 тыс. км³. Его акватория вытянута в направлении с юго-запада на северо-восток и имеет сложную конфигурацию с открытым Гданьским заливом, более обособленными Рижским, Финским и Ботническим, с Переднепомеранской, Щецинской, Пуцкой, Вислинской и Куршской лагунами, с многочисленными фьордами и несколькими тысячами каменных островов и островков, образующих у берегов Швеции и Финляндии пояс шхер. Береговая линия, определяемая по сглаженным («генерализованным») контурам берегов, имеет протяженность около 8000 км, а с детальными измерениями заливчиков, бухточек и островков – более 20 тыс. км. Балтийское море относится к шельфовым морям – оно лежит на затопленной суше. Как и все шельфовые моря, Балтийское мелководно, его средняя глубина всего 51 м. Рельеф дна сложный, со своими «горами» – отмелями и «долинами» – впадинами. Самое глубокое место в Балтийском море – Ландсортская впадина, глубиной, по разным данным, от 459 до 470 м, лежит у побережья Швеции южнее Стокгольма [4].

Куршский залив в Калининградской области считается одним из высокопродуктивных водоемов [1]. Куршский залив расположен на юго-восточном побережье Балтийского моря. По форме он напоминает прямоугольный треугольник, с более широкой южной частью, постепенно к северу он сужается и переходит в узкий пролив, соединяющий водоем с морем в районе литовского порта Клайпеда. С западной стороны залив отделен от моря Куршской косой – узкой песчаной насыпью шириной до 4 км. Длина береговой линии Куршского залива – 611,8 км. Площадь зеркальной поверхности – 1584 км², примерно три четверти является российской акваторией. Восточная окраина Куршского залива более мелководна по сравнению с его западной частью. Средняя глубина залива 3,7 м, максимальная достигает 7,4 м в Клайпедском проливе. В этом же районе ведется искусственное углубление дна, достигающее 18 м [1].

Понятие «акватория» впервые используется для этого района. Изначально этот термин был употреблен для обозначения районов водохранилищ, которые периодически осушаются и затапливаются, имеют свойства и береговых, и аквальных экосистем, то есть достаточно тесную связь. Поэтому к исследуемому району термин «акватория» применяется, чтобы подчеркнуть тесную связь акватории и прибрежной территории Куршского залива как на уровне экосистем, так и на социально-экономическом [2].

Куршский залив представлен промежуточным бассейном – отстойник между стоком рек (площадь водосбора составляет 100458 км²) и Балтийским морем. Поэтому уровень воды определяется взаимодействием двух основных факторов – колебаниями уровня воды Балтийского моря и годовым поступлением стока с суши. Причем пресные воды, стекающие в течение года с суши, в четыре раза превышают объем морских, поступающих в залив (23,1 и 5,1 км³ соответственно). Объем воды в заливе – 6,2 км³, основная доля которой находится в южной части, где преобладают глубины от 4 до 6 м. Северная часть более мелководна, с глубинами до 2 м. Восточная окраина Куршского залива более мелководна по сравнению с его западной частью. Средняя глубина залива – 3,7 м, максимальная – достигает 7,4 м в Клайпедском проливе [1].

Куршский залив, будучи трансграничным водным объектом, неразрывно связан с прибрежной территорией, в особенности с дельтой реки Неман. На большей части прилегающих земель, где имеются обширные пойменные земли и множество каналов, имеются общие проблемы, связанные с особенностями хозяйственного использования и природными условиями акватории и прибрежной территории [2]. Кроме того, чрезмерная промысловая нагрузка, в первую очередь, на наиболее доступные ресурсы внутренних водоёмов и морского шельфа сопровождается снижением качества уловов из-за уменьшения доли наиболее ценных объектов, а временное ограничение или прекращение промысла далеко не всегда обеспечивает восстановление численности популяции. [5]

По классификации трофности водоемов залив находится в эвтрофном состоянии (концентрация хлорофилла от 10 до 100 мкг/л), а в летне-осенний период - гиперэвтрофным (среднее содержание хлорофилла более 100 мкг/л). Особенность гидрологического и гидрохимического режима залива определяют качественные и количественные параметры гидробионтов, обитающих в нем [3].

Зоопланктон залива представлен 136 видами и подвидами, относящимися к 60 родам. По видовому составу зоопланктон остается типично пресноводным, морские формы, встречаются только в северной его части, сильно подверженной влиянию соленых вод Балтийского моря. Средняя биомасса за весь вегетационный период колеблется от 0,2 до 3,22 г/м. Бентос в заливе в основном представлен пресноводными формами, за исключением северной его части. Основу биомассы бентоса составляют моллюски-69,2%, 17,0% - хирономиды, 11,8%-олигохеты. Среднегодовалая биомасса кормового бентоса составляет 21,2 г/м² из которой на хирономид приходится 12,8 г/м². По продуктивности зообентоса Куршский залив превосходит многие эвтрофные водоемы [3].

Структура ихтиоценоза Куршского залива является типичной для водоемов лагунного типа, здесь обитают туводные, проходные и речные виды рыб. Современный список включает 38 видов, относящихся к 15 семействам. В водах Куршского залива обитают европейская корюшка, судак, окунь, плотва, карась, лещ, рыбец, жерех, балтийский сиг. А также Куршский залив служит местом созревания судака [1].

Рыбец - проходной вид, обитающий в Балтийском море, нерестится в реках бассейна Куршского залива, главным образом в Немане и его притоках. Рыбец относится к наиболее ценным видам рыб Куршского и Вислинского залива. Сегодня запасы рыбака находятся в депрессивном состоянии в связи со строительством в 1960 г. Каунасской ГЭС, плотина которой перекрыла миграционные пути производителей в реки Неман, в результате чего 65% нерестилищ этого вида оказались затопленными водохранилищем, а другая часть нерестилищ в верхнем течении реки стала недоступна для производителей. В настоящее время специализированный лов рыбака запрещён [5].

Щука распространена по всей акватории Калининградской области. Основными местами обитания являются зарослевые участки прибрежной зоны залива, а также устья и русла рек. Являясь типичным хищником, щука как биологический мелиоратор занимает особое положение в экосистеме водоёмов региона [5].

Корюшка европейская обитает в Балтийском море, совершает нерестовые миграции через Куршский залив в реки, где и осуществляется ее воспроизводство. Она является ценным объектом промысла в Балтийском море. Период активного промысла корюшки длится всего 5-15 дней. Преднерестовый ход половозрелых особей из Балтийского моря по Клайпедскому проливу в Куршский залив начинается в конце ноября, достигает максимума во второй половине декабря-января и заканчивается обычно в конце февраля. Основная масса преднерестовой корюшки в зимние месяцы концентрируется в районах залива, расположенных севернее поселка Морское и устья реки Скирвит.

Первые правила рыболовства были утверждены в 1589 г. Достоверно известно, что размеры ячеи в орудиях лова, применяемых в Куршском заливе, установлены в Правилах рыболовства только в 1792 г., а промысловые размеры на рыб - в Правилах 1874 года, Правилами рыболовства допускалось применение орудий лова с минимальным размером ячеи в передней его части этого орудия лова 13 мм, в средней 10 мм, в кутце - любой размер (обычно использовалась дель с ячеей 5 мм), После Второй Мировой войны в заливе меры регулирования рыболовства менялись шесть раз, Правила рыболовства в заливе установлены в 1948 году [3].

Рыболовство в Калининградской области, как и во всех субъектах Российской Федерации, регулируется федеральными законами, нормативно-правовыми актами Россельхознадзора, Министерства сельского хозяйства Российской Федерации, Федерального агентства по рыболовству.

Прибрежное расположение региона у незамерзающего Балтийского моря позволяет развивать на ее территории инфраструктуру рыбопромышленного хозяйства, включая развитие рыбного промысла, переработку рыбной продукции, ремонт судов, развитие портового хозяйства и т. д. Особое значения для региона имеет прибрежное рыболовство, осуществляемое калининградскими рыбодобывающими компаниями [5].

Основным нормативно-правовым актом является Федеральный закон от 20.12.2004 N 166-ФЗ «О рыболовстве и сохранении водных биологических ресурсов» (с изъятиями и дополнениями).

В Федеральном законе ФЗ «О рыболовстве и сохранении водных биологических ресурсов» под водными биологическими ресурсами (водными биоресурсами) понимаются рыбы, водные беспозвоночные, водные млекопитающие, водоросли, другие водные животные и растения, находящиеся в состоянии естественной свободы (ст. 1). Под добычей (выловом) водных биоресурсов понимается изъятие водных биоресурсов из среды их обитания.

Рыболовство – это деятельность по добыче (вылову) водных биоресурсов и в предусмотренных Федеральным законом от 20.12.2004 N 166-ФЗ «О рыболовстве и сохранении водных биологических ресурсов» случаях по приемке, обработке, перегрузке, транспортировке, хранению и выгрузке уловов водных биоресурсов, производству рыбной и иной продукции из водных биоресурсов. Промышленное рыболовство - предпринимательская деятельность по поиску и добыче (вылову) водных биоресурсов, по приемке, обработке, перегрузке, транспортировке, хранению и выгрузке уловов водных биоресурсов, производству на судах рыбопромыслового флота рыбной и иной продукции из этих водных биоресурсов.

Организация лова делится на выездную и перекидную. Выездную форму применяют, когда рыбаки следуют за рыбой, когда рыбодобывающее судно нуждается в ежедневной очистке от наносов и, наконец, когда способ установки или условия лова требуют ежедневной выборки сетей (установка на якорях, глубоководная установка). Выездной лов является наиболее распространенной формой лова ставными сетями, которую применяют в Азовском, Черном, Баренцевом морях, на Дальнем Востоке, а также на водохранилищах. При выездном лове сетной порядок ежедневно поднимают и устанавливают заново, часто на новом месте. При перекидном лове порядок выставляют на часть путины и в зависимости от перемещения рыбы меняют место лова. Порядок ежедневно перебирают. Время от времени порядок выбирают для очистки сетей от зарастания и наносов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе анализа в данной работе мы сделали несколько важных выводов:

1) С 2014 по 2018 года была разработана и реализована программа господдержки в области рыболовства для рыбодобывающих предприятий. Эта программа немного, но помогла увеличить показатели добычи рыбы и улучшить перерабатывающую базу некоторых рыбопромышленных организаций;

2) В 2020 году собраны данные Росрыболовством по добыче водных биоресурсов в Куршском заливе. Статистика показала превышение общего допустимого улова и контрольных квот рыбодобывающими предприятиями, что привело к расторжению договоров пользования водными ресурсами на 2020 год;

3) На Куршском заливе занимаются добычей рыбы 12 рыбодобывающих микропредприятий. Среди них есть как индивидуальные предприниматели, так и коопхозы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голубкова Т.А. «Эколого-биологическая характеристика и динамика запаса судака Куршского залива Балтийского моря»: дис. канд. биол. наук / Т.А. Голубкова. – Калининград, 2003. – 144 с.;
2. Домина А.Ю. Виды использования и природные условия акватории Куршского залива и прибрежной территории / Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные и медицинские науки. 2019. № 1., 46–56 с.;
3. Осадчий В.К. «Регулирование рыболовства и стратегия использования рыбных ресурсов в Куршском заливе»: дис. канд. биол. наук / В. М. Осадчий. – Калининград, 2000. – 175 с.;

4. Природа Калининградской области. Водные объекты: [справочное пособие] / Ф.Е.Алексеев [и др.]; составитель: В.А. Медведев; фотографии Ю.Ф. Алексева [и другие]; Некоммерческий фонд социальных, культурных, образовательных и экологических проектов «Исток». – Калининград: Исток, 2015. – 104 с.: ил.,

5. Хайновский К.Б., Ульянов А.Г. Искусственное воспроизводство водных биологических ресурсов в Калининградской области: опыт, проблемы, перспективы / Труды ВНИРО, том 153, 2015 г.;

ANALYSIS OF FISHING ACTIVITIES IN THE CURONIA LAGO AND INCREASING THE EFFICIENCY INDICATORS OF FISHING ENTERPRISES

¹Tsytsorina Vera Alexandrovna, 2nd year master's degree

¹Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia, e-mail: vera.tsytsorina@klgtu.ru

Рыболовство - одна из отраслей сельского хозяйства, играющая важную роль в становлении и развитии отечественного и международного рынка. На территории Калининградской области рыболовство играет важную роль, от бесперебойного функционирования и эффективности рыбоводческих предприятий зависит снабжение населения продуктами рыбной промышленности. Данная продукция является источником белка, насыщенных жирных кислот и фосфора для человеческого организма, в связи с чем возрастает актуальность повышения показателей эффективности рыбоводческих предприятий. В данной работе проанализирована промысловая деятельность в Куришском заливе и предложены пути повышения показателей эффективности рыбоводческих предприятий.

**СЕКЦИЯ «РАДИОФИЗИКА, РАДИОТЕХНИКА
И ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ»
SECTION "RADIOPHYSICS, RADIO ENGINEERING
AND INFORMATION SECURITY"**

УДК 519.72

**РЕАЛИЗАЦИЯ ЖЕСТКОГО ДЕКОДИРОВАНИЯ
ПО АЛГОРИТМУ ВИТЕРБИ В СРЕДЕ MATHCAD**

¹Волхонская Елена Вячеславовна, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры судовых радиотехнических систем;

²Коротей Евгений Владимирович, доцент кафедры судовых радиотехнических систем

^{1,2}Балтийская государственная академия ФГБОУ ВО «КГТУ», Калининград, Россия,
e-mail: volkhonskaya_e@mail.ru; eugeny_korotey@mail.ru

В работе представлена имитационная модель жесткого декодера, функционирующего по алгоритму Витерби, разработанная в среде MathCAD. Работоспособность модели протестирована для случаев: отсутствия битовых ошибок, наличия однократных и двукратных ошибок. Показано, что для исправления однократных ошибок достаточно проанализировать возможные состояния кодера на данном и последующем такте, а для исправления двукратных ошибок требуется глубина анализа не менее 6.

Постановка задачи

Декодирование Витерби широко используется при реализации кодека двоичных сверточных кодов, которые находят широкое применение в системах спутниковой связи [1]. Предпочтение двоичных кодов перед недвоичными связано с большим энергетическим выигрышем кодирования при условии наличия в канале радиосвязи аддитивного белого гауссова шума. При этом реализация декодера получается относительно простой.

В основе алгоритма декодирования Витерби лежит использование принципа максимального правдоподобия [2]. При этом декодер может работать с сигналами с различным числом уровней квантования. Если сигнал имеет два уровня квантования (условно «0» и «1»), то говорят о жестком механизме декодирования, а если число уровней квантования превышает два, то говорят о мягком механизме декодирования [3]. Поскольку жесткое декодирование проще реализуется и на ПЛИС, и в программном варианте, то в рамках данной работы была рассмотрена реализация данного механизма декодирования.

Для возможности проверки адекватности работы выбранного механизма декодирования необходима совместная реализация алгоритмов кодирования и декодирования. Работа двоичного сверточного кодера может быть описана с использованием одного из следующих подходов: структурной схемой на базе применяемых порождающих полиномов, импульсной характеристикой кодера, диаграммой состояний регистра сдвига в составе кодера, древовидной диаграммой или решетчатой диаграммой кодера [3]. В рамках данной работы были использованы два подхода: импульсная характеристика кодера использовалась для реализации процедуры сверточного кодирования, а альтернативный подход в виде использования диаграммы состояний регистра сдвига кодера использовался в процедуре жесткого декодирования по алгоритму Витерби.

В качестве модели сверточного кодера был выбран несистематический сверточный кодер со скоростью кодирования $\frac{1}{2}$ и конструктивной длиной кода 3 [4]. В качестве входной битовой последовательности была использована псевдослучайная числовая последовательность, генерируемая встроенными функциями среды MathCAD.

В работе рассмотрена возможность реализации жесткого декодирования по алгоритму Витерби в среде MathCAD, а также проведена оценка качества функционирования построенного программного кода в зависимости от кратности битовой ошибки в принятой битовой последовательности и глубины анализа временной диаграммы работы кодера. Поскольку выбранный для реализации код имеет свободное расстояние равное 5, то кратность битовой ошибки не превышала 2.

Сверточное кодирование

Для построения несистематического сверточного кодера со скоростью кодирования $\frac{1}{2}$ и длиной кодового ограничения 3 была использована пара порождающих полиномов вида:

$$g_1(x) = 1 + x + x^2, \quad g_2(x) = 1 + x^2. \quad (1)$$

Структурная схема такого кодера имеет вид, показанный на рис. 1, а. Вид диаграммы состояний регистра сдвига в составе данного кодера приведен на рис. 1, б. Сплошными линиями отмечены переходы, связанные с поступлением на вход нулевого бита, а пунктирные линии – единичного бита. Над линиями переходов показаны генерируемые при этом пары битов сверточного кода.

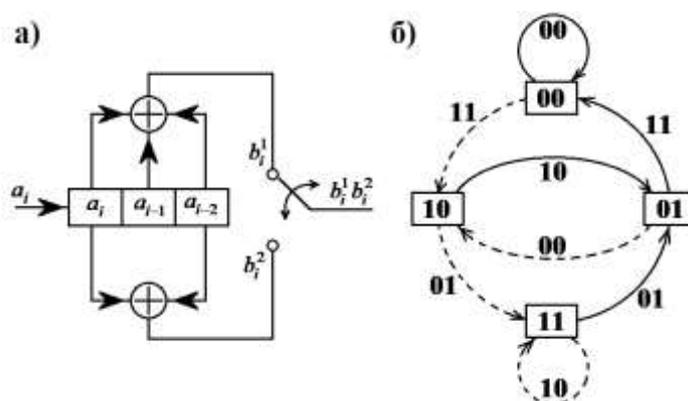


Рис. 1. Структурная схема (а) и диаграмма состояний (б) сверточного кодера

Проведя мысленный эксперимент, в ходе которого на вход данной схемы поступает битовая последовательность в виде единичного импульсного воздействия $\text{Imp} = (1 \ 0 \ 0 \ 0 \ \dots)$, нетрудно убедиться, что импульсная характеристика такого фильтра может быть описана следующей последовательностью ее отсчетов: $h = \{11 \ 10 \ 11 \ 00 \ \dots\}$.

Однако данная последовательность может быть получена и машинным способом с помощью следующего программного кода:

$$\begin{aligned} i &:= 0..n+2 & \text{Imp}_i &:= 0 & \text{Imp}_0 &:= 1 \\ h_{2i} &:= \text{Imp}_i + \begin{cases} \text{Imp}_{i-1} & \text{if } i \geq 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} + \begin{cases} \text{Imp}_{i-2} & \text{if } i \geq 2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \\ h_{2i+1} &:= \text{Imp}_i + \begin{cases} \text{Imp}_{i-2} & \text{if } i \geq 2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} & h &:= \text{mod}(h, 2) \end{aligned}$$

Рис. 2. Фрагмент программного кода по вычислению импульсной характеристики

Для генерации выходной последовательности пар битов была использована процедура свертки входной битовой последовательности $\{I_j\}$ и импульсной характеристики $\{h_j\}$ сверточного кодера, показанная на рис. 3.

$$i := 0..2 \cdot n + 5 \quad b_i := \sum_{j=0}^n \left(I_j \cdot \begin{cases} h_{i-2 \cdot j} & \text{if } i \geq 2 \cdot j \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \right) \quad b := \text{mod}(b, 2)$$

Рис. 3. Фрагмент кода, реализующий процедуру свертки

Сверточное декодирование

Суть алгоритма Витерби [4] сводится к последовательному анализу окон декодирования заданной длины, вычислению метрик всех возможных путей и сравнению всех метрик с целью выявления, так называемого выжившего пути, характеризующегося наименьшей метрикой. В случае использования двоичного симметричного канала связи в качестве метрики пути может использоваться расстояние Хемминга [3]. При этом важным вопросом является выбор длины анализируемых путей. В работе [5] указано, что при конструктивной длине кода $K \leq 9$ (что соответствует рассматриваемому кодеру) глубину анализа решетки декодера следует выбирать не менее $5 \cdot K$.

Для нахождения метрик путей программа должна иметь информацию о состоянии регистра на каждом такте работы и сопоставлять принятые пары битов с возможно переданными парами. Для реализации такой возможности были написаны процедуры определения условного состояния кодера при заданном состоянии на предыдущем такте работы s и поступившем на вход кодера бите b (рис. 4, а), а также генерируемой пары битов при переходе кодера из состояния $s1$ в состояние $s2$ (рис. 4, б). Поскольку число состояний и возможных переходов невелико, при написании процедур использовалось простое перечисление.

$$\begin{array}{l}
 \text{а)} \\
 \text{Sost}(s, b) := S \leftarrow \begin{cases} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} & \text{if } b=0 \quad \text{if } s = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} & \text{if } b=1 \end{cases} \\
 \\
 S \leftarrow \begin{cases} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} & \text{if } b=0 \quad \text{if } s = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} & \text{if } b=1 \end{cases} \\
 \\
 S \leftarrow \begin{cases} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} & \text{if } b=0 \quad \text{if } s = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} & \text{if } b=1 \end{cases} \\
 \\
 S \leftarrow \begin{cases} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} & \text{if } b=0 \quad \text{if } s = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} & \text{if } b=1 \end{cases} \\
 \\
 S
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{l}
 \text{б)} \\
 B(s1, s2) := \begin{cases} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} & \text{if } \left[s1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \wedge s2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right] \vee \left[s1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \wedge s2 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right] \\ \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} & \text{if } \left[s1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \wedge s2 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \right] \vee \left[s1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \wedge s2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right] \\ \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} & \text{if } \left[s1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \wedge s2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right] \vee \left[s1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \wedge s2 = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \right] \\ \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} & \text{if } \left[s1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \wedge s2 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right] \vee \left[s1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \wedge s2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right]
 \end{cases}
 \end{array}
 \end{array}$$

Рис. 4. Процедуры определения условного состояния кодера (а) и генерируемой пары битов (б)

Для реализации процедуры вычисления расстояния Хемминга была использована встроенная функция среды MathCAD $\text{mod}(x, 2)$, позволяющая вычислять остаток от деления переменной x на 2. Для выполнения данного действия над векторами данная процедура применялась по отношению к отдельным элементам суммы (рис. 5).

$$D(c, d) := \sum_{i=0}^1 \text{mod}(c + d, 2)_i$$

Рис. 5. Процедура определения расстояния Хемминга

Для анализа последовательности переходов заданной длины необходима возможность оценки состояния кодера на любом такте работы. Она может быть реализована с использованием

представленной на рис. 4 (а) функции $Sost(s, b)$, если ее применить в цикле, как это показано на рис. 6. При этом в качестве переменных используются начальное состояние кодера s и вектор a , задающий последовательность переходов.

$$Sostn(s, a) := \left| \begin{array}{l} S_0 \leftarrow s \\ n \leftarrow last(a) \\ \text{for } i \in 0..n \\ \quad S_{i+1} \leftarrow Sost(S_i, a_i) \\ S_{n+1} \end{array} \right.$$

Рис. 6. Процедура определения состояния кодера в результате последовательности переходов

Для реализации процедуры вычисления метрик всех возможных путей (как сумм расстояний Хемминга для всех ветвей, образующих данные пути) они были сведены в вектор-строку с 2^{p-1} элементами, где p – глубина анализа временной диаграммы. Каждому элементу данной матрицы соответствовала своя последовательность передаваемых битов, и метрики были расположены в строке в порядке убывания десятичного представления данных последовательностей: от 111...1 до 000...0. Для генерации данных последовательностей битов использовалась процедура представления десятичного числа x в двоичном виде с помощью k разрядов, приведенная на рис. 7. При этом старший разряд располагается слева, а младший – справа.

$$Code(x, k) := \left| \begin{array}{l} A_0 \leftarrow \begin{cases} 1 & \text{if } x \geq 2^{k-1} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \\ \text{for } i \in 1..k-1 \\ \quad A_i \leftarrow \begin{cases} 1 & \text{if } x - \sum_{n=0}^{i-1} (2^{k-1-n} \cdot A_n) \geq 2^{k-1-i} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \\ A \end{array} \right.$$

Рис. 7. Процедура определения двоичного представления натурального числа

Для вычисления метрик всех возможных путей (рис. 8) в цикле с помощью функции $Code(2^p - 1 - i, p)$ была осуществлена генерация соответствующих последовательностей передаваемых битов. Во вложенном цикле проводился анализ состояний кодера на каждом j -ом такте. При этом встроенная функция среды MathCAD $submatrix(a1, 0, j, 0, 0)$ задавала битовую последовательность для данного такта работы, функция $Sost(s_j, b1_j)$ определяла текущее состояние кодера, еще одна функция $submatrix(c, 2 \cdot j, 2 \cdot j + 1, 0, 0)$ извлекала из принятого вектора c пару битов для данного такта, а с помощью функции $D(B(s_j, s_{j+1}), d1_j)$ определялось расстояние Хемминга для данной ветви. Для подсчета метрики всего пути использовался простой счетчик, переменная M_i которого была обнулена в начале процедуры.

```

Mn(S, c, p) :=
  for i ∈ 0..2p - 1
    Mi ← 0
    s0 ← S
    for i ∈ 0..2p - 1
      a1 ← Code(2p - 1 - i, p)
      for j ∈ 0..last(a1)
        b1j ← submatrix(a1, 0, j, 0, 0)
        sj+1 ← Sostm(sj, b1j)
        d1j ← submatrix(c, 2 · j, 2 · j + 1, 0, 0)
        Mi ← Mi + D(B(sj, sj+1), d1j)
    MT

```

Рис. 8. Процедура вычисления метрик возможных путей

Из всех проанализированных путей выбирался тот, для которого метрика была наименьшей. При этом ситуация, при которой существует несколько таких путей, не являлась критической, так как в соответствии с правилом декодирования дополнительных исследований не требуется и может быть выбран любой из данных путей, например первый в списке. Процедура поиска данного пути показана на рис. 9.

```

Nm(a) :=
  Min ← min(a)
  for i ∈ 0..2p - 1
    if a0,i = Min
      Nm ← i
      break
  Nm

```

Рис. 9. Процедура поиска номера элемента с минимальной метрикой

Поскольку номеру элемента с минимальной метрикой однозначно соответствует переданная битовая последовательность, то процедура декодирования сводилась к разбиению всей принятой битовой последовательности на окна заданной длины, расчет метрик всех возможных путей, выбор элемента с минимальной метрикой, вычисления соответствующей ему битовой последовательности и сшивания всех найденных последовательностей в одну (рис. 10). Последняя процедура осуществлялась с помощью встроенной функции среды MathCAD *stack* ().

```

a2 :=
  S0 ←  $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ 
  for i ∈ 0..ceil $\left(\frac{n+1}{p}\right)$  - 1
    b1 ← submatrix(b, 2 · i · p, 2 · i · p + 2 · p - 1, 0, 0)
    D1 ← Mn(Si, b1)
    N ← Nm(D1)
    a1i ← Code(2p - 1 - N, p)
    Si+1 ← Sostm(Si, a1i)
  a2 ← a10
  for i ∈ 1..ceil $\left(\frac{n+1}{p}\right)$  - 1
    a2 ← stack(a2, a1i)
  a2

```

Рис. 10. Процедура декодирования по алгоритму Витерби

Оценка адекватности модели декодера

Для оценки адекватности модели были сформированы три последовательности принятых пар битов, соответствующие отсутствию ошибок в принятом потоке, наличию однократных и двукратных ошибок. Для создания соответствующих ошибок заданной кратности создавались вектора ошибок, и осуществлялось их сложение по модулю 2с закодированной последовательностью битов. Для исключения влияния вида информационной последовательности на результат декодирования в качестве таковой использовалась случайная последовательность 0 и 1, генерируемая с использованием встроенной функции среды MathCAD $runif(n, 0, 1)$ и функции округления результата $round(\)$.

В ходе модельного эксперимента глубина анализа временной диаграммы p выбиралась из диапазона от 2 до 7. По результатам декодирования осуществлялось сравнение декодированной и переданной битовых последовательностей (рис. 11).

$$\sum_{i=0}^n (I_i \oplus a2_i) =$$

Рис. 11. Процедура вычисления количества битовых ошибок

По результатам модельных исследований был сделан вывод о том, что при наличии однократных ошибок для безошибочного декодирования достаточно использовать глубину анализа $p = 2$, а при наличии двукратных ошибок глубина анализа должна составлять, по крайней мере, $p = 6$ (табл. 1). Данное значение несколько ниже указанного в работе [5]. Это различие может быть связано с тем, что в стандартной процедуре декодирования глубина анализа обычно выбирается так, чтобы образовывались пути, сходящиеся в одном узле диаграммы, а в построенной модели процедура анализа прерывалась вне зависимости от их появления.

Таблица 1

Зависимость среднего числа ошибок от глубины анализа

p	2	3	4	5	6	7
$n_{\text{ср}}$	26	28,2	9,4	5,7	0	0

Заключение

Таким образом, в работе показана возможность реализации процедуры жесткого декодирования по алгоритму Витерби в рамках среды MathCAD, проведена проверка адекватности работы построенной модели и уточнено значение глубины анализа временной диаграммы для сверточного кода с конструктивной длиной кода $K = 3$.

Работа выполнена в соответствии с тематическим планом кафедры судовых радиотехнических систем по инициативной прикладной научно-исследовательской работе (исследованию) на 2022–2023 г.г. по теме: 02-62-005.2 «Моделирование судовых радиотехнических систем и процессов их функционирования».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков Л. Н., Немировский М. С., Шинаков Ю. С. Системы цифровой радиосвязи: базовые методы и характеристики: Учеб. пособие. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 392с.
2. Перов А. И. Статистическая теория радиотехнических систем. Учебное пособие для вузов. – М.: Радиотехника, 2003, 400 с.
3. Канальное кодирование: часть 2// Банк лекций SIBLEC.RU. Электрон. дан. Режим доступа URL: <https://siblec.ru/telekommunikatsii/teoreticheskie-osnovy-tsifrovoj-svyazi/7-kanalnoe-kodirovanie-chast-2>(дата обращения 10.04.2023).
4. Морелос-Сарагоса Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение / пер. с англ В. Б. Афанасьева – М.: Техносфера, 2005. – 320 с.
5. Золотарев В. В., Овечкин Г. В. Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы: Справочник / Под ред. чл.-кор. РАН Ю. Б. Зубарева. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 126 с.

IMPLEMENTATION OF HARD DECODING USING THE VITERBI ALGORITHM IN MATHCAD

¹Volkhonskaya Elena Vyacheslavovna, Grand PhD in Engineering sciences,
the associate professor, the professor of department of ship radio engineering systems;

²Korotey Evgeniy Vladimirovich, the associate professor of department
of ship radio engineering systems

^{1,2}Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia,
e-mail: volkhonskaya_e@mail.ru; eugeniy_korotey@mail.ru

This paper presents a simulation model of a hard decoder operating according to the Viterbi algorithm, developed in the MathCAD environment. The operability of the model has been tested for the absence of bit errors, the presence of single and double errors. It is shown that to correct single errors, it is sufficient to analyze the possible states of the encoder at this and subsequent clock cycles, and to correct double errors, an analysis depth of at least 6 is required.

УДК 004.056

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ УРОВНЯ ЗАЩИЩЕННОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ПРИМЕНЯЕМЫХ В МОРСКИХ И РЕЧНЫХ ПЕРЕВОЗКАХ

¹Ефимов Алексей Олегович, адъюнкт

¹Воронежский институт МВД России, Воронеж, Россия, e-mail: ea.aleksei@yandex.ru

Рассматриваются вопросы оценки уровня защищенности автоматизированных систем, применяемых в морских и речных перевозках. Определены основные виды уязвимостей данных автоматизированных систем, а также специфика устранения уязвимостей. Дана характеристика степени влияния различного рода уязвимостей на защищенность автоматизированных систем. Определены основные факторы, влияющие на защищенность автоматизированных систем, применяемых на водном транспорте. Сделаны выводы о необходимости разработки набора организационных мер и политик безопасности, направленных на недопущение использования неустранимых уязвимостей возникающих при длительном отсутствии обновлений безопасности программного обеспечения.

Введение

Автоматизированные системы в транспорте нашли достаточно широкое распространение. И стоит отметить, что текущая логистическая сеть мира всецело построена на основе информационных систем и сетей связи. Это широкое распространение автоматизированных и информационных систем в данной сфере напрямую требует серьезного внимания к уровню защищенности используемых автоматизированных систем.

Отдельно можно определить две основных группы автоматизированных систем, применяемых в морских и речных перевозках:

1. Автоматизированные системы, работающие «на суше».
2. Автоматизированные системы, работающие «в море».

Основное их различие в том, что первые расположены в портах и иных административных зданиях (объектах) и, как правило, имеют полное необходимое сопровождение со стороны обслуживающего персонала, а также получают все необходимые обновления безопасности в кратчайшие сроки. Вторые в свою очередь расположены на судах, которые могут быть в информационной изоляции долгое время, в связи с чем устранение критических уязвимостей программного обеспе-

чения может не производиться, что может повлечь дополнительные риски для критически важного оборудования и программного обеспечения, к примеру, навигации, повреждение которых может серьезно затруднить работу.

Оценка уровня защищенности автоматизированных систем, применяемых в морских и речных перевозках, играет критическую роль в обеспечении безопасности, надежности и эффективности морского и речного транспорта. Можно выделить несколько основных направлений деятельности зависящих от защищенности автоматизированных систем:

1. Безопасность пассажиров и экипажа. Автоматизированные системы управления и навигации являются ключевыми компонентами для обеспечения безопасности передвижения судов. Оценка уровня защищенности позволяет выявить основные уязвимости и риски, связанные с возможными кибератаками или неполадками в системах, и предпринимать соответствующие меры для их устранения.

2. Предотвращение аварий и инцидентов. Скомпрометированные автоматизированные системы могут стать причиной аварий и инцидентов на водных путях. Кибератаки, вредоносные программы или ошибки в программном обеспечении могут привести к потере контроля над судном, столкновению с другими судами или другим неблагоприятным ситуациям.

3. Защита от киберугроз. Современные автоматизированные системы в морских и речных перевозках становятся все более связанными и зависимыми от интернета, что увеличивает уязвимость к кибератакам.

4. Защита от экономических потерь. Аварии, инциденты и кибератаки могут привести к серьезным экономическим потерям в морской и речной индустрии.

В итоге, оценка уровня защищенности автоматизированных систем в морских и речных перевозках является неотъемлемой частью обеспечения безопасности, надежности и эффективности транспортных операций. Она позволяет выявить и устранить риски, а также соответствовать стандартам и нормативам, что способствует успешной деятельности в этой важной области.

Уязвимости автоматизированных систем применяемых в морских и речных перевозках

В работе [1] определено, что уязвимость является неотъемлемой частью описания угрозы безопасности информации. Если не указать на наличие уязвимости, то описание способа реализации угрозы и сама угроза становятся неопределенными. Из этого следует, что реализация угроз возможна только при наличии неустраненных уязвимостей. Международный стандарт [2] определяет уязвимость как слабость актива или нескольких видов активов, которые могут быть использованы одной или несколькими угрозами. Это также подтверждает важность наличия уязвимости при реализации угроз информационной безопасности.

Для автоматизированных систем расположенным в портовой и иной стационарной инфраструктуре наибольшую опасность представляют уязвимости позволяющие получить удаленный доступ к системе посредством сетей связи, критичные уязвимости данного типа позволяют злоумышленникам удаленно нанести высокий ущерб. Но, данный вид автоматизированных систем не сильно отличается от остальных типов автоматизированных систем и их уязвимость и защищенность может рассматриваться как в работе [3].

Автоматизированные системы, расположенные на судах в чаще всего, обладают спецификой изолированности от широкополосных средств передачи информации и в следствии от своевременных обновлений безопасности. Это приводит к длительному использованию программного обеспечения с неустраненными уязвимостями и рядом возникающих рисков:

1. В случае информационного взаимодействия между информационными системами двух морских судов, могут возникать технические затруднения в связи с серьезным различием используемых версий программного обеспечения.

2. Повышается вероятность заражения и потери функционирования всей системы при использовании устаревшего программного обеспечения.

3. Злоумышленникам открывается доступ к удаленному управлению системы.

4. Уязвимости позволяющие влиять на функционирование сторонних программ (которые также обладают уязвимостями), позволяют собирать достаточно протяженный бэкдор для несанкционированного доступа.

Стоит отдельно обратить внимание на тот факт, что следует разделять функционирование автоматизированных систем на морских судах в зависимости от специфики работы: в случае нахождения вне линий связи, основной угрозой для безопасности являются действия внутреннего нарушителя, и защита должна строиться именно в целях недопущения вмешательства в работу системы в контуре корабля. При наличии широкополосной сети, система должна быть также достаточно защищена от внешнего нарушителя, при этом жизненно важные информационные системы должны быть защищены и изолированы от сетей общего использования (сети Wi-Fi пассажиров, сети информационно-справочных ресурсов судна и др.).

Устранение уязвимостей

Администраторы безопасности, как на морских судах, так и в рамках остальной инфраструктуры должны устранять уязвимости во всех программных системах и средствах, чтобы поддерживать безопасность перевозок.

Можно определить ряд мер позволяющих своевременно обнаруживать и устранять уязвимости [1-4]:

1. Проведение регулярных проверок и обновлений программного и аппаратного обеспечения, в целях установки последних исправлений и патчей безопасности.

2. Активный мониторинг сетевой активности и системных журналов для обнаружения потенциальных уязвимостей и инцидентов безопасности.

3. Определение установка и поддержание строгих политик безопасности на судне, включая ограничение прав доступа, многофакторную аутентификацию, шифрование данных и мониторинг пользовательской активности.

4. Обучение экипажа судна и персонала правилам информационной безопасности и основным методам защиты от угроз безопасности, чтобы повысить осведомленность о возможных угрозах информационной безопасности.

5. Проведение регулярных комплексных аудитов кибербезопасности на судне для выявления и устранения новых уязвимостей, а также оценки эффективности мер безопасности.

6. Взаимодействие с производителями судна и поставщиками IT-решений для своевременного получения информации о новых уязвимостях и рекомендациях по их устранению.

7. Самостоятельное отслеживание новых критических уязвимостей в базах данных уязвимостей.

Отдельно стоит отметить, процесс устранения уязвимостей непрерывен, и требует постоянного мониторинга и своевременного вмешательства [1-5].

Меры предупреждения эксплуатации уязвимостей

Основные меры предупреждения эксплуатации уязвимостей неоднократно рассматривались исследователями [1-11]. Отдельно остановимся на мерах, которые предлагается применять именно к судоходству в целях минимизации угроз безопасности с точки зрения уязвимостей:

1. Запрет выхода к сетевым соединениям в случае наличия достоверной информации о присутствии в системе высококритичных уязвимостей, до момента устранения этих уязвимостей.

2. Проведение обязательного аудита информационной безопасности по завершению взаимодействия со сторонними сетями связи (иных судов, портов, объектов прочей инфраструктуры).

3. Приоритет минимизации числа неустранимых уязвимостей, разработка запасных механизмов информационного взаимодействия в случае скомпрометированности основного используемого программного обеспечения.

4. Использование отдельных контуров связи критически важных систем. Выделение отдельного изолированного контура для пользования и личных нужд персонала и пассажиров.

5. Проведение оценки критичности уязвимостей в зависимости от текущего и планируемого состояния (расстановка приоритетов в течении маршрута по отношению к защите от внутреннего и внешнего нарушителей).

Вышеуказанные меры, конечно, не решают все возможные трудности, связанные с возможной эксплуатацией уязвимостей, но как минимум позволяют уменьшить влияние временного фактора, и фактора отсутствия постоянной широкополосной связи с сетью интернет. Данная тема может быть рассмотрена в качестве отдельного крупного исследования.

В дополнение к этому следует отдельно выделить современные технологии применимые в целях защиты от несанкционированного доступа, в первую очередь это технологии биометрической аутентификации, которые позволяют дополнительно разграничивать доступ, как к автоматизированному рабочему месту, так и в специализированное помещение [5].

Оценка уровня защищенности автоматизированных систем применяемых в морских и речных перевозках

Оценка уровня защищенности может строиться на базе оценки критичности уязвимости используемого программного обеспечения [1].

В случае оценки стационарных автоматизированных систем, можно руководствоваться методикой, построенной на основе стандарта CVSS [1, 3, 11].

В случае оценки уровня защищенности автоматизированных систем, расположенных на судах, рекомендуется учитывать ряд аспектов:

1. Оценка должна включать в себя приоритезацию устранения уязвимостей в зависимости от предполагаемого нарушителя.

2. При длительном отсутствии обновлений используемого программного обеспечения, оценка уровня защищенности должна производиться перед каждым взаимодействием с внешней информационной системой.

3. Уровень критичности уязвимостей достижимых только внутренним или только внешним нарушителем должен оцениваться по отдельности, для получения оценки, характеризующей опасность того либо иного нарушителя.

4. В случае отсутствия своевременных программных и компенсирующих мер защиты уровень защищенности должен оцениваться как низкий, и данный недостаток должен быть устранен в течении 24 часов [1, 3].

Порядок оценки уровня защищенности на основе уязвимостей производится следующим образом [1]:

В процессе анализа уязвимостей автоматизированной системы, первоначальным шагом является проведение сканирования и проверки баз данных уязвимостей. Данная процедура позволяет определить существующие уязвимости в системе.

После обнаружения уязвимостей осуществляется оценка их критичности. Как уже упоминалось, для морского судна дополнительно определяется отдельная оценка критичности уязвимости для внешнего и внутреннего доступа.

После проведения оценки критичности каждой уязвимости, производится сведение этих оценок в массив. Затем, среди всех уязвимостей определяется элемент автоматизированной системы, обладающий уязвимостью с наибольшей критичностью.

На основе показателя критичности этой уязвимости проводится общая оценка уровня защищенности автоматизированной системы. Данная оценка позволяет определить степень защиты системы и необходимость принятия соответствующих мер по устранению уязвимостей и повышению уровня защиты.

Заключение

Обеспечение достаточного уровня защищенности автоматизированных систем, применяемых в морских и речных перевозках, является неотъемлемой частью их эксплуатации. Уязвимости, которые могут существовать в этих системах, представляют потенциальные угрозы для безопасности и эффективности перевозок. Однако, с помощью устранения уязвимостей, принятия мер предупреждения и оценки уровня защищенности, можно сделать автоматизированные системы более надежными и защищенными. Это требует совместных усилий со стороны разработчиков, операторов и пользователей данных систем, а также постоянного мониторинга и обновления в соответствии с появляющимися угрозами и технологиями.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод о необходимости разработки набора организационных мер и политик безопасности, направленных на недопущение использования неустранимых уязвимостей возникающих при длительном отсутствии обновлений безопасности программного обеспечения из-за нахождения морского судна в длительном плавании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Концептуальные основы оценки уровня защищенности автоматизированных систем на основе их уязвимости / А. О. Ефимов, И. И. Лившиц, Т. В. Мещерякова, Е. А. Рогозин // Безопасность информационных технологий. – 2023. – Т. 30, № 2. – С. 63-79. – DOI 10.26583/bit.2023.2.04. – EDN LGPQZR.
2. ГОСТ Р ИСО/МЭК 13335-1-2006 Информационная Национальный стандарт Российской Федерации. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Часть 1. Концепция и модели менеджмента безопасности информационных и телекоммуникационных технологий.
3. К вопросу оценки защищенности автоматизированных систем по критичности их уязвимостей / А. О. Ефимов, А. В. Калач, А. Д. Попов [и др.] // Вестник Воронежского института ФСИИ России. – 2023. – № 2. – С. 50-56. – EDN OBUGGF.
4. Методика оценки уровня критичности уязвимостей программных, программно-аппаратных средств: утв. ФСТЭК России 28 октября 2022г.: Методический документ ФСТЭК России от 28.02.2022г.
5. Ефимов, А. О. Меры защиты планшетных компьютеров, осуществляющих обработку конфиденциальной информации, от несанкционированного доступа / А. О. Ефимов, Т. В. Мещерякова, Е. А. Рогозин // Вестник Воронежского института МВД России. – 2023. – № 2. – С. 31-38. – EDN AYXGAD.
6. К вопросу о совершенствовании методического обеспечения разработки модели угроз безопасности информации на этапе создания информационной системы / О. С. Авсентьев, В. В. Бутов, В. Н. Пржегорлинский, М. В. Бутова // Вестник Воронежского института МВД России. – 2023. – № 2. – С. 20-30. – EDN YXGKWC.
7. Россихина, Л. В. Алгоритм оценки эффективности мер по снижению рисков информационной безопасности / Л. В. Россихина, А. В. Калач, А. П. Сидельников // Вестник Воронежского института МВД России. – 2023. – № 2. – С. 79-86. – EDN REDYPH.
8. К вопросу об обновлении базового комплекта информационной безопасности в защищенных автоматизированных системах ОВД / А. О. Ефимов, А. В. Калач, В. Р. Романова [и др.] // Вестник Воронежского института ФСИИ России. – 2022. – № 4. – С. 56-60. – EDN BRRGJP.
9. Щеглов К. А. Защита от атак на уязвимости приложений. Модели контроля доступа / К. А. Щеглов, А. Ю. Щеглов // Вопросы защиты информации. – 2013. – № 2(101). – С. 36-43.
10. Аветисян А. И. Технологии статического и динамического анализа уязвимостей программного обеспечения / А. И. Аветисян, А. А. Белеванцев, И. И. Чукляев // Вопросы кибербезопасности. – 2014. – № 3(4). – С. 20–28.
11. Дойникова Е.В. Чечулин А.А., Котенко И.В. Оценка защищенности компьютерных сетей на основе метрик CVSS. Информационно-управляющие системы. 2017, № 6(91), с. 76–87. DOI: <http://dx.doi.org/10.15217/issn1684-8853.2017.6.76>. – EDN: ZXWUWH

ON THE ISSUE OF ASSESSING THE LEVEL OF SECURITY OF AUTOMATED SYSTEMS USED IN SEA AND RIVER TRANSPORTATION

Efimov Aleksey Olegovich, post-graduate cadet

Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia,
Voronezh, Russia, e-mail: ea.aleksei@yandex.ru

The article discusses the issues of assessing the level of security of automated systems used in sea and river transportation. The main types of vulnerabilities of these automated systems are identified, as well as the specifics of eliminating vulnerabilities. The characteristic of the degree of influence of various kinds of vulnerabilities on the security of automated systems is given. The main factors affecting the security of automated systems used in water transport are determined. Conclusions are drawn about the need to develop a set of organizational measures and security policies aimed at preventing the use of unresolved vulnerabilities arising from the prolonged absence of software security updates.

ФАКТОР НЕОДНОЗНАЧНОСТИ ПРИ ОПТИМАЛЬНОЙ ОБРАБОТКЕ СОВОКУПНОСТИ СИГНАЛОВ

¹Пахотин Валерий Анатольевич, д-р физ.-мат. наук, профессор,
профессор Института высоких технологий;

²Бессонов Владимир Александрович, канд. физ.-мат. наук, доцент,
доцент Института высоких технологий;

³Власова Ксения Валерьевна, канд. физ.-мат. наук,
доцент кафедры судовых радиотехнических систем

^{1,2}Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия,
e-mail: VPakhotin@kantiana.ru

³Балтийская государственная академия ФГБОУ ВО «КГТУ», Калининград, Россия
e-mail: p_ksenia@mail.ru

Рассмотрен фактор неоднозначности решений статистических задач радиотехники, выявленный при анализе поверхности функции правдоподобия. Он связан с наличием большого количества локальных максимумов, в разрезе функции правдоподобия по параметру – время приема сигналов. В результате минимизация функции потерь в методе максимального правдоподобия оказывается сложной. Вместо глобального максимума функции правдоподобия, определяющего оценки параметров совокупности сигналов, можно получить решение на уровне локальных максимумов. Для исключения неоднозначности предлагается использовать подстановку Хелстрема.

Введение

При решении статистических задач в радиотехнике методом максимального правдоподобия, основой является минимизация функции риска [1, 3÷8]

$$\tilde{r} = \int_0^T |\bar{\lambda} - \hat{\lambda}'|^2 P\left(\frac{Y_0^t}{\bar{\lambda}}\right) d(Y_0^t), \quad (1)$$

где $\bar{\lambda}$ – вектор параметров сигналов, содержащихся в реализации;

$\hat{\lambda}'$ – вектор оценочных параметров сигналов, содержащихся в реализации;

$P\left(\frac{Y_0^t}{\bar{\lambda}}\right)$ – условная плотность распределений реализаций Y_0^t при условии, что передается вектор параметров сигналов $\bar{\lambda}$.

Условная плотность реализации является функцией правдоподобия $P\left(\frac{Y_0^t}{\bar{\lambda}}\right) = L(\bar{\lambda}')$, которая зависит от оцениваемых параметров сигналов. Минимизация функции риска связана с максимизацией функции правдоподобия. В точке максимума функции правдоподобия оценивается неизвестный вектор параметров сигналов $\bar{\lambda}'$, при этом функция риска оказывается минимальной. Функция правдоподобия представляет собой поверхность в многомерном пространстве неизвестных параметров сигналов. При наличии на ее поверхности локальных максимумов появляется вероятность оценки параметров сигналов по одному из локальных максимумов вместо глобального максимума. Эта вероятность увеличивается при уменьшении отношения сигнал/шум. Возникает вопрос о неоднозначности решения задачи оценки вектора параметров сигналов. Требуется обеспечение полноты области оценок параметров, в которой находится решений. На практике полнота указанной области не всегда очевидна. Анализ поверхности функции правдоподобия показал, что в ее разрезах по временам приема сигналов имеется большое количество локальных максимумов с периодичностью появления, определяемой выражением $\omega \Delta t_0 = n\pi$. Для исключения фактора неоднозначности при решении статистических задач в радиотехнике предлагается подстановка Хелстрема [2]. Она связана с дифференцированием функции правдоподобия по неизвестным па-

раметрам и приравнинивании дифференциалов к нулю. В этом случае можно получить систему уравнений правдоподобия и решить ее относительно комплексных амплитуд. Полученные в результате этого функциональные зависимости подставляются в функцию правдоподобия вместо неизвестных амплитуд сигналов. В результате локальные максимумы практически полностью исчезают. Таким образом, целью настоящей работы является анализ влияния фактора неоднозначности при решении статистических задач в радиотехнике.

Основы теории

Рассмотрим вначале случай, когда в реализации содержится один сигнал и аддитивный шум. Принятая реализация будет определена выражением

$$\hat{y}(t) = \hat{U}_0 \exp(i\omega(t - t_0)) + \hat{U}_{ш}(t), \quad (2)$$

где \hat{U}_0 – комплексная амплитуда сигнала;

ω – круговая частота;

t_0 – время приема сигнала.

Запишем функцию правдоподобия в виде

$$L(\hat{U}_0, \hat{\omega}) = \exp\left(-\left(\int_{t_0}^{t_0+T} |\hat{y}(t) - \hat{U}_0 \exp(i\hat{\omega}(t - t_0))|^2 dt\right)\right). \quad (3)$$

Функция правдоподобия представляет собой поверхность в многомерном пространстве оценок параметров сигналов. Следовательно, ее можно представлять в виде разрезов по какой-либо координате – параметру сигнала. В этом случае все остальные параметры сигналов будем считать известными. Они подставляются в функцию правдоподобия. Будем считать время приема t_0 известным, и реализуем разрезы поверхности функции правдоподобия по переменным: амплитуда \hat{U}_0 , начальная фаза $\hat{\varphi}_0$, частота $\hat{\omega}$. Эти разрезы показаны на рис. 1. Максимумы функции правдоподобия в разрезах определяют оценки амплитуды ($U_0 = 1$), начальной фазы ($\varphi_0 = 50$ град) и частоты ($f = 50$ кГц). Значение максимума неизменно: 0,48. Следовательно, максимум функции правдоподобия является критерием отбора оценок параметров сигналов, таких как амплитуда, начальная фаза, частота. При известном времени приема сигнала, решение однозначное в связи с единственностью максимума функции правдоподобия.

Представим разрез функции правдоподобия по времени приема t'_0 . Остальные параметры функции правдоподобия будем считать известными

$$L(t'_0) = \exp\left(-\left(\int_{t_0}^{t_0+T} |\hat{y}(t) - \hat{U}_0 \exp(i\omega(t - t'_0))|^2 dt\right)\right), \quad (4)$$

где t'_0 – неизвестное время приема (остальные параметры сигнала известны).

В этом случае возможны случаи: на интервале обработки сигнала может не быть, сигнал лишь частично располагается на интервале обработки, сигнал полностью располагается на интервале обработки. Характерной особенностью является большое количество локальных максимумов. Положение глобального максимума определяет оценку времени приема 0,4 мс. Периодичность изменений значений функции правдоподобия определяется выражением $\omega \Delta t_0 = n\pi$.

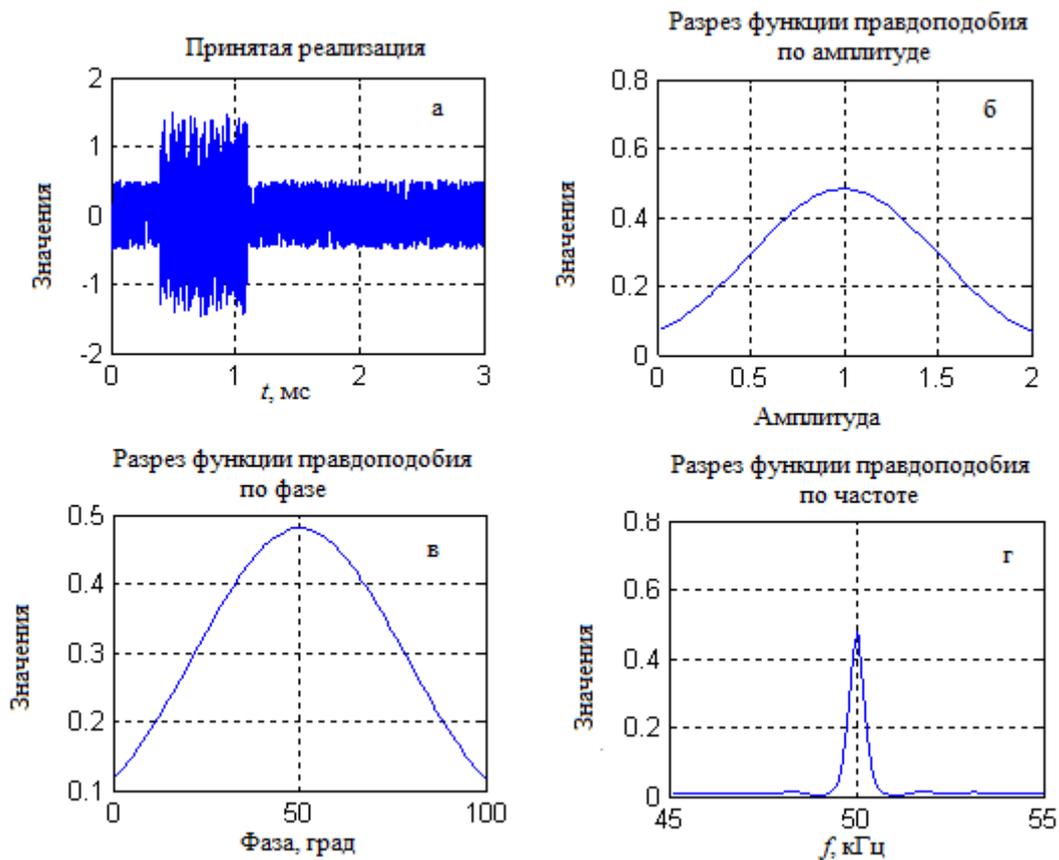


Рис. 1. Принятая реализация (а), разрезы поверхности функции правдоподобия по амплитуде (б), начальной фазе (в) и частоте (г)

Периодичность изменений функции правдоподобия объясняется следующим. Амплитуда копии сигнала должна быть функцией от времени. На интервале, где нет сигнала, амплитуда копии сигнала должна быть равна нулю. На интервале, где копия частично совпадает с сигналом, амплитуда должна увеличиваться и лишь на интервале, где копия и сигнал совпадают, амплитуда должна быть равной амплитуде сигнала.

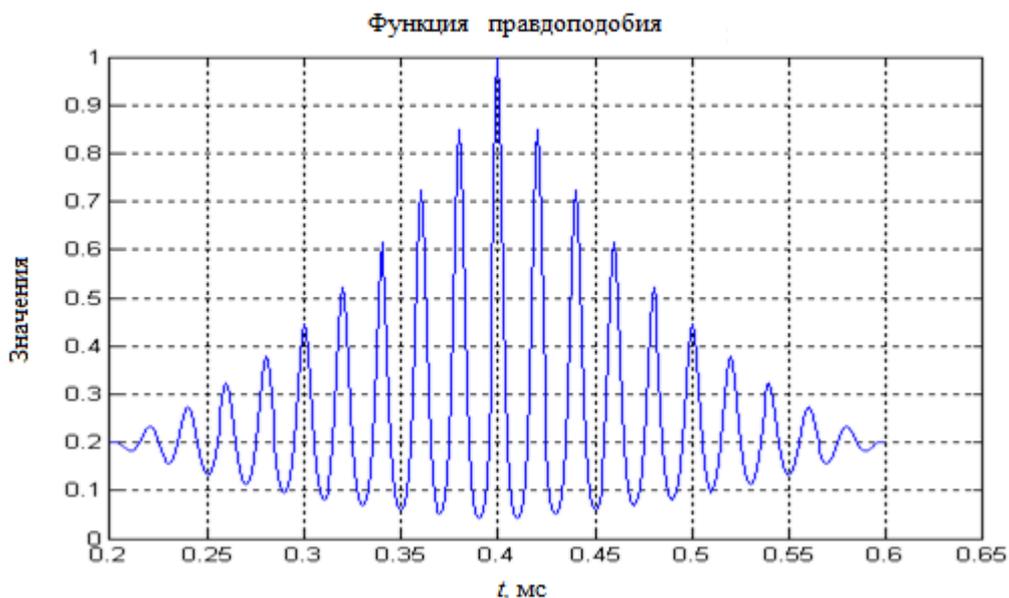


Рис. 2. Разрез функции правдоподобия по времени приема t_0 при известных остальных параметрах сигнала

Возникает вопрос о неоднозначности решения задачи оценки времени приема. Если не обеспечена полнота области оценок параметров сигналов, тогда можно получить ложное решение, связанное с одним из локальных максимумов. При использовании метода перебора, полнота области оценок параметров обеспечивается автоматически, если область включает в себя точку глобального максимума. Если использовать различные градиентные методы нахождения глобального максимума функции правдоподобия, то можно получить ложное решение. В настоящее время известны лишь два метода, которые могут найти глобальный максимум функции правдоподобия в таких условиях. Это «метод генетического алгоритма» и «метод отжига». Однако при использовании этих методов возникают вопросы полноты области оценок параметров. Для исключения ложных максимумов на поверхности функции правдоподобия предлагается подстановка Хелстрема. В связи с наличием глобального максимума, функцию правдоподобия можно продифференцировать по амплитуде и дифференциал приравнять к нулю. Это обычный способ нахождения максимума. В результате получим уравнение правдоподобия. Его решение следующее

$$\frac{d(L(\hat{t}_0))}{d\hat{t}_0} = 0 \rightarrow \hat{U}_0(\hat{t}_0) = \frac{1}{T} \int_{\hat{t}_0}^{\hat{t}_0+T} \hat{y}(t) \exp(-i\omega(t - \hat{t}_0)) dt. \tag{5}$$

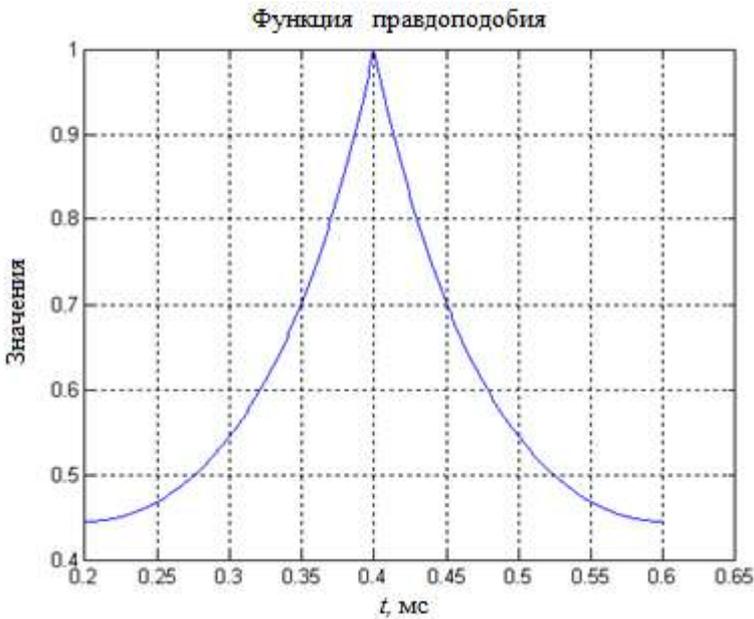


Рис. 3. Поверхность функционала правдоподобия с подстановкой Хелстрема для одного сигнала в реализации (время приема сигнала 0,4 мс)

Решение уравнения правдоподобия является одномерной поверхностью от оценки времени приема \hat{t}_0 . Оно также характеризуется периодичностью. Однако оно связано с информацией о сигнале, содержащейся в принятой реализации $\hat{y}(t)$. При подстановке (5) в функцию правдоподобия (4) (подстановка Хелстрема) периодичность исчезает (рис. 3). Хелстром в работе [10] лишь высказал предположение о возможности подстановки амплитуд, определенных из уравнений правдоподобия, в функцию правдоподобия. Проведенный анализ показал, что подстановка Хелстрема существенно меняет возможность решения статистических задач на основе функции правдоподобия. Без этой подстановки практически невозможно решать задачи при неизвестных временах приема (аналогично при неизвестных азимутах или углах места) методом максимального правдоподобия. В связи с важностью данного утверждения представим функцию правдоподобия для двух сигналов с неизвестными временами приема с подстановкой Хелстрема и без подстановки. Функция правдоподобия в этом случае зависит от двух времен приема \hat{t}_1 и \hat{t}_2 (6). Остальные параметры, в том числе и амплитуды, известны

$$\Delta(\hat{t}_1, \hat{t}_2) = \exp\left(-\left(\int_t^{t+T} |\hat{y}(t) - \hat{U}_1 \exp(i\omega(t - \hat{t}_1) - \hat{U}_2 \exp(i\omega(t - \hat{t}_2))|^2 dt\right)\right). \tag{6}$$

Для получения подстановки Хелстрема проинтегрируем (6) по амплитудам \hat{U}_1 и \hat{U}_2 и приравняем дифференциалы к нулю. Получим систему уравнений правдоподобия, решая которую можно получить

$$\begin{aligned} \hat{U}_1(\hat{t}_1, \hat{t}_2) &= \frac{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} \hat{y}(t) \exp(-i\omega(t-\hat{t}_1)) dt - \frac{\hat{R}(\hat{t}_1, \hat{t}_2)}{T} \int_t^{t+T} \hat{y}(t) \exp(-i\omega(t-\hat{t}_2)) dt}{1 - |\hat{R}(\hat{t}_1, \hat{t}_2)|^2}, \\ \hat{U}_2(\hat{t}_1, \hat{t}_2) &= \frac{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} \hat{y}(t) \exp(-i\omega(t-\hat{t}_2)) dt - \frac{\hat{R}^*(\hat{t}_1, \hat{t}_2)}{T} \int_t^{t+T} \hat{y}(t) \exp(-i\omega(t-\hat{t}_1)) dt}{1 - |\hat{R}(\hat{t}_1, \hat{t}_2)|^2}. \end{aligned} \quad (7)$$

Решения представляют собой функциональные зависимости и являются поверхностями в пространстве переменных \hat{t}_1, \hat{t}_2 . Подставляя эти выражения в (6), получим функцию правдоподобия с подстановкой Хелстрема, где исключен масштабирующий множитель

$$\Delta 1(\hat{t}_1, \hat{t}_2) = \exp\left(-\left(\int_t^{t+T} |\hat{y}(t) - \hat{U}_1(\hat{t}_1, \hat{t}_2) \exp(i\omega(t - \hat{t}_1)) - \hat{U}_2(\hat{t}_1, \hat{t}_2) \exp(i\omega(t - \hat{t}_2))|^2 dt\right)\right). \quad (8)$$

В дальнейшем выражение (8) будем называть преобразованной функцией правдоподобия, а соответствующий ей функционал – преобразованным функционалом правдоподобия. На рис. 4 показан разрез функции правдоподобия (7) по координатам: оценки времени приема \hat{t}_1 и \hat{t}_2 . Остальные параметры известны. В результате создается двумерная поверхность, глобальный максимум которой определяет оценки времени приема. Рисунок иллюстрирует большое количество локальных максимумов на поверхности функции правдоподобия. Найти глобальный максимум среди локальных максимумов представляет собой сложную алгоритмическую задачу. Однако более важным является то, что данная модель не соответствует участку реализации, где нет сигнала. В этом случае амплитуда сигналов должна быть в левой части функционала равной нулю. Амплитуда сигналов должна быть функцией времени приема.

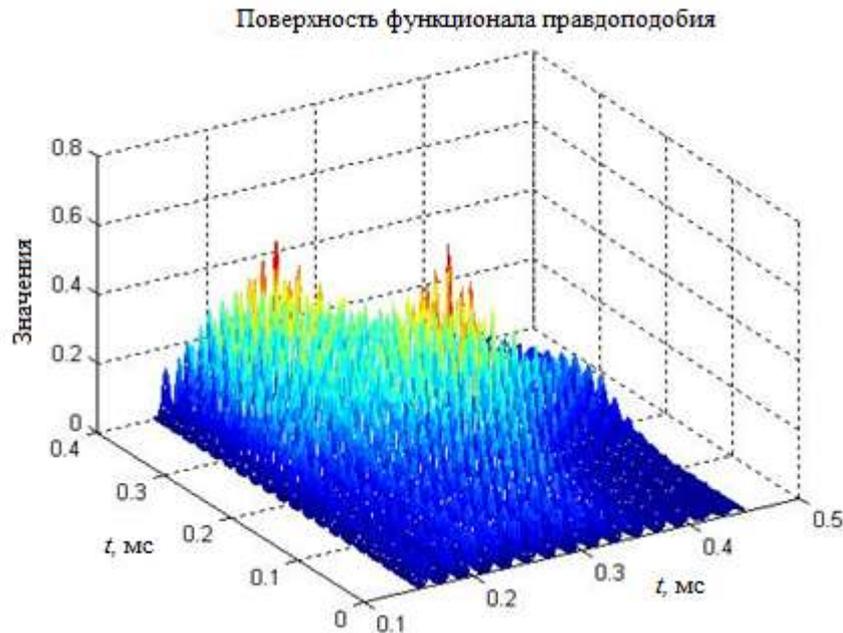


Рис. 4. Поверхность функционала правдоподобия – глобальный максимум основной и зеркальный определяют оценки времен приема $\hat{t}_1 = 0,2\text{мс}$ и $\hat{t}_2 = 0,3\text{мс}$

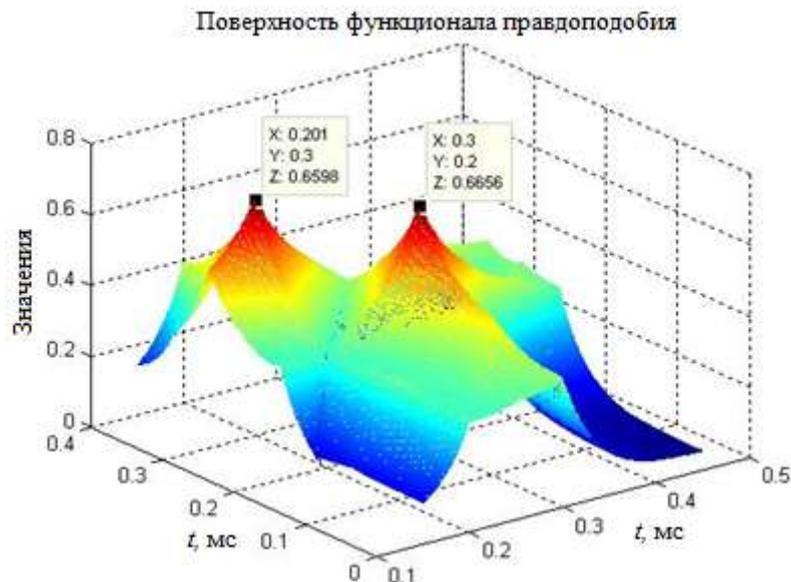


Рис. 5. Поверхность функции правдоподобия с подстановкой Хелстрорма

На рис. 5 показана поверхность функции правдоподобия, полученная с подстановкой Хелстрорма (8). Периодичность структуры поверхности исчезла полностью. Отмечаются два максимума: основной и зеркальный. Основной максимум определяет оценки времен приема сигналов t_1 и t_2 . Если эти оценки подставить в выражения (7), то можно получить оценки комплексных амплитуд сигналов. Задача оценки параметров двух сигналов оказывается полностью решенной. Рис. 5 получен при разности времен приема 0,1 мс. Следовательно, по сравнению с критерием Рэлея, разрешение увеличено в два раза.

Основные результаты

В настоящей работе анализ поверхности функции правдоподобия показал следующее.

1. При неизвестном времени приема поверхность функции правдоподобия содержит большое количество локальных максимумов и практически не может быть основой решения статистических задач.

2. При подстановке Хелстрорма локальные максимумы исчезают. Поверхность функции правдоподобия, а вместе с ней поверхность функционала правдоподобия и поверхность функционала отношений правдоподобия, становятся гладкими. Подстановка Хелстрорма полностью исключает влияние фактора неоднозначности на решение статистических задач в радиотехнике

3. При нахождении основного максимума функции правдоподобия решается задача оценки времен приема сигналов и задача разрешения сигналов по этим параметрам. Подстановка оценок времен приема в решения уравнений правдоподобия позволяет получить оценки комплексных амплитуд сигналов. Это в свою очередь дает возможность решить задачу раздельного обнаружения сигналов.

Литература

1. Перов А. И. Статистическая теория радиотехнических систем. Учебное пособие для вузов. – М.: Радиотехника, 2003, 400 с.
2. К. Хелстром Статистическая теория обнаружения сигналов: пер. с англ. Г. Ю. Кобзарева / под. Ред. Г. Ю. Кобзарева. – М.: изд-во Иностранной литературы, 1963. – 432с.
3. 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.
4. Ван Трис. Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции. Том 1. Теория обнаружения, оценок и линейной модуляции: перевод с англ. под ред. проф. В. И. Тихонова. – М.: «Советское радио», 1972. – 744 с.

5. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники: 3-е изд., перераб. И доп. – М.: Радио и связь, 1989. – 656 с.

6. Тихонов В. И. Оптимальный прием сигналов. – М.: Радио и связь, 1983. – 320 с.

7. Пахотин, В. А. Оптимальный прием сигналов с высоким разрешением / В. А. Пахотин, К. В. Власова, Р. В. Симонов, В. А. Бессонов, И. В. Либерман // Сборник трудов 21-ой Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2019». – М.: Московское НТО радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, 2020. – С. 331-336.

8. Пахотин, В. А. Технология обработки совокупности сигналов с высоким разрешением. / В. А. Пахотин, К. В. Власова, Р. В. Симонов, С. В. Петров // Сборник трудов 23-ей Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2021» – М.: Московское НТО радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, 2020. – М. 30-38.

AMBIGUITY FACTOR WITH OPTIMAL SIGNAL COLLECTION PROCESSING

¹Pakhotin Valery Anatolyevich, D., F.-M.S., professor;

²Bessonov Vladimir Alexandrovich, Ph.D., associate professor;

³Vlasova Ksenia Valerievna, Ph.D., associate professor

^{1,2}Federal State Educational Institution of Higher Education "Immanuel Kant Baltic Federal University" Kaliningrad, Russia, e-mail: VPakhotin@kantiana.ru

³Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia, e-mail: p_ksenia@mail.ru

The factor of ambiguity of solutions of statistical problems of radio engineering revealed during the analysis of the surface of the likelihood function is considered. It is associated with the presence of a large number of local maxima in the section of the likelihood function by the parameter: signal reception time. As a result, minimizing the loss function in the maximum likelihood method is difficult. Instead of the global maximum of the likelihood function, which determines the estimates of the parameters of the set of signals, a solution can be obtained at the level of local maxima. To eliminate ambiguity, it is proposed to use Helstrom substitution.

УДК 621.372.083.92(075.8)

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

¹Пахотин Валерий Анатольевич, д-р физ.-мат. наук, профессор,
профессор Института высоких технологий;

²Власова Ксения Валерьевна, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры судовых радиотехнических систем;

³Молостова Светлана Валерьевна, канд. физ.-мат. наук,
доцент Института высоких технологий

^{1,3}Балтийский Федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия,
e-mail: VPakhotin@kantiana.ru

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

Рассмотрены сравнительные возможности обработки сигналов операторными методами, методом максимального правдоподобия и методом, основанном на разностных уравнениях. Основное внимание обращено на возможность обработки сигналов в области высокой корреляции. Приводится доказательство утверждений: операторные методы являются частным случаем метода максимального правдоподобия; операторные методы обработки сигналов являются

оптимальными лишь в случае, когда в принятой реализации содержится один сигнал. Показано, что соотношение неопределенности в радиотехнике справедливо лишь в рамках операторных методов. В области, запрещенной соотношением неопределенности, решение может быть получено методами, основанными на разностных уравнениях и методом перебора параметров сигналов при анализе функции правдоподобия.

Введение

Развитие цифровых технологий обработки сигналов позволяет исследовать возможности решения статистических задач радиотехники в новых областях. Это относится, например, к области высокой корреляции сигналов, когда критерий Рэлея (соотношение неопределенности, функция неопределенности) не выполняется. В настоящее время в промышленности статистические задачи радиотехники, как правило, решаются в области, разрешенной критерием Рэлея [1-7]. Общим недостатком решений является ограниченность разрешения сигналов и наличие боковых лепестков спектральной (корреляционной, угловой спектральной) функции. Они ограничивают динамический диапазон раздельного обнаружения сигналов и приводят к систематическим интерференционным погрешностям в оценке параметров сигналов. В области, разрешенной критерием Рэлея, обработка сигналов производится операторными методами анализа: спектральным, корреляционным, угловым спектральным. В результате обработки можно получить функциональные зависимости, которые часто называют аппаратными функциями. Для разрешения аппаратных функций устанавливаются различные критерии: Рэлея (в оптике), основанный на функции неопределенности (в радиотехнике), соотношение неопределенности (в системах связи). Особенностью является то, что разрешение аппаратных функций остается конечным при отсутствии шума в реализации.

Возможности решения статистических задач радиотехники в области, запрещенной критерием Рэлея, являются сферой интенсивных исследований. Так, например, в [8] показана возможность сверхрэлеевского разрешения при спектральной обработке сигналов на основе разностных уравнений. Это методы Прони, предсказаний, «Music» и т.д. В работе [12] представлен обзор методов сверхразрешения. В работе [9] сверхразрешение получено на основе метода аналитического продолжения спектра. В работах [10, 11] сверхразрешение получено на основе сложных методов проективной геометрии. В работах БФУ им.И.Канта основой решения статистических задач радиотехники в области, запрещенной критерием Рэлея, является анализ поверхности преобразованной функции правдоподобия [13, 14]. В работе [2] вопросы разрешения решены на основе функции правдоподобия, уравнений правдоподобия. В работе [15] сверхразрешение сигналов получено на основе метода наименьших квадратов. Во всех этих работах разрешение сигналов получается бесконечно большим при отсутствии шума.

Таким образом, возникает противоречие. С одной стороны это наличие критериев, ограничивающих область решения. С другой стороны – возможность получения решения статистических задач в области высокой корреляции сигналов. Это противоречие, безусловно, должно быть разрешено. В настоящей работе рассматриваются три возможных метода обработки сигналов: операторный метод (реализуется без знания аналитической формы сигнала), метод, основанный на разностных уравнениях, разрешение сигналов в которых может быть бесконечно большим, и метод перебора при поиске максимума функции правдоподобия, разрешение в котором также может быть бесконечно большим (метод максимального правдоподобия). Последние два метода требуют знания аналитической формы сигнала. В связи с вышеизложенным, основной целью настоящей работы является анализ взаимосвязей указанных трех методов обработки сигналов, и обоснование возможности решения статистических задач радиотехники в области высокой корреляции сигналов.

Основы теории

К операторным методам обработки сигналов в радиотехнике относятся спектральный, корреляционный и угловой спектральный анализ. Для их реализации достаточно знать порождающую функцию. Соответственно: $e^{-i\omega t}$ для спектрального анализа, $e^{i\omega(t-t_0)}$ для корреляционного анализа (t_0 – время приема сигнала), $e^{i(\vec{k}\vec{r})}$ для углового спектрального анализа (\vec{k} – волновой вектор, \vec{r} – радиус вектор). Рассмотрим в качестве примера случай, когда в принятой реализации содержит-

ся два радиоимпульса с разными частотами и одинаковыми временами приема. Обозначим интервал биений частот $T1$, а длительность сигналов T . В этом случае соотношение неопределенности можно записать в виде

$$T1 = \frac{1}{\Delta f} \leq T. \quad (1)$$

При выполнении этого соотношения для спектров сигналов выполняется критерий Рэлея, и по максимумам спектров можно получить оценки частот и амплитуд сигналов. Если соотношение неопределенности не выполняется, тогда спектры сигналов сливаются в одну спектральную линию и оценить частоты сигналов невозможно. Следовательно, область решений, получаемая с помощью оператора «преобразование Фурье» имеет ограничение. Аналогичное ограничение можно получить в корреляционном анализе, в угловом спектральном анализе. Однако система уравнений, записанная в следующем виде

$$\begin{aligned} \hat{y}_n &= \hat{U}_1 e^{i\omega_1 t_n} + \hat{U}_2 e^{i\omega_2 t_n} + \hat{U}_{ш,n}, \\ \hat{y}_{n+1} &= \hat{U}_1 e^{i\omega_1 t_n + \Delta t} + \hat{U}_2 e^{i\omega_2 t_n + \Delta t} + \hat{U}_{ш,n+1}, \\ \hat{y}_{n+2} &= \hat{U}_1 e^{i\omega_1 t_n + 2\Delta t} + \hat{U}_2 e^{i\omega_2 t_n + 2\Delta t} + \hat{U}_{ш,n+2}, \\ n &= 1 \div N, \end{aligned} \quad (2)$$

позволяет получить оценки частот и амплитуд для любой длительности сигнала, в том числе и в области, запрещенной соотношением неопределенности $T1 = \frac{1}{\Delta f} > T$. Эта система уравнений может быть решена на основе разностного уравнения [8]. В этом случае на основе (2) записывается разностное уравнение с неизвестными коэффициентами \hat{C}_1 и \hat{C}_2

$$\hat{C}_1 \hat{y}_n + \hat{C}_2 \hat{y}_{n+1} - \hat{y}_{n+2} + \hat{U}_{ш,n+1} = 0. \quad (3)$$

Составляется функционал

$$\Delta = \sum_1^N \left| \hat{C}_1 \hat{y}_n + \hat{C}_2 \hat{y}_{n+1} - \hat{y}_{n+2} \right|^2. \quad (4)$$

Дифференцируя (4) по неизвестным коэффициентам \hat{C}_1 и \hat{C}_2 и, приравнявая дифференциалы к нулю, получим систему уравнений. Запишем ее в матричной форме.

$$\begin{pmatrix} \sum_1^N \hat{y}_{n+2} \hat{y}_n^* \\ \sum_1^N \hat{y}_{n+2} \hat{y}_{n+1}^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_1^N |\hat{y}_n|^2 & \sum_1^N \hat{y}_{n+1} \hat{y}_n^* \\ \sum_1^N \hat{y}_n \hat{y}_{n+1}^* & \sum_1^N |\hat{y}_{n+1}|^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{C}_1 \\ \hat{C}_2 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Решая матричное уравнение, можно получить оценки неизвестных коэффициентов \hat{C}_1 и \hat{C}_2 . Для оценки частот составляется полином

$$\hat{X}^2 + \hat{C}_1 \hat{X} + \hat{C}_2 = 0.$$

Факторизация полинома определяет оценки частот двух сигналов

$$\hat{X}_{1,2} = \frac{-\hat{C}_1}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\hat{C}_1}{2}\right)^2 - \hat{C}_2} = e^{i\omega_1 \Delta t}, e^{i\omega_2 \Delta t}. \quad (6)$$

Амплитуды сигналов находятся по выражениям

$$\begin{aligned} \hat{U}_1 e^{i\omega_1 t_n} &= \frac{\sum_1^N \hat{y}_{n+1} e^{-i\omega_1 \Delta t} - \sum_1^N \hat{y}_n}{\sum_1^N e^{-i(\omega_2 - \omega_1) \Delta t} - N}, \\ \hat{U}_2 e^{i\omega_2 t_n} &= \frac{\sum_1^N \hat{y}_{n+1} e^{-i\omega_2 \Delta t} - \sum_1^N \hat{y}_n}{\sum_1^N e^{-i(\omega_2 - \omega_1) \Delta t} - N}. \end{aligned} \quad (7)$$

Таким образом, система уравнений (2) оказывается решенной методом предсказаний [8]. Недостатками данного решения уравнений являются следующие. Корреляционная матрица в (5) состоит из произведений отсчетов, содержащих шум. Вследствие этого, ее обусловленность, при малых разностях частот, плохая. Кроме того, не всегда можно получить разностное уравнение.

Система уравнений (2) может быть решена на основе метода максимального правдоподобия [1, 6, 7]. Запишем функционал правдоподобия на основании (2)

$$\Delta(\hat{U}_1, \hat{U}_2, \hat{\omega}_1, \hat{\omega}_2) = \sum_1^N \left| \hat{y}_n - \hat{U}_1 e^{i\hat{\omega}_1 t_n} - \hat{U}_2 e^{i\hat{\omega}_2 t_n} \right|^2. \quad (8)$$

Минимум поверхности функционала правдоподобия находится методом перебора неизвестных параметров сигналов. Он определяет оценки комплексных амплитуд и частот двух сигналов, содержащихся в реализации. Дифференцируя по амплитудам и приравнявая дифференциалы к нулю, получим матричное уравнение правдоподобия

$$\begin{pmatrix} \sum_1^N \hat{y}_n e^{-i\hat{\omega}_1 t_n} \\ \sum_1^N \hat{y}_n e^{-i\hat{\omega}_2 t_n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_1^N |e^{i\hat{\omega}_1 t_n}|^2 & \sum_1^N e^{i(\hat{\omega}_2 - \hat{\omega}_1) t_n} \\ \sum_1^N e^{i(\hat{\omega}_1 - \hat{\omega}_2) t_n} & \sum_1^N |e^{i\hat{\omega}_2 t_n}|^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{U}_1 \\ \hat{U}_2 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

В отличие от корреляционной матрицы в (5), элементы корреляционной матрицы в (9) не содержат шумовой составляющей. Вследствие этого решение системы уравнений (2) оказывается более помехоустойчивым, чем в методе, основанном на разностном уравнений.

Таким образом, можно сделать важный вывод. Соотношение неопределенности справедливо лишь в рамках операторного метода (преобразование Фурье), когда обработка сигналов ведется спектральным, угловым спектральным методом или корреляционным методом. В связи с этим, теория разрешения, изложенная в работах [2, 3, 4, 6, 7] справедлива лишь в рамках операторного метода (преобразования Фурье, в спектральном, угловом спектральном и корреляционном анализе). Методы, основанные на разностном уравнении, или метод максимального правдоподобия обладают сверхразрешением. Их областью решений является как область ортогональности сигналов, так и область их неортогональности.

Докажем следующее утверждение. Спектральный, корреляционный, угловой спектральный анализы являются частным случаем метода максимального правдоподобия. Они оптимальны, если в принятой реализации содержится лишь один сигнал. При наличии в принятой реализации двух и более сигналов появляются интерференционные систематические погрешности, обусловленные взаимодействием на уровне боковых лепестков. Поэтому требуется ограничение области решений, типа критерия Рэлея. Доказательство основано на анализе значений минимума функции правдоподобия. Пусть принятая реализация содержит сумму сигналов с неизвестными частотами и аддитивный нормальный шум

$$\hat{y}(t) = \sum_{n=1}^N \hat{U}_n e^{i\hat{\omega}_n t} + \hat{U}_ш(t). \quad (10)$$

На основании (10) запишем функционал правдоподобия

$$\Delta(\hat{U}_1, \dots, \hat{U}_n, \hat{\omega}_1, \dots, \hat{\omega}_n) = \int_0^T \left| \hat{y}(t) - \sum_{n=1}^N \hat{U}_n e^{i\hat{\omega}_n t} \right|^2 dt. \quad (11)$$

Правая и левая части подынтегрального выражения по количеству сигналов соответствуют друг другу. Математическое ожидание от функционала правдоподобия в минимуме будет определять дисперсию шума в принятой реализации σ^2

$$M\left(\Delta\left(\hat{U}_n, \hat{\omega}_1\right)\right) = \int_0^T M|\hat{U}_ш(t)|^2 dt = \sigma^2 T. \quad (12)$$

Следовательно, значение функционала в минимуме будет определено значением дисперсии шума в реализации σ^2 . Функция риска будет минимальна, и решение задачи оценки параметров в этом случае оптимально.

Запишем функционал правдоподобия в другой форме

$$\Delta 1 \left(\hat{U}_1, \hat{\omega}_1 \right) = \int_0^T \left| \hat{y}(t) - \hat{U}_1 e^{i\hat{\omega}_1 t} \right|^2 dt. \quad (13)$$

Принятая реализация $\hat{y}(t)$ содержит N сигналов, а правая часть подынтегрального выражения содержит один сигнал. В этом случае математическое ожидание от функционала правдоподобия $\Delta 1 \left(\hat{U}_1, \hat{\omega}_1 \right)$ будет равно

$$\begin{aligned} M \left(\Delta 1 \left(\hat{U}_1, \hat{\omega}_1 \right) \right) &= \int_0^T M \left| \sum_{n=2}^N \hat{U}_n e^{i\hat{\omega}_n t} + \hat{U}_{\text{ш}}(t) \right|^2 dt = \\ &= \sigma^2 T + \int_0^T \left| \sum_{n=1}^N \hat{U}_n e^{i\hat{\omega}_n t} \right|^2 dt = \sigma^2 T + E_{\text{сов}}. \end{aligned} \quad (14)$$

Функционал правдоподобия не достигает своего минимума, а следовательно, решение задачи оценки параметров не оптимально. Далее, дифференцируя (13) по амплитуде \hat{U}_1 и приравнявая дифференциал к нулю, получим

$$\hat{U}_1(\hat{\omega}_1) = \int_0^T \hat{y}(t) e^{-i\hat{\omega}_1 t} dt. \quad (15)$$

Таким образом, получено выражение, определяющее спектральный анализ. Если принятую реализацию записать в виде

$$\hat{y}(t) = \sum_{n=1}^N \hat{U}_n e^{i(\omega_n t - t_n)} + \hat{U}_{\text{ш}}(t), \quad (16)$$

тогда можно будет получить аналогичным образом выражение для корреляционного анализа

$$\hat{U}_1(t_1) = \int_0^T \hat{y}(t) e^{-i\omega(t-t_1)} dt, \quad (17)$$

а если принятую реализацию записать в виде

$$\hat{y}(\vec{r}) = \sum_{n=1}^N \hat{U}_n e^{-i(\vec{k}_n(\vec{r}))} + \hat{U}_{\text{ш}}(\vec{r}), \quad (18)$$

тогда можно будет получить аналогичным образом выражение для углового спектрального анализа (определяет диаграмму направленности цифровой антенной системы)

$$\hat{U}_1(\vec{k}_1) = \int_0^T \hat{y}(t) e^{-i(\vec{k}_1(\vec{r}))} d\vec{r}. \quad (19)$$

Следовательно, доказано, что спектральный, угловой спектральный и корреляционный анализ являются частными случаями метода максимального правдоподобия. Они оптимальны лишь при условии, что в принятой реализации содержится один сигнал. Не оптимальность спектрального, углового спектрального, корреляционного анализа связана с наличием ограничения области решений критерием Рэля и систематическими интерференционными погрешностями, возникающими за счет взаимодействия сигналов на уровне боковых лепестков. Ограничения области решений статистических задач радиотехники, связанные с соотношением неопределенности, функцией неопределенности, критерием Рэля, справедливы лишь в рамках спектрального, корреляционного, углового спектрального анализа. Аддитивная шумовая составляющая при этом обрабатывается оптимально. Отношение сигнал/шум в процессе обработки увеличивается в \sqrt{N} раз. Метод максимального правдоподобия решает статистические задачи радиотехники, как в области ортогональности сигналов, так и в области их неортогональности.

Основные результаты

В результате проведенного сопоставительного анализа методов: операторного, основанного на разностных уравнениях и максимального правдоподобия, – получено следующее:

1. Установлено, что операторные методы обработки сигналов (спектральный, корреляционный, угловой спектральный анализ в радиотехнике) при обработке сигналов не используют априорную информацию об аналитической форме сигнала. В связи с этим их область решений статистических задач радиотехники ограничена соотношением неопределенности или другим принятым критерием, типа критерия Рэлея. Их разрешающая способность конечна даже при отсутствии аддитивного шума.

2. Установлено, что метод обработки сигналов, основанный на разностном уравнении, не имеет ограничения области решения статистических задач радиотехники типа критерия Рэлея. Их разрешающая способность оказывается бесконечно большой при отсутствии аддитивного шума в реализации.

3. Установлено, что метод максимального правдоподобия, поиск максимума функции правдоподобия в котором реализуется методом перебора параметров, не имеет ограничения области решения статистических задач радиотехники типа критерия Рэлея. Разрешающая способность оказывается бесконечно большой при отсутствии аддитивного шума в реализации.

4. Доказано утверждение: операторные методы являются частным случаем метода максимального правдоподобия. Они оптимальны лишь в случае, когда в принятой реализации содержится один сигнал и аддитивный шум. При наличии в реализации двух или более сигналов не оптимальность операторных методов связана с ограничением области решений и мешающим действием боковых лепестков.

5. Показано, что соотношение неопределенности в радиотехнике справедливо лишь в рамках операторных методов.

6. Сделан вывод: область решений статистических задач радиотехники методами, основанными на разностных уравнениях, и методом максимального правдоподобия не имеет ограничений типа критерия Рэлея.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перов А. И. Статистическая теория радиотехнических систем. Учебное пособие для вузов. – М.: Радиотехника, 2003, 400 с.

2. К. Хелстром Статистическая теория обнаружения сигналов: пер. с англ. Г. Ю. Кобзарева / под. Ред. Г. Ю. Кобзарева. – М.: изд-во Иностранной литературы, 1963. – 432с.

3. 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.

4. Ван Трис. Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции. Том 1. Теория обнаружения, оценок и линейной модуляции: перевод с англ. под ред. проф. В. И. Тихонова. – М.: «Советское радио», 1972. – 744 с.

5. Ширман Я. Д. Разрешение и сжатие сигналов. – М.: Сов. радио, 1974. – 360 с.

6. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники: 3-е изд., перераб. И доп. – М.: Радио и связь, 1989. – 656 с.

7. Тихонов В. И. Оптимальный прием сигналов. – М.: Радио и связь, 1983. – 320 с.

8. Марпл.-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения: пер. с англ. – М.: Мир, 1990 – 584 с.

9. Михайлов Б. А. Максимизация пропускной способности линейных систем на основе линейного продолжения спектра. – М.:ООО «Издательский дом Медиа Паблицер», 2014. – 162с.

10. Чижов А. А. Сверхрэлеевское разрешение. Т.1:Классический взгляд на проблему. – М.: КРАСАНДР, 2010. – 96 с.

11. Чижов А. А. Сверхрэлеевское разрешение. Т.2: Преодоление фактора некорректности обратной задачи рассеяния и проекционная радиолокация. Метод разрешения групповых сосредоточенных целей. – М.: КРАСАНДР, 2010. – 104 с.

12. Климов С. А. Метод повышения разрешающей способности радиолокационных систем при цифровой обработке сигналов / С. А. Климов // ЖУРНАЛ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ. – №1[Электронный ресурс], 2013.

13. Пахотин, В. А. Оптимальный прием сигналов с высоким разрешением / В. А. Пахотин, К. В. Власова, Р. В. Симонов, В. А. Бессонов, И. В. Либерман // Сборник трудов 21-ой Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2019». – М.: Московское НТО радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, 2020. – С. 331-336.

14. Пахотин, В. А. Технология обработки совокупности сигналов с высоким разрешением. / В. А. Пахотин, К. В. Власова, Р. В. Симонов, С. В. Петров // Сборник трудов 23-ей Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2021» – М.: Московское НТО радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, 2020. – С. 30-38.

15. Слюсар В. И. Сверхрэлеевское разрешение узкополосных импульсов по времени задержки / В. И. Слюсар // Радиоэлектроника. – №3, 1999 – С. 55-61.

COMPARATIVE ANALYSIS OF DIGITAL SIGNAL PROCESSING TECHNIQUES

¹Pakhotin Valery Anatolyevich, D., F.-M.S., professor;

²Vlasova Ksenia Valerievna, Ph.D., associate professor;

³Molostova Svetlana Valerievna, Ph.D., associate professor

^{1,3}Federal State Educational Institution of Higher Education "Immanuel Kant

Baltic Federal University" Kaliningrad, Russia, e-mail: VPakhotin@kantiana.ru;

²Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia, e-mail: p_ksenia@mail.ru

The paper discusses the comparative possibilities of signal processing by operator methods, the maximum likelihood method and the method based on difference equations. The main attention is paid to the possibility of signal processing in the area of high correlation. The proof of the statement is given: operator methods are a special case of the maximum likelihood method. The proof of the statement is given: operator signal processing methods are optimal only when the received implementation contains one signal. It has been shown that the uncertainty ratio in radio engineering is valid only within the framework of operator methods. In the region prohibited by the uncertainty relation, the solution can be obtained by methods based on difference equations and by the method of brute-force signal parameters in likelihood function analysis.

УДК 004.056.5:378.3

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ КОМПОНЕНТОВ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ СОБЫТИЙ БЕЗОПАСНОСТИ

¹Подтопельный Владислав Владимирович, ст. преподаватель,
кафедра информационной безопасности

¹Институт цифровых технологий ФГБОУ ВО «КГТУ», Калининград, Россия,
e-mail: ionpvv@mail.ru

Изучаются аспекты создания протокола событий безопасности цифровых систем. Рассматриваются способы обработки событий протокола безопасности, характеризуются их особенности, специфика использования Марковских цепей для поиска состояний компрометации. При создании протокола событий безопасности учитываются особенности определения вероятностей переходов системы в различные состояния компрометации. Для решения задач поиска событий безопасности и формирования их векторов предлагается изучить проблемы правильной интерпретации событий цифровых систем. Рассматриваются особенности упрощенного анализа событий протокола безопасности с учетом связей между тактиками (состояниями) предложенными в методических документах ФСТЭК.

При исследовании информационной безопасности сегментированных автоматизированных систем необходимо формировать протоколы событий безопасности. Для анализа событий используются различные методики, в основном они предполагают использование экспертного мнения специалистов по защите информации. Однако, для более точного анализа протоколируемых событий безопасности и определения их различных параметров, необходимо учесть специфику классификации признакового пространства каждого класса событий, а также использовать формальные методы определения последовательности событий. События можно соотнести с тактиками «Методика оценки угроз безопасности информации» (ФСТЭК) [1]. Также важно учитывать неоднозначность признаков фиксируемых событий, возможность возникновения множества ветвлений и сопряжений событий безопасности. При формировании протокола следует учитывать факторы, изменяющие порядок построения событийной ветви, такие как применение средств защиты, административные настройки. Необходимо также учесть особенности используемых технологий и средств защиты, которые используются при контроле многосегментных систем. Важно помнить, что определение направления протокола атаки может быть затруднено несогласованностью или неправильной оценкой параметров событий безопасности. Поэтому следует учитывать особенности работы сегментов цифровых систем при протоколировании событий безопасности. Принимая во внимание все вышеперечисленные факторы, можно сделать вывод, что при формировании протокола событий безопасности и определении параметров событий необходимо учитывать экспертное мнение специалистов по защите информации, использовать Марковские цепи и формальные методы классификации признаков. Классификация интерпретаций признаков и использование сигнатурных признаков помогут более точно выявлять неявные угрозы. Однако, следует помнить, что длинные цепочки последовательно связанных событий могут привести к ошибочным интерпретациям событий безопасности. Поэтому важно проявлять осторожность и аккуратность при определении направления протокола атаки и установке параметров событий безопасности. [2].

Такой метод формирования протокола применяется при аудите и контроле многосегментных систем. Это позволяет учитывать особенности используемых технологий обработки информации и средств защиты. При контроле разделенных информационных систем и использовании процедур поиска признаков компрометации может возникнуть проблема несогласованности или неправильной оценки параметров событий безопасности, установленных администратором.

Многие параметры событий могут быть определены как маркеры угроз только при их совместном использовании с другими маркерами. В противном случае компрометирующий признак может указывать на простую ошибку. Таким образом, обнаружение какого-либо сигнатурного признака не всегда гарантирует соответствие классу событий безопасности. Для более точного интерпретирования событий используются следующие методы анализа: статистический анализ, вейвлет-анализ, кластерный анализ, фрактальный анализ, метод опорных векторов, генетические алгоритмы, иммунные системы, нейронные сети, деревья решений, байесовские сети, экспертные системы. Статистические методы из-за неверного выбора набора наблюдаемых параметров или неверных размеров обобщения наборов исходных данных могут привести к тому, что модель описания потока сетевого трафика будет регистрировать фиктивные события безопасности. Преимущества статистических методов – относительная ясность результатов, их адаптивность к изменению поведения пользователей цифровых сегментов, а также способность к обнаружению аномальных событий [3].

Среди событий безопасности, позволяющих создать событийное пространство, можно выделить три типа: явные, косвенные, легитимные (неопасные). Очевидно, что не все косвенные события можно игнорировать. При формировании протокола событий безопасности нужно учитывать однозначно интерпретируемые события, которые должны использоваться либо как корневые, либо как узловые выстраиваемого вектора событий.

Сегменты цифровых систем содержат множества различных параллельно и последовательно связанных объектов. При изучении инцидентов безопасности необходимо формировать различные последовательности событий при учете специфик сегментов подсистем, классифицируемых по их функциям. Создаётся последовательность вероятностей состояний, которые сопоставлены фактами подтверждения событий, ассоциированных с конкретными элементами цифрового сегмента. Это позволит локализовать действия нарушителя, или определить область нахождения причины сбоя [4]. Таким образом, для формирования протокола 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. Основным параметром в описании протокола является величина потенциальных ослаблений связей между событиями, как наборами признаков достижения некоего общего суммарного состояния, указывающего на осуществленную реализацию угрозы, представленную в виде множества признаков атаки [4]. Фиксирование и описание этого множества - нетривиальная задача. Для ее реализации можно применять различные интеллектуальные технологии. В частности, они могут включать в свой состав системы сбора признаков событий и их анализа с учетом специфики технологической среды и событий безопасности. Типовая сборка подобных систем состоит из следующих компонентов:

1. Модуль сбора данных о параметрах угроз.
2. Модуль анализа файла журнала данных о параметрах угроз и сохранения результатов анализа в текстовый файл.
3. Дополнительный анализатор на основе нейронной сети или другой аналитический инструмент для сетевых или других параметров, дополнительные подключаемые компоненты. Для реализации анализа могут использоваться следующие методы: методы вычислительного интеллекта, нейронная сеть. Карты Кохонена, ART-сети, LSTM-сети, методы машинного обучения, классификаторы машинного обучения, байесовская сеть доверия. Нейронная сеть кластерного типа (позволяет решать противоречивые задачи чувствительности к новым данным и сохранения полученных знаний).
4. Консультационный модуль, интегрированный в общую подсистему консультации. Он предполагает использование методов на основе знаний, которые используются для определения последовательности регистрируемых операций. Для реализации процесса консультации могут использоваться и другие методы: статистические методы, цепи Маркова для прогнозирования состояний безопасности ЛВС, формирования протокола, алгоритм Витерби для восстановления протокола атаки.

Регистрируемые признаки событий (U) можно представить, как случайную дискретную последовательность, длиной n отсчетов:

$$U = [u_1, u_2, u_3, \dots, u_n] \quad (1)$$

Для выявления связи признаков событий безопасности при дальнейшем формировании протокола 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:

$$\begin{aligned} a(u_3|u_1, u_2) &= a(u_3|u_2) \\ &\dots \\ a(u_n|u_1, \dots, u_{n-1}) &= a(u_n|u_{n-1}) \end{aligned} \quad (2)$$

Далее требуется классифицировать признаки событий и все случайные последовательности, которые соответствуют марковской последовательности:

$$P(u_1, \dots, u_n) = P(u_1) \prod_{i=2}^n p(u_i|u_{i-1}), \quad (3)$$

где показатель u_{i-1} – предшествующие скомпрометированное состояние сетевого узла с фиксированным признаком атаки.

Таким образом, последовательность событий 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 в протоколе событий [5].

Используя векторные марковские последовательности можно рассмотреть особенности построения последовательности событий с учётом системной и компонентной организации инфра-

структуры. 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 адресация хостов сегмента сети, время регистрации события и отбора подозрительного признака реализуемой угрозы, системные службы, системные компоненты операционных сред. Принципы формирования координатной плоскости могут быть разными. Предлагается построение цепочки событий от управляющего сегмента инфраструктуры. Нужно понимать, что наименьшее время между двумя событиями означает наибольшую значимость связи эти событий (вес дуги), то есть между вершинами графа.

Выделяются типы состояний с учетом последовательности реализации по методике (вершины графа атаки) следующие (в краткой интерпретации):

1. Разведка (поиск и агрегация информации о системах и сетях целевой инфраструктуры) (T1);
2. Первичная компрометация инфраструктурных компонентов систем и сетей (T2)
3. Внедрение и эксплуатация средств разрушающего программного воздействия в системах и сетях (T3);
4. Получение прав пользователя и сохранение доступа к системе или сети (T4);
5. Управление средствами разрушающего программного воздействия в системах, сетях и (или) скомпрометированными компонентами (T5);
6. Повышение уровня доступа к компонентам систем и сетей (T6);
7. Соккрытие действий и применяемых при атаке средств (T7)
8. Компрометация смежных подсистем (T8);
9. Поиск и вывод данных из системы (T9);
10. Несанкционированный доступ и компрометация инфраструктуры (T10).

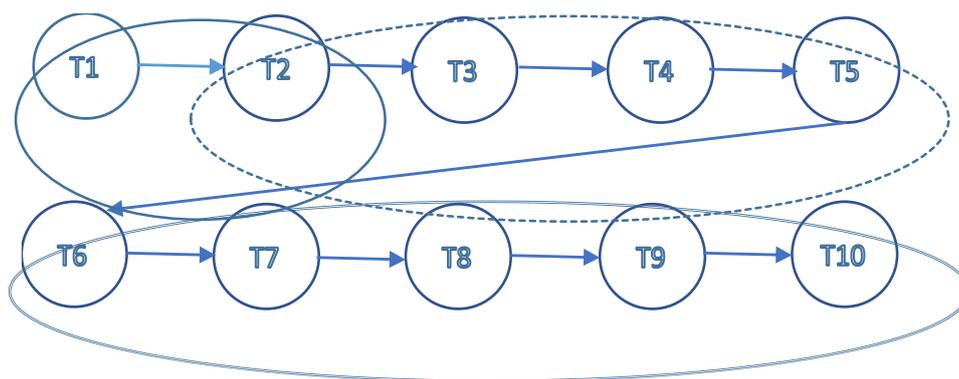


Рис. 1. Деление протокола на отдельные цепочки

Создаваемый вектор должен содержать вершины, фиксируемых признаков. Для коррекции возрастающей величины дисперсии типовой вектор был разделен на близкие по времени срабатывания фиксации событий. Здесь подразумевается следующее: события, которые предполагают обязательную связь (то есть они функционально зависимы), и по времени фиксации близки, могут рассматриваться отдельно, то есть как отдельные множества. Это упрощает вычисления системы дифференциальных уравнений.

Интенсивности фиксации событий при проявлении признаков успешности тактики злоумышленника, зависят только от разности начального и переходного времени ($\tau = t - t_0$, т. е. $p_{ij}(t_0, t) = p_{ij}(\tau)$). Их можно исследовать, используя дифференциальные уравнения Колмогорова. Тогда задача сводится к решению системы дифференциальных уравнений вида:

$$\frac{d}{dt} p_{ij}(\tau) = \sum_{g=1}^G \lambda_{ij} (t) p_{ij}(t), \quad (4)$$

На основании принципов построения Марковских цепей формируется система уравнений, которая учитывает специфику зависимостей событий, которые представлены результатами реализаций тактик злоумышленника (рис. 1).

В соответствии с разделением графа на группы функционально связанных компонентов формируются отдельные системы дифференциальных уравнений.

$$\begin{cases} \frac{dP_{T1}}{dt} = \lambda_{110}P_{T10}(t) - \lambda_{12}P_{T2}(t) \\ \frac{dP_{T2}}{dt} = \lambda_{12}P_{T2}(t) - \lambda_{23}P_{T3}(t) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \frac{dP_{T2}}{dt} = \lambda_{12}P_{T2}(t) - \lambda_{23}P_{T3}(t) \\ \frac{dP_{T3}}{dt} = \lambda_{23}P_{T3}(t) - \lambda_{34}P_{T4}(t) \\ \frac{dP_{T4}}{dt} = \lambda_{34}P_{T4}(t) - \lambda_{45}P_{T5}(t) \\ \frac{dP_{T5}}{dt} = \lambda_{45}P_{T5}(t) - \lambda_{56}P_{T6}(t) \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \frac{dP_{T6}}{dt} = \lambda_{56}P_{T5}(t) - \lambda_{67}P_{T6}(t) \\ \frac{dP_{T7}}{dt} = \lambda_{67}P_{T6}(t) - \lambda_{78}P_{T7}(t) \\ \frac{dP_{T8}}{dt} = \lambda_{78}P_{T7}(t) - \lambda_{69}P_{T6}(t) \\ \frac{dP_{T9}}{dt} = \lambda_{89}P_{T8}(t) - \lambda_{910}P_{T10}(t) \\ \frac{dP_{T10}}{dt} = \lambda_{910}P_{T9}(t) - \lambda_{101}P_{T10}(t) \end{cases} \quad (7)$$

Таким образом, формирование протокола предполагает использование связанных наборов регистрируемых признаков событий, которые составляют последовательности множеств с учетом времени фиксации признаков [6]. Выстраиваемый граф с учетом функциональных особенностей его компонентов формируется в среде случайных и связанных событий. Наличие ослабленных связей между вершинами позволяет определить важность, приоритет ветви событий в протоколе. Тем самым, можно определить тип события, инцидент безопасности.

Главным параметром, определяющим построение правильных связей в протоколе, является наличие сильных связей между вершинами графа как наборами признаков, указывающих на компрометацию. Для определения локальных характеристик инцидента безопасности вектор событий (набор последовательно связанных зафиксированных признаков) можно наложить на топологию инфраструктуры контролируемого объекта. Это позволит получить прогноз последовательного фиксирования признаков, то есть наиболее вероятную следующую вершину во множестве вершин (комплексов признаков) [7]. 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 протокола.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методика оценки угроз безопасности информации Методический документ ФСТЭК России: утв. ФСТЭК России 5 февраля 2021г.
2. ГОСТ Р 56546-2015 Национальный стандарт российской федерации. Защита информации. Уязвимости информационных систем. Классификация уязвимостей информационных систем. М.: Стандартинформ, 2018.
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 потребительских подходов (часть 2) // Jet Info, №12[Электронный ресурс], 2018.

7. Астахов А. Введение в аудит информационной безопасности [Доклад] // GlobalTrust Solutions [Электронный ресурс]. 2018. – URL: <http://globaltrust.ru> (дата обращения: 29.01.2018).

OPERATING FEATURES OF DIGITAL SYSTEMS SEGMENTS WHEN RECORDING SECURITY EVENTS

¹Vladislav Vladimirovich Podtopelny, art. lecturer, information security department

¹Institute of Digital Technologies, FSBEI HE «KSTU», Kaliningrad, Russia,
e-mail: ionpvv@mail.ru.ru

Aspects of creating a protocol of digital systems security events are being studied. The methods of processing security protocol events are considered, their features are characterized, the specifics of using Markov chains to search for compromise states are characterized. When creating a security event protocol, the specifics of determining the probabilities of system transitions to various states of compromise are taken into account. To solve the problems of searching for security events and forming their vectors, it is proposed to study the problems of correct interpretation of digital system events. The features of a simplified analysis of security protocol events are considered, taking into account the links between tactics (states) proposed in the methodological documents of the FSTEC.

УДК 621.372.083.92

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ МЕТОДОМ МАКСИМАЛЬНОГО ПРАВДОПОДОБИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭВОЛЮЦИОННЫХ АЛГОРИТМОВ ОПТИМИЗАЦИИ

¹Симонов Роман Валерьевич, аспирант Института высоких технологий;

²Пахотин Валерий Анатольевич, д-р физ.-мат. наук, профессор,
профессор Института высоких технологий;

³Коротей Евгений Владимирович, доцент кафедры судовых радиотехнических систем

^{1,2}Балтийский Федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия,
e-mail: VPakhotin@kantiana.ru

³Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ»,
Калининград, Россия, e-mail: eugeny_korotey@mail.ru

В работе показаны особенности максимизации функции правдоподобия, связанные с наличием локальных максимумов, проведено исследование возможностей оценивания параметров совокупности сигналов методом максимизации функции правдоподобия с применением алгоритма дифференциальной эволюции, позволяющего существенно сократить требуемое для решения задачи машинное время. Показана возможность применения алгоритма при количестве сигналов в реализации, равном 7.

Введение

Метод максимального правдоподобия широко используется для оценки параметров совокупности сигналов, содержащихся в принятой реализации [1-6]. Основой метода является нахождение максимума поверхности функции правдоподобия в пространстве оценочных значений параметров. Максимум обеспечивает минимизацию функции риска. При условии максимума достигается оптимальность решения задачи оценки параметров сигналов. Решение может быть получе-

но как в области низкой корреляции сигналов, когда выполняется критерий Рэлея, так и в области их высокой корреляции. Однако максимизация функции правдоподобия оказывается сложной в связи с фактором многозначности решений. Разрезы поверхности функции правдоподобия по временам приема характеризуются большим количеством локальных максимумов, существенно затрудняющих поиск глобального максимума. В практических приложениях часто требуется максимизация поверхности функции правдоподобия при низком отношении сигнал/шум, а также при отсутствии сигналов в реализации. В этом случае поверхность характеризуется большим количеством шумовых максимумов, среди которых требуется определить глобальный максимум. В связи с этим, до настоящего времени, максимизацию функции правдоподобия предлагалось осуществлять на основе метода перебора по сетке оценок параметров сигнала. Метод перебора по сетке требует значительного вычислительного ресурса, и для практических задач может быть применён лишь при ограниченном количестве сигналов в реализации (не более 3).

В настоящей работе предлагается преобразовать функцию правдоподобия, используя подстановку Хелстрема [6]. Поверхность получаемого преобразованного функционала может быть основой для решения задачи оценки параметров сигналов. Она не имеет локальных максимумов при высоких отношениях сигнал/шум.

Для максимизации функции правдоподобия предлагается применить эволюционные алгоритмы, одним из которых является метод дифференциальной эволюции [7-10]. Целью настоящей работы является исследование возможностей повышения быстродействия при решении задачи максимизации функции правдоподобия.

Основы теории

Запишем принятую реализацию, содержащую совокупность сигналов и аддитивный нормальный шум с дисперсией σ^2 , средним значением квадратурных компонент, равным нулю и интервалом корреляции τ_k , в наиболее общем виде, в аналитической форме:

$$y(t) = \sum_M \hat{S}(\bar{\lambda}_n, t) + \hat{U}_w(t) \quad (1)$$

где $\bar{\lambda}$ – вектор неизвестных неэнергетических параметров, постоянных на интервале обработки сигнала, M – число сигналов.

При наличии случайных параметров, их можно считать неизвестными, если ввести условие, согласно которому интервал корреляции параметров сигналов больше длительности сигнала $\tau_k \gg T$. Это условие определяет возможность применения метода максимального правдоподобия.

Запишем для принятых условий функцию правдоподобия в следующем виде:

$$L(\hat{U}_1 \dots \hat{U}_n, \lambda) = \text{const} \exp \left(\frac{-1}{2\sigma^2 \tau_k} \int_T \left| \hat{y}(t) - \sum_M \hat{U}'_n \hat{S}(\bar{\lambda}'_n, t) \right|^2 dt \right) \quad (2)$$

Штрихами отмечены неизвестные (оценочные) параметры сигналов. Их количество определяет размерность пространства параметров при решении задачи максимизации функции правдоподобия. Нормировочная константа не влияет на процесс максимизации, и может быть исключена из рассмотрения. Таким образом, отбрасывая константу и логарифмируя, можно получить следующий функционал:

$$\Delta = \int_T \left| \hat{y}(t) - \sum_M U'_n \hat{S}(\bar{\lambda}'_n, t - t_n) \right|^2 dt \quad (3)$$

Его можно использовать наряду с функцией правдоподобия при решении статистических задач радиотехники. Поверхность этого функционала эквивалентна поверхности функции правдо-

подобия. Если правая часть подынтегрального выражения совпадает с суммой сигналов в принятой реализации $\hat{y}(t)$, то поверхность функционала (3) достигает минимума, а функция правдоподобия – максимума. Следовательно, минимум функционала правдоподобия является критерием отбора возможных решений задачи оценки параметров сигналов.

Модельные исследования будем проводить на примере реализации, в которой содержатся два радиоимпульса, задаваемых согласно выражению:

$$\begin{aligned} \hat{S}(\bar{\lambda}_n, t) &= \exp(i\omega_n(t-t_n)), \quad t = t_n \dots t_n + \tau \\ \hat{S}(\bar{\lambda}_n, t) &= 0, \quad t < t_n \\ \hat{S}(\bar{\lambda}_n, t) &= 0, \quad t > t_n + \tau \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь τ – длительность сигнала, равная 400 мкс. Частоты сигналов равны 30 кГц, интервал дискретизации – 2 мкс.

При наличии в принятом сообщении совокупности нескольких сигналов, непосредственное использование выражений (2) и (3) для решения задачи оценки параметров сигналов, оказывается сложным. Это связано с периодичностью функциональных зависимостей по параметрам $\omega t'_1$ и $\omega t'_2$, приводящей к неоднозначности решения.

На рис. 1 показана поверхность обратного функционала $1/\Delta$ при отношении сигнал/шум 6 дБ. Амплитуды сигналов $\hat{U}_1 = \hat{U}_2 = 1$ будем считать постоянными и известными, тогда получим разрез функционала правдоподобия по параметрам t'_1 и t'_2 .

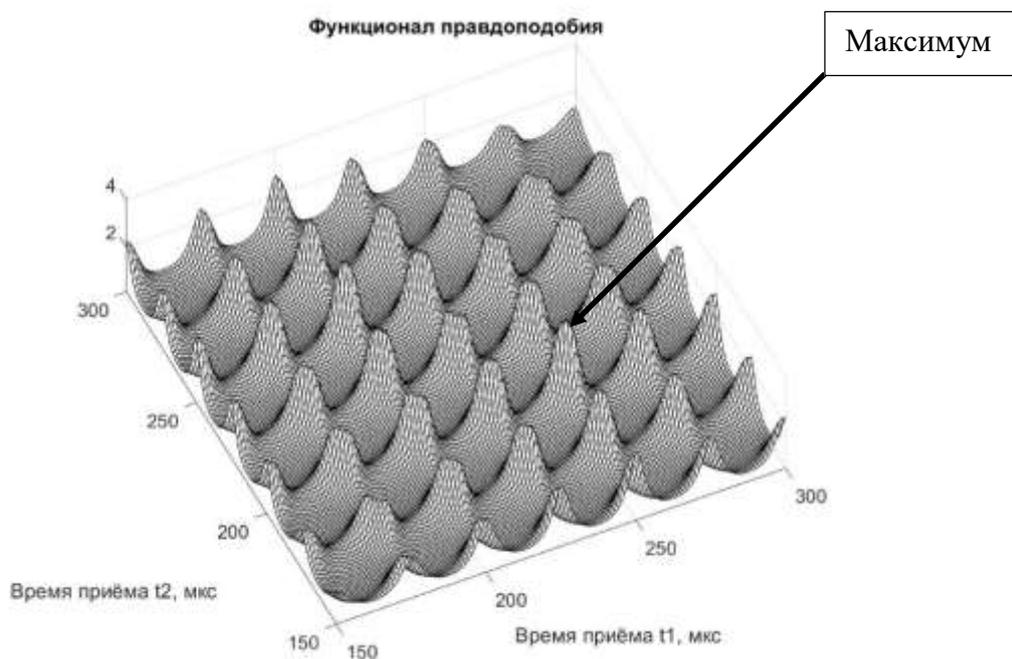


Рис. 1. Поверхность функционала правдоподобия

Отмечается наличие большого количества локальных максимумов, неоднозначность решения.

Задача поиска максимума значительно упрощается при подстановке Хелстрема [6]. Дифференцируя (2) по амплитудам сигналов и приравнивая дифференциалы нулю, можно получить уравнения правдоподобия. Запишем их в векторном виде:

$$\bar{b}(\bar{\lambda}') = \hat{R}(\bar{\lambda}') \bar{U}(\bar{\lambda}') \quad (5)$$

Здесь $b_n(\bar{\lambda}') = \frac{1}{T} \int_T Y(t) S_n(\bar{\lambda}', t - t_n) dt$ – составляющие вектора \bar{b} .

$\hat{R}_{n,m}(\bar{\lambda}') = \frac{1}{T} \int_T \hat{S}_n(\bar{\lambda}', t - t_n) \hat{S}_m(\bar{\lambda}', t - t_m) dt$ – элементы корреляционной матрицы

($n, m = 1 \div N$).

$\bar{U}(\bar{\lambda}')$ – вектор комплексных оцениваемых амплитуд сигналов.

Решая уравнения правдоподобия (5), получим функциональные соотношения, определяющие комплексные амплитуды сигналов.

$$\bar{U}(\bar{\lambda}') = \hat{R}^{-1}(\bar{\lambda}') b_n(\bar{\lambda}') \quad (6)$$

Подставляя полученные оценочные амплитуды в выражение (3), можно перейти к следующему функционалу:

$$\Delta_2 = \int_T |\hat{y}(t)|^2 dt - \int_T \hat{y}^*(t) \sum_N \hat{U}'_n \hat{S}(\bar{\lambda}'_n, t - t_n) dt \quad (7)$$

Будем в дальнейшем называть его преобразованным функционалом правдоподобия. На рис. 2 показана поверхность функционала $1/\Delta_2$ от оценочных значений времени приёма.

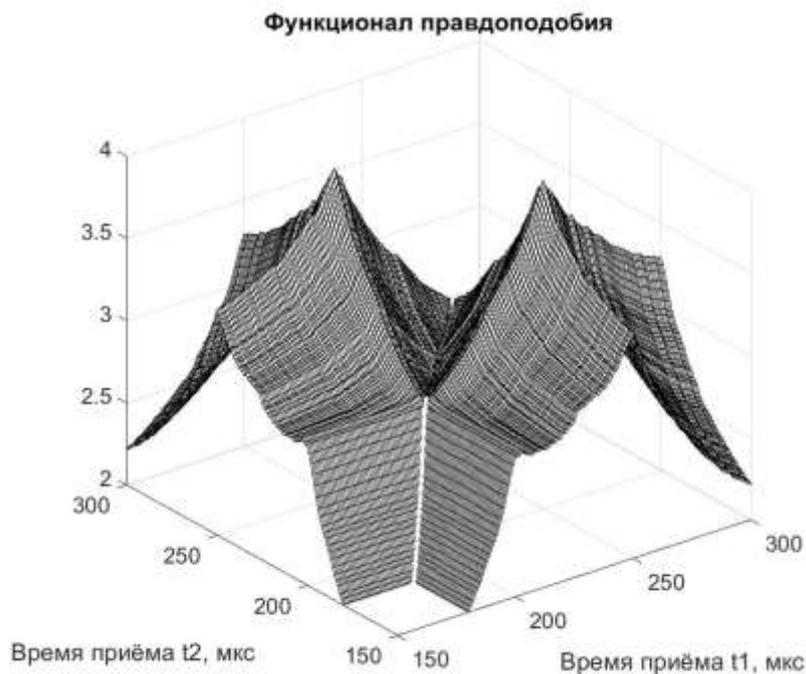


Рис. 2. Поверхность преобразованного функционала правдоподобия

Поверхность функциональной зависимости не имеет локальных максимумов при высоких отношениях сигнал/шум и больших разностях $t'_1 - t'_2$. Она симметрична относительно прямой $t'_1 = t'_2$, и для оценивания параметров совокупности M сигналов достаточно найти её максимум в полуплоскости. Точность решения ограничивается возможностями оценки амплитуд. При сближении оценочных значений параметров, корреляционная матрица, входящая в уравнения правдоподобия, становится сингулярной, что приводит к повышению дисперсии оценок.

Использование подстановки Хеллстрема позволяет снизить размерность пространства параметров на M при решении задачи оптимизации. Однако, несмотря на упрощение задачи, достиг-

нутое путём преобразования функционала правдоподобия, нахождение минимума функционала правдоподобия является сложной оптимизационной задачей. Если решать эту задачу методом полного перебора значений параметров по равномерной сетке, то с ростом размерности пространства параметров вычислительная сложность возрастает в степенной зависимости. В практически значимых случаях требуется вычислить значение функционала около $4 * n * 10^3$ раз, где n – число оцениваемых параметров, что эквивалентно $4 * n^2 * 10^6$ операций умножения с накоплением. Выполнение этих расчётов за приемлемое время на современном компьютере (производительность процессора 300 GFlops) возможно только при $n < 4$. В настоящее время для решения задач оптимизации в пространствах большой размерности широко применяются эволюционные алгоритмы. Развитие этих алгоритмов в последние годы связано с широким распространением нейронных сетей и машинного обучения.

В настоящей работе предлагается применить для решения задачи минимизации функционала правдоподобия метод дифференциальной эволюции [7].

Метод дифференциальной эволюции

В настоящей работе предлагается применить для решения задачи минимизации функционала правдоподобия метод дифференциальной эволюции, реализованный с возможностью выполнения на многопроцессорных архитектурах.

Выполнение алгоритма дифференциальной эволюции можно разделить на следующие этапы:

1. Задаются параметры: весовой коэффициент F , параметр вероятности скрещивания CR , максимальный размер популяции M (массива, содержащего векторы параметров)

2. Генерируется начальная популяция, которая представляет собой совокупность P векторов размерности N . Каждый элемент вектора соответствует параметру сигнала. Начальные значения векторов задаются равномерно распределёнными случайными числами, принадлежащими пространству, на котором будет осуществляться поиск.

3. «Мутация». Для каждого вектора \bar{V}_i случайным образом из популяции выбираются три вектора, отличные от \bar{V}_i : $\bar{V}_{r_1}, \bar{V}_{r_2}, \bar{V}_{r_3}$. Рассчитывается пробный вектор $\bar{V}' = \bar{V}_{r_1} + F(\bar{V}_{r_2} - \bar{V}_{r_3})$. Схема расположения векторов показана на рис. 3.

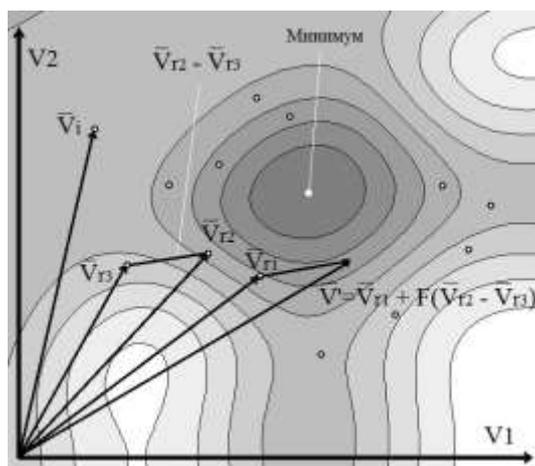


Рис. 3. Схема расположения векторов в методе дифференциальной эволюции

4. Кроссовер: на этом этапе производится замена элементов пробного вектора \bar{V}' элементами исходного вектора \bar{V}_i . Вероятность замены каждого элемента определяется параметром CR .

5. Сравнение: На этом этапе осуществляется вычисление значения целевой функции, соответствующего полученному вектору, и производится сравнение этого значения со значением, соответствующим исходному вектору. Если для \bar{V}' получено меньшее значение целевой функции, он заменяет собой исходный: $\bar{V}_i = \bar{V}'$.

6. Проверяется условие останова. Помимо ограничения числа итерации, на практике, могут быть заданы различные условия, например, достижение заданной минимальной разности наибольшего и наименьшего из вычисленных на данной итерации значений целевой функции, или максимальное число итераций, не приводящее к уменьшению целевой функции.

После этого этапа происходит возвращение к этапу 3, и процесс повторяется циклически. При выполнении условия останова, программа возвращает наименьшее значение целевой функции, и вектор, соответствующий ему.

При параллельном выполнении алгоритма, этапы 2-6 выполняются независимо для каждого потока. Каждый поток содержит независимую популяцию. При этом, перед этапом 6 производится сортировка популяций по значению целевой функции. После этапа 6 выполняется замена наименее пригодных (по значению целевой функции) индивидов, содержащихся в одной популяции, заданным числом наиболее пригодных индивидов из другой популяции, называемая миграцией в терминологии, введённой в работе [5]. Она проводится согласно схеме, показанной на рис. 4.

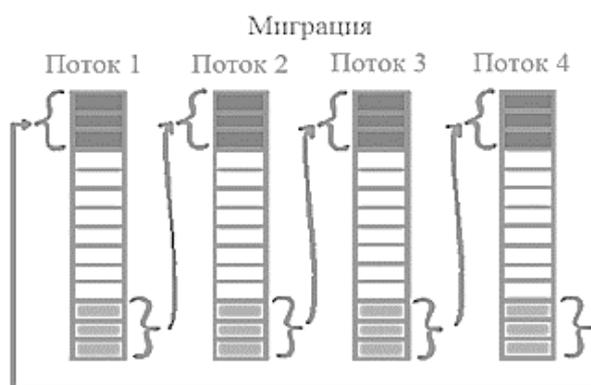


Рис. 4. Схема параллельного выполнения алгоритма дифференциальной эволюции

Проверка условий останова осуществляется независимо в каждом потоке. Если в одном из потоков условие останова выполняется, выполнение программы останавливается.

Результаты модельных исследований

Представлены результаты исследования возможностей оценивания параметров сигнала с применением метода дифференциальной эволюции для поиска экстремума преобразованного функционала правдоподобия (7) в многомерном пространстве параметров.

Для сравнения, с использованием тех же данных, получены оценки параметров с помощью поиска минимума функционала методом перебора значений параметров. Шаг сетки соответствует интервалу дискретизации, и равен 2мкс. Отношение сигнал/шум составляет 0 дБ. Метод перебора позволяет гарантированно находить минимум функционала с точностью, определяемой шагом сетки. Таким образом, возможно использовать его, как эталонный, при оценке возможностей эволюционных алгоритмов.

На рис. 5 показаны оценки времени приёма двух сигналов в зависимости от разности $t_1' - t_2'$, полученные методом минимизации преобразованного функционала правдоподобия с помощью алгоритма дифференциальной эволюции.

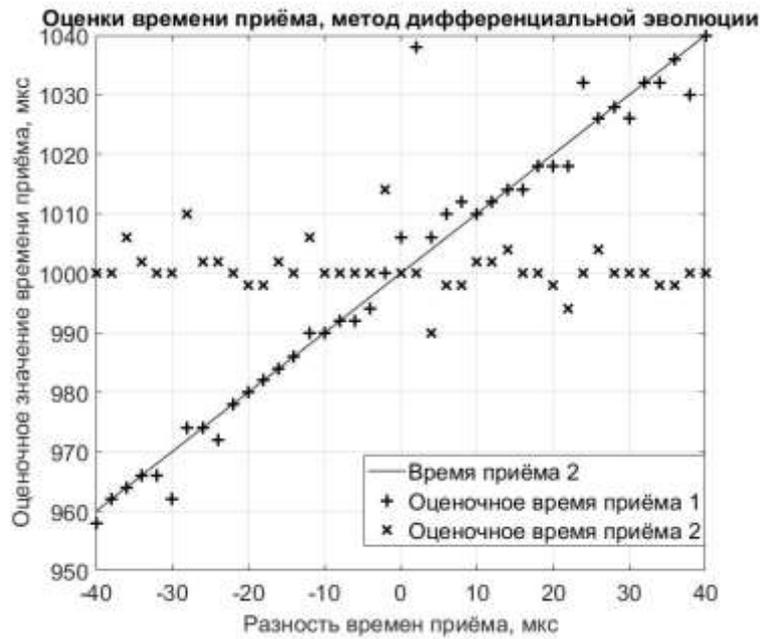


Рис. 5. Оценка времени приёма двух сигналов с применением алгоритма дифференциальной эволюции в зависимости от разности $t_1 - t_2$

Независимая оценка параметров сигналов, а, соответственно, и разрешение сигналов по оцениваемым параметрам, возможно при разностях времени приёма 10 мкс., что в 40 раз меньше, чем ограничение, устанавливаемое критерием Рэля.

На рис. 6 представлены оценочные значения времени приёма, полученные с помощью метода перебора по сетке при тех же исходных данных.

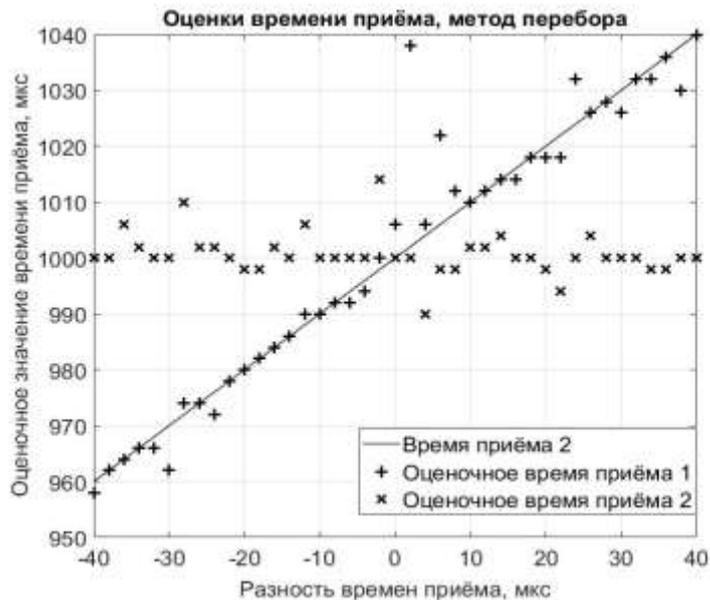


Рис. 6. Оценка времени приёма двух сигналов с применением метода перебора в зависимости от разности $t_1 - t_2$

Можно отметить, что результаты, получаемые методом дифференциальной эволюции и перебора одинаковы всюду, кроме малой области высокой дисперсии оценочных значений параметров, соответствующей близким значениям времени прихода сигналов. В этой области велико число шумовых локальных максимумов функционала правдоподобия. Таким образом, метод дифференциальной эволюции, значительно сокращающий необходимое машинное время при поиске

экстремума, может быть применён в рассматриваемой задаче вместо метода перебора параметров по сетке.

В ходе работы получены результаты сравнительной оценки эффективности алгоритма дифференциальной эволюции и генетического алгоритма, входящего в состав среды Matlab (Matlab GA). На рис. 7 показаны зависимости СКО решения от количества итераций алгоритма при оценках частот сигналов.

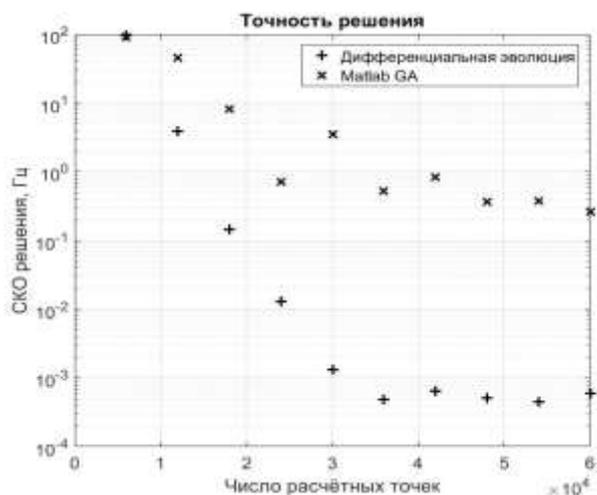


Рис. 7. Сопоставление сходимости алгоритмов дифференциальной эволюции и Matlab GA при оценках частот сигналов

Отмечается, что алгоритм дифференциальной эволюции обеспечивает лучшую сходимость. Ограничение СКО решения снизу обусловлено конечной точностью вычислений с плавающей точкой при решении уравнений правдоподобия.

Произведено сопоставление времени выполнения поиска экстремума функционала правдоподобия при применении различных алгоритмов. Рассмотрен алгоритм дифференциальной эволюции, реализованный на языке C++, и в пакете «Matlab», а также генетический алгоритм GN ISRES, реализованный в библиотеке NLOPT.

На рис. 8 показаны сравнительные оценки времени выполнения алгоритмов. Отмечается, что преимущество во времени выполнения составляет около 20% при использовании алгоритма дифференциальной эволюции, реализованного с применением C++.

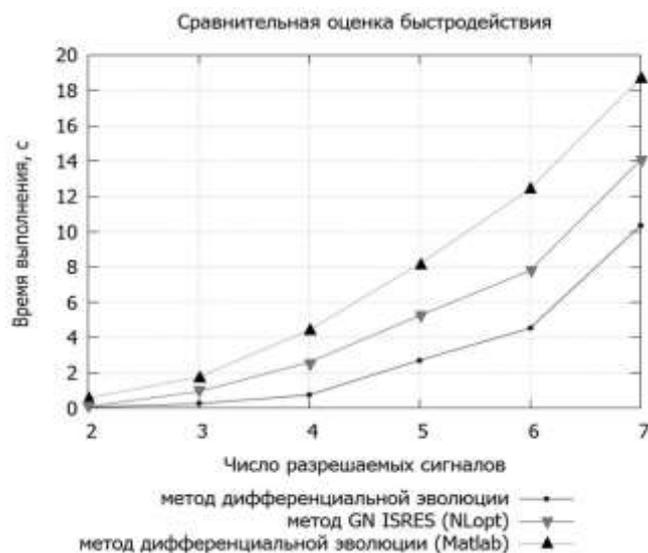


Рис. 8. Сравнительная оценка быстродействия алгоритмов оптимизации

Основная, ресурсоёмкая по времени выполнения, операция – поиск максимума функции правдоподобия при количестве сигналов в реализации, равном семи, выполняется за время 18 с. Дополнительное распараллеливание процесса позволяет снизить эту оценку требуемого времени. В ходе работы проведена оценка быстродействия алгоритма дифференциальной эволюции при использовании его многопоточной реализации. На рисунке 9 показана зависимость времени выполнения алгоритма от числа потоков при параллельном выполнении.

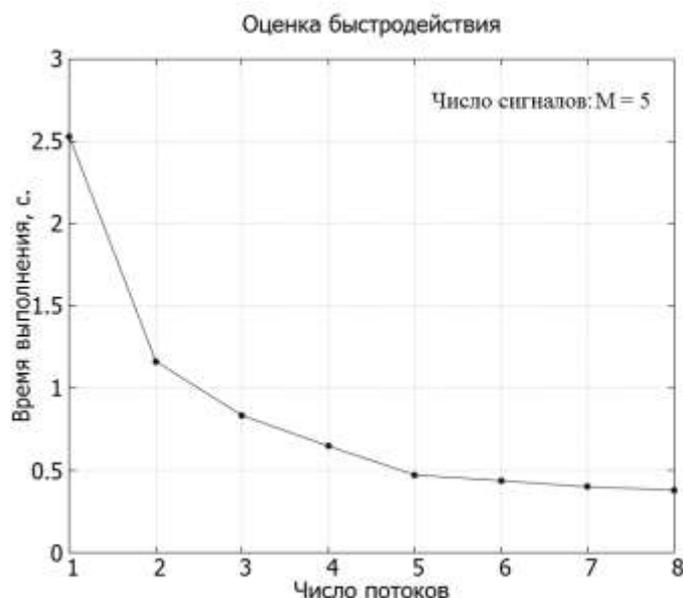


Рис. 9. Оценка быстродействия параллельного алгоритма дифференциальной эволюции

Рисунок иллюстрирует эффективность распараллеливания процесса оптимизации. Дальнейшее повышение быстродействия возможно путём реализации алгоритма на многопроцессорных архитектурах с применением MPI, а также сигнальных и графических процессорах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перов А. И. Статистическая теория радиотехнических систем. Учебное пособие для вузов. – М.: Радиотехника, 2003, 400 с.
2. Пахотин, В. А. Оптимальный приемник для обнаружения совокупности сигналов с неизвестными параметрами. / В. А. Пахотин, Р. В. Симонов, К. В. Власова, С. В. Петров // Цифровая обработка сигналов, 2020. – №4. – С.36-42.
3. Власова, К. В. Оценка угловых параметров пространственных сигналов на основе преобразованного функционала правдоподобия / К.В. Власова, В.А. Пахотин, Р. В. Симонов, А. И. Бабинович // Сборник трудов V Международного Балтийского морского форума. Часть 1. – Калининград: изд-во БГАРФ, 2017. – С. 452-461.
4. 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.
5. Ван Трис. Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции. Том 1. Теория обнаружения, оценок и линейной модуляции: перевод с англ. под ред. проф. В. И. Тихонова. – М.: «Советское радио», 1972. – 744 с.
6. К. Хелстром Статистическая теория обнаружения сигналов: пер. с англ. Г. Ю. Кобзарева / под. Ред. Г. Ю. Кобзарева. – М.: изд-во Иностранной литературы, 1963. – 432с.
7. Пантелеев, А. В. Применение метода дифференциальной эволюции для оптимизации параметров аэрокосмических систем / А. В. Пантелеев, И. Ф. Дмитраков // Электронный журнал «Труды МАИ». – Вып. 37, 2011.

ESTIMATION OF SIGNAL PARAMETERS BY THE MAXIMUM LIKELIHOOD METHOD USING EVOLUTIONARY OPTIMIZATION ALGORITHMS

¹Simonov Roman Valerievich, grad;

²Pachotin Valery Anatolyevich, prof., doctor of physico-mathematical sciences;

³Korotey Evgeniy Vladimirovich, the associate professor of department of ship radio engineering systems

^{1,2}Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russian Federation,
e-mail: VPakhotin@kantiana.ru

³Baltic fishing fleet state academy, Kaliningrad, Russian Federation,
e-mail: eugeny_korotey@mail.ru

The paper shows the features of maximizing the likelihood function with the presence of local maxima. A study of the possibilities of maximizing the likelihood function based on evolutionary algorithms in order to significantly reduce the computation time was described. The possibility of using the algorithm with the number of signals equal to 7 was shown.