

На правах рукописи



Бураковский Павел Евгеньевич

**МЕТОДЫ РАСЧЁТА ПРОЧНОСТИ И РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ СУДОВ ФЛОТА РЫБНОЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ ИХ БЕЗОПАСНОСТИ
В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

05.08.01 Теория корабля и строительная механика

05.08.03 Проектирование и конструкция судов

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Калининград – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Калининградский государственный технический университет»

Научный консультант:

Нечаев Юрий Иванович,
заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Зуев Валерий Андреевич,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой кораблестроения и авиационной техники ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»

Кутейников Михаил Анатольевич,
доктор технических наук, начальник отдела конструкции корпуса и судовых устройств ФАУ «Российский морской регистр судоходства»

Чистов Валентин Борисович,
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры основ инженерного проектирования ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова»

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта»

Защита состоится «17» декабря 2021 г. в 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д 411.004.02 при ФГУП «Крыловский государственный научный центр» по адресу: 196158, г. Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ФГУП «Крыловский государственный научный центр» (<https://krylov-centre.ru/about/councils/obyavleniya-ob-otkrytykh-zashchitakh/>).

Автореферат разослан «28» июля 2021 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 411.004.02
кандидат технических наук, доцент

О.В. Малышев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.

Продовольственная безопасность Российской Федерации является одним из главных направлений обеспечения национальной безопасности страны. Одним из её главных показателей является потребление пищевых продуктов, в том числе рыбной продукции, в расчёте на душу населения. Это сформулировано в «Доктрине продовольственной безопасности Российской Федерации», утвержденной Указом Президента РФ от 30.01.2010 г. № 120 и «Морской доктрине РФ», утвержденной президентом РФ 26.07.2015 года. По среднедушевому потреблению рыбной продукции РФ не входит даже в десятку ведущих по этому показателю стран мира. Это объясняется высокой степенью износа фондов рыбохозяйственного комплекса и относительно низким уровнем производственной эффективности. Основой материально-технической базы рыбохозяйственного комплекса является рыбопромысловый флот, который составляет более 70% основных производственных фондов отрасли и обеспечивает более 90% общего вылова.

Промысловые суда работают в тяжёлых условиях на всех широтах Мирового океана, в различных климатических условиях от Арктики до Антарктики, осуществляют швартовку в открытом море и работу в битых и сплошных льдах, поэтому серьёзной проблемой является обеспечение безопасности мореплавания согласно «Морской доктрине РФ». Несмотря на постоянное совершенствование навигационных систем судов и конструкций их корпусов, уровень аварийности остается высоким. Такие аварии часто сопровождаются разрушением корпусных конструкций, потерей грузов, гибелью людей, загрязнением окружающей среды и др. Повреждения корпусных конструкций, не связанные с гибелью судов, выводят суда из эксплуатации для последующего ремонта, что резко снижает промысловое время, а, следовательно, и их эффективность.

«Человеческий фактор» является одним из основных источников возникновения аварий, так как они могут развиваться очень быстро или в условиях существенной неопределенности, когда человек не способен своевременно оценить степень опасности ситуации. Одним из известных путей предупреждения таких аварий является внедрение в практику эксплуатации судов бортовых интеллектуальных систем (ИС), обеспечивающих информационную поддержку принятия решений судоводителем и прогнозирование возможности возникновения аварий. Большой вклад в развитие теории бортовых ИС новых поколений внесли А. В. Бухановский, А. Б. Дегтярев, С. А. Дубовик, Ю. И. Нечаев, О. Н. Петров, Ю. Л. Сиек, Д. А. Скороходов. ИС новых поколений содержат динамическую базу знаний с нечеткой формальной системой (НФС), отображающей современное состояние предметной области – «прочность судов». При совершенствовании базы знаний необходимо включить встроенные процедуры, характеризующие разработанные методы оценки эксплуатационной прочности (стандартные ситуации), при возникновении нештатных ситуаций адаптивная система «подстраивает» логику НФС на основе данных динамических измерений под возникшую нештатную ситуацию.

Причиной ряда серьёзных аварий послужило отсутствие учета при проек-

тировании судов особенностей взаимодействия корпуса судна с внешней средой в штормовых условиях, когда на палубу судна в носовой оконечности при её погружении в воду действуют гидродинамические силы, создающие существенную опасность потери прочности и остойчивости судна. Проблемой заливаемости судов на волнении и исследованием изменения восстанавливающего момента в зависимости от параметров волнения занимались А. Д. Батуев, С. Н. Благовещенский, И. К. Бородай, М. А. Васько, Г. В. Виленский, А. Н. Владимиров, А. В. Герасимов, С. В. Каленчук, Д. В. Кондриков, В. В. Луговский, Ю. А. Нецветаев, В. Б. Образцов, С. А. Огай, В. Г. Платонов, Н. Н. Рахманин, Н. Б. Севастьянов, В. Н. Тряскин, В. В. Ярисов и другие, однако явление зарываемости носовой оконечности в волну в работах этих ученых не рассматривалось. Следует заметить, что гидродинамические воздействия на палубу судна в носовой оконечности возникают в условиях динамического характера движения судна и внешней среды, что значительно затрудняет математическое моделирование данного процесса. Для повышения безопасности мореплавания в штормовых условиях необходимо теоретическое обоснование модернизации конструкции носовой оконечности судов.

Определённую опасность для мореплавания представляют аномальные волны. Наблюдения последних лет с платформ, установленных в Северном море, а также со спутников ERS-1 и ERS-2 по программе Евросоюза MaxWave показали, что это не такое уж редкое явление. Так, за три недели наблюдений было обнаружено более десяти волн, превышающих 25 м. Не любое судно может выдержать их воздействие без последствий, поэтому необходимо уметь оценивать вероятность встречи судна с такими волнами.

Снижению надёжности корпусов судов способствуют и эксплуатационные повреждения корпусных конструкций, получаемые при выполнении судами производственных операций, связанных со швартовкой в открытом море, которая нередко сопровождается жёсткими навалами, а также работа судов в битых и сплошных льдах. Проблеме повреждаемости судовых корпусных конструкций посвящены труды К. Г. Абрамяна, С. В. Антоненко, Е. М. Апполонова, А. Г. Архангородского, Н. В. Барабанова, Л. М. Беленького, П. А. Бимберекова, Г. В. Бойцова, А. С. Брикера, А. И. Бронского, Е. П. Бураковского, Н. Л. Великанова, М. В. Войлошникова, В. М. Волкова, Ю. В. Головешкина, Г. В. Егорова, Н. Ф. Ершова, В. А. Зуева, В. В. Козлякова, Г. Б. Крыжевича, В. А. Кулеша, В. А. Курдюмова, М. А. Кутейникова, О. Е. Литонова, В. Т. Луценко, А. И. Максимаджи, А. Ю. Неугодова, О. М. Палия, П. Ф. Папковича, Б. И. Пименова, В. П. Прохничка, Н. А. Решетова, А. А. Родионова, О. И. Свешникова, Л. Н. Семенова, А. Г. Смирнова, Н. А. Таранухи, В. Н. Тряскина, О. Я. Тимофеева, В. Б. Чистова, Ю. А. Шиманского и других. Как известно, эксплуатационные повреждения вызываются воздействием на корпусные конструкции интенсивных локально распределенных нагрузок, что требует разработки эффективных расчётных методик, позволяющих оценивать риск разрушения и описывающих деформирование судовых корпусных конструкций с учётом нелинейных эффектов. Оценкой риска разрушения конструкций занимались такие известные учёные, как

В. М. Волков, В. В. Козляков, Г. Б. Крыжевич, О. Е. Литонов, А. А. Миронов, О. М. Палий, С. В. Петин, О. Я. Тимофеев, В. Н. Тряскин и другие, но в полном объеме данный вопрос до настоящего времени не решён. Недостаточно разработаны методы, позволяющие оценить резервы пластического деформирования конструкций и схемы их модернизации, снижающие риск разрушения корпуса.

Обеспечение безопасной эксплуатации судов связано с совершенствованием расчётных методов, архитектуры и критериальной базы при проектировании и оценке технического состояния объектов морской техники. Особую актуальность здесь приобретают вопросы накопления упруго-пластических деформаций при восприятии эксплуатационных нагрузок и оценка риска разрушения корпусных конструкций. Труды Е. М. Апполонова, Н. В. Барабанова, Л. М. Беленького, Г. В. Бойцова, А. И. Бронского, Е. П. Бураковского, Ю. А. Воскресенского, В. В. Давыдова, Г. В. Егорова, В. В. Козлякова, Г. Б. Крыжевича, В. А. Кулеша, А. А. Курдюмова, М. А. Кутейникова, О. Е. Литонова, А. К. Осмоловского, О. М. Палия, А. А. Родионова, О. Я. Тимофеева, В. Н. Тряскина и других учёных значительно продвинули решение этой проблемы. Однако многие её аспекты требуют дальнейшего исследования в направлении развития методов оценки величины внешних нагрузок, обоснованных прогнозов технического состояния корпусов судов и разработки конструктивных решений, обеспечивающих безопасность судов в условиях многократного действия интенсивных локально распределённых нагрузок.

В «Морской доктрине РФ» указывается на решение ряда долгосрочных задач, являющихся содержанием морской политики, в том числе развитие и надежное функционирование комплексной системы обеспечения безопасности мореплавания, в том числе в морских портах и на подходах к ним. Поставлена задача добычи водных биоресурсов за пределами 200-мильной зоны РФ и в отдалённых районах Мирового океана, что приведёт к необходимости осуществлять большие переходы, в том числе и по традиционным трафикам, проливам и т.д., где возникает угроза безопасности из-за навигационных ошибок, столкновений и посадок судов на мель, приводящих к гибели судов. Для минимизации последствий столкновений и посадок на мель необходима разработка конструктивных мероприятий, снижающих ущерб от данного вида аварий.

Таким образом, разработка методов расчёта прочности и конструктивных мероприятий, направленных на обеспечение эксплуатационной прочности корпусов судов и повышение безопасности мореплавания, представляет собой **научную проблему**, имеющую важное хозяйственное значение, соответствующую национальным интересам РФ в Мировом океане и определяемую «Доктриной продовольственной безопасности Российской Федерации» и «Морской доктриной Российской Федерации».

Объектом исследования являются методы и методики расчёта прочности и оптимизации проектирования и конструирования судов, основанные на изучении поведения балок, пластин и пластинчато-стержневых систем под действием эксплуатационных нагрузок, а также способы обеспечения прочности и надёжности корпуса и отдельных конструкций в условиях эксплуатации.

Предмет исследования – конструкции, подкрепления и схемы модернизации конструкций корпусов судов, а также методы расчёта и прогнозирования параметров напряжённо-деформированного состояния указанных конструкций в реальных условиях эксплуатации.

Цель работы – разработка методов расчёта прочности судовых корпусных конструкций в экстремальных условиях эксплуатации и рекомендаций по проектированию конструкций для обеспечения их прочности и надёжности, повышения безопасности мореплавания посредством рационального конструирования, подкрепления при повреждениях, а также модернизации.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные **задачи исследования**:

1) разработать физическую и математическую модель взаимодействия судна с внешней средой в условиях захвата его носовой оконечности волной;

2) разработать математические модели оценки риска столкновения и посадки судов на мель для обоснования конструктивных решений при проектировании судов;

3) разработать математическую модель оценки риска встречи судов с аномальными волнами;

4) обосновать выбор профиля седловатости палубы для предотвращения захвата волной носовой оконечности судов;

5) предложить рекомендации по модернизации конструкций корпусов судов, снижающие последствия навигационных аварий, а также повышающие безопасность судов в штормовых условиях;

6) предложить методику расчёта общей прочности судов в экстремальных условиях эксплуатации;

7) разработать методику расчёта больших упруго-пластических прогибов пластин судовых перекрытий, учитывающую закономерности их деформирования при восприятии интенсивных нагрузок с падающей интенсивностью, изменяющейся в процессе нагружения, и оценить риск их разрушения при наличии дефектов в смежных с нагружаемым районах;

8) разработать алгоритм прогнозирования стрелок прогибов пластин при восприятии эксплуатационных нагрузок, позволяющий выполнять проектное обоснование толщин судовых пластин, и решать обратную задачу – определять по прогибам величины внешних нагрузок;

9) разработать методики расчёта прочности балочных конструкций корпусов судов на основе эффективных инженерных методов расчёта физически и геометрически нелинейных задач, связанных с пластическим деформированием элементов корпусных конструкций;

10) создать методику оценки рисков разрушения при упруго-пластическом деформировании и резервов прочности судовых бортовых перекрытий, подверженных действию интенсивных локально распределённых нагрузок, для обеспечения равнопрочности элементов бортовых перекрытий при проектировании судов;

11) разработать эффективные конструктивные решения по подкреплению элементов бортовых перекрытий судов, уменьшающие риск их разруше-

ния.

Научная новизна диссертационной работы заключается в разработке подходов, методов и алгоритмов для расчёта прочности элементов корпусных конструкций в экстремальных условиях эксплуатации и обоснования эффективности применяемых схем подкрепления и модернизации, а также конструктивных решений, направленных на повышение безопасности мореплавания. В частности, автором предложены:

1) новая модель взаимодействия судна с внешней средой, связанная с захватом волной носовой оконечности судна, объясняющая гибель судов в штормовых условиях, а также не имеющие аналогов в мировой практике конструктивные мероприятия для обеспечения безопасности мореплавания;

2) научное обоснование выбора профиля седловатости палубы при проектировании судов из условия ограничения гидродинамических давлений на носовую оконечность;

3) новые принципы нормирования общей прочности корпусов морских судов;

4) математические модели оценки риска посадки судов на мель в условиях переменной глубины акватории и риска столкновения судов, а также конструктивные решения, снижающие ущерб от таких аварий;

5) математическая модель оценки риска встречи судов с аномальными волнами;

6) методы расчёта и оценки риска разрушения судовых пластин, работающих в составе перекрытий в упруго-пластической стадии, подверженных действию контактных нагрузок с падающей интенсивностью, переменной в процессе нагружения;

7) алгоритмы оценки и прогнозирования стрелок прогиба и рисков разрушения пластинчатых элементов судовых корпусов при их случайном эксплуатационном нагружении;

8) методы расчёта нелинейного упруго-пластического деформирования локально нагруженной балки, лежащей на нелинейном упруго-пластическом основании с переменными характеристиками жёсткости, с учетом действия продольных усилий и большой физической и геометрической нелинейности;

9) методы расчёта бортовых перекрытий с учётом взаимодействия их конструктивных элементов в упруго-пластической стадии и оценки риска их разрушения при действии интенсивных локально распределённых нагрузок, включая область запредельного состояния, на основании оценки распорных характеристик балочных конструкций судовых перекрытий (шпангоутов и стрингеров);

10) научное обоснование схем модернизации, повышающих надёжность работы и снижающих риск разрушения корпусных конструкций, а также установки для осуществления экспериментальных исследований.

Теоретическая значимость работы обусловлена разработкой научно обоснованных рекомендаций по расчёту прочности и проектированию конструкций корпусов судов для обеспечения их прочности и надёжности в экстремальных ситуациях в процессе эксплуатации с использованием новых методик расчёта прочности, учитывающих особенности нелинейного деформирова-

ния судовых корпусных конструкций и взаимодействия судна с внешней средой.

Практическая значимость состоит в разработке и внедрении методов и методик проектирования для снижения повреждаемости и повышения безопасности мореплавания с применением новых конструктивных решений, в том числе:

- методики выбора профиля седловатости палубы и схем модернизации конструкций носовой оконечности судов, способствующих повышению безопасности мореплавания в штормовых условиях при возникновении опасности захвата волной носовой оконечности (патенты №2582328, №2595094, №2617866, №2621407, №2667025, №2672225, №2672227, №2682385, №2685369, №2689094, №2690642);

- конструктивных решений отдельных узлов и конструкций, снижающих последствия навигационных аварий (патенты №2463198, №2518695, №2527619, №2652502, №2677950, №2690658, №2693725, №2694705);

- новых схем подкрепления и снижения риска разрушения перекрытий и их составных элементов, испытывающих действие локально распределённых нагрузок высокой интенсивности (патенты №2382714, №2463197, №2472665, №2472666, №2486096, №2507103, №2621405, №2672147, №2690784, №2716890);

- методов и методик расчёта, позволяющих оценивать и прогнозировать техническое состояние корпуса судна с износами и повреждениями при ремонте и модернизации, а также осуществлять мониторинг процесса изменения технического состояния судовых корпусных конструкций в процессе эксплуатации (патент №2689048);

- установок для испытания моделей судов и экспериментального изучения работы конструкций корпуса и их составных элементов (патенты №2533999, №2645430, №2667434, №2688611) в научных исследованиях;

- методики проектирования локально загруженных бортовых перекрытий с равнопрочными размерами связей и выбора жёсткости промежуточного шпангоута при действии локально распределённых эксплуатационных нагрузок;

- информационного обеспечения учебного процесса, направленного на подготовку будущих специалистов в области кораблестроения и океанотехники;

- учебника для реализации основной профессиональной образовательной программы высшего образования по укрупненной группе специальностей и направлений подготовки «Техника и технологии кораблестроения и водного транспорта» и учебного пособия для подготовки специалистов по направлению «Кораблестроение и океанотехника».

Внедрение результатов диссертационного исследования.

Результаты работы внедрены и используются в практической деятельности Балтийской военно-морской базы при оценке технического состояния и ремонте корпусов кораблей и судов Балтийского флота, а также на судоремонтных предприятиях региона. Внедрение результатов работы дало экономический эф-

фект 2230 тыс. рублей ежегодно.

Ряд научных результатов внедрён в практику научной работы НИИ кораблестроения и вооружения ВМФ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия» имени адмирала Н.Г. Кузнецова.

Теоретические результаты работы и практические рекомендации по расчёту прочности и совершенствованию корпусных конструкций использованы в учебнике «Эксплуатационная прочность судов», учебном пособии «Эксплуатационная прочность корпусов промысловых судов», при чтении автором курсов «Теория и устройство судна», «Технология технического обслуживания и ремонта судов», включенных в учебный план для специальности 26.05.06 – «Эксплуатация судовых энергетических установок» БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ», при чтении курса «Эксплуатационная прочность корпусов промысловых судов» для бакалавров по направлению подготовки 26.03.02 – «Кораблестроение, океанотехника и системотехника объектов морской инфраструктуры» ФГБОУ ВО «КГТУ», при чтении курса «Теория, устройство и живучесть корабля» в филиале ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия» имени адмирала Н.Г. Кузнецова (г. Калининград) и в учебном процессе на кафедре «Общевойскакой подготовки» БГТУ им. Д.Ф. Устинова «ВОЕНМЕХ».

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач в работе использованы методы строительной механики корабля, теории корабля, теории подобия, математического моделирования, методы вычислительной математики, теория вероятностей и математическая статистика, физическое моделирование, а также методы прикладного программирования и др.

При разработке схем подкрепления судовых корпусных конструкций и расчёте их элементов использован теоретический аппарат соответствующих базовых дисциплин. Для оценки напряжённо-деформированного состояния корпусных конструкций и их составных элементов применены методы строительной механики корабля, упруго-пластический анализ поведения конструкций, теория предельного равновесия, математическое и физическое моделирование, теория прерывистых связей и пр.

Положения, выносимые на защиту:

1) рекомендации по обеспечению безопасности мореплавания на основе математической модели взаимодействия судна с внешней средой в условиях захвата волной его носовой оконечности, включающие комплекс конструктивных решений, направленных на предотвращение этого явления (патенты №2582328, №2595094, №2617866, №2621407, №2667025, №2672225, №2672227, №2682385, №2685369, №2689094, №2690642);

2) методика оценки риска разрушения судовых пластин при действии многократных интенсивных локально распределенных нагрузок, основанная на анализе их деформирования под действием контактных эксплуатационных нагрузок с падающей и переменной в процессе нагружения интенсивностью, а также алгоритме прогнозирования их прогибов;

3) методика учёта большой физической и геометрической нелинейности при деформировании элементов стержневых систем;

4) методика оценки риска разрушения балок и бортовых перекрытий су-

довых корпусов и методика расчёта их упруго-пластического деформирования с учетом особенностей взаимодействия составных элементов бортовых перекрытий, в том числе в запредельном состоянии;

5) комплекс новых конструктивных решений, снижающих риск разрушения бортовых конструкций, на основе повышения их несущей способности путем подкрепления (патенты №2382714, №2463197, №2472665, №2472666, №2486096, №2507103, №2621405, №2672147, №2690784, №2716890);

б) рекомендации по модернизации корпуса, повышающие безопасность мореплавания путем ограничения последствий навигационных аварий, на основе проектирования элементов конструктивной защиты и математических моделей оценки вероятности столкновений и посадки судов на мель (патенты №2463198, №2518695, №2527619, №2652502, №2677950, №2690658, №2693725, №2694705), а также методика проектирования элементов конструктивной защиты.

Для проверки **достоверности** выдвинутых теоретических положений осуществлялось их сопоставление с результатами экспериментов на конструктивно-подобных моделях и полунатурных конструкциях, результатами испытаний моделей судов в опытовом бассейне, результатами расчёта с использованием численных методов решения нелинейных дифференциальных уравнений и МКЭ, а также опытом эксплуатации и данными статистики.

Апробация работы проводилась на следующих международных и всероссийских научно-технических конференциях: «Инновации в науке и образовании» г. Калининград (2006, 2007, 2009, 2011 гг.); «The Seventeenth International Conference on Hydrodynamics in Ship Design HYDRONAV 2007» г. Вроцлав, Польша (2007 г.); конференция по строительной механике корабля памяти профессора П.Ф. Папковича г. Санкт-Петербург (2007, 2009, 2012, 2015 гг.); конференция по строительной механике корабля памяти академика Ю.А. Шиманского г. Санкт-Петербург (2008, 2011, 2013, 2016 гг.); «Современные технологии в кораблестроительном и авиационном образовании, науке и производстве» г. Нижний Новгород (2009 г.); «Морская индустрия, транспорт и логистика в странах региона Балтийского моря: новые вызовы и ответы» г. Светлогорск (2011, 2012 гг.); «Инновации в науке, образовании и бизнесе» г. Калининград (2012, 2013, 2014 гг.); «Międzynarodowa konferencja naukowo-techniczna EXPLORSHIP: Problemy eksploatacji obiektów pływających i urządzeń portowych» г. Свиноустье, Польша (2012 г.); «Балтийский морской форум» г. Светлогорск, г. Калининград (2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019 гг.); «XVIII Международная конференция по вычислительной механике и современным прикладным программам и системам (ВМСППС'2013)» г. Алушта (2013 г.); конференция по строительной механике корабля «Бубновские чтения» г. Санкт-Петербург (2014 г.); «11th International conference on marine navigation and safety of sea transportation TRANSNV-2015» г. Гдыня, Польша (2015 г.); конференция по строительной механике корабля, посвященная памяти профессора В.А. Постного и 90-летию со дня его рождения г. Санкт-Петербург (2017 г.); V Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы освоения биологических ресурсов Мирового океана» г. Владивосток (2018 г.); конферен-

ция по строительной механике корабля, посвященная 125-летию основания «Крыловского государственного научного центра» г. Санкт-Петербург (2018 г.); конференция по строительной механике корабля, посвященная памяти д.т.н., профессора О.М. Паляя г. Санкт-Петербург (2019 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 138 работ, в том числе 4 монографии (2 из них без соавторов), 34 патента РФ на изобретение, 21 из которых без соавторов, 4 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ. В изданиях из «Перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» опубликовано 38 работ, 17 из которых без соавторов, доля автора в остальных составляет от 40 до 75%.

Результаты диссертационного исследования получены в рамках выполнения комплекса госбюджетных научно-исследовательских работ:

- «Разработка эффективных конструктивных мероприятий по повышению несущей способности элементов бортовых перекрытий» (Рег. № 01201464624, 2014 г.);
- «Разработка конструктивных мероприятий, снижающих последствия столкновений судов» (Рег. № 115052010029, 2015 г.);
- «Разработка конструктивных мероприятий, повышающих безопасность судов при захвате волной носовой оконечности» (Рег. № АААА-А16-116040610045-8, 2016 г.);
- «Экспериментальное исследование остойчивости при захвате волной носовой оконечности судна» (Рег. № АААА-А17-117041810026-1, 2017 г.);
- «Исследование сценариев гибели судов вследствие потери остойчивости в условиях развитого волнения» (Рег. № АААА-А18-118040590116-0, 2018 г.);
- «Исследование мореходности судна с изменяемой геометрией носовой оконечности в условиях захвата ее волной» (Рег. № АААА-А19-119110690080-2, 2019 г.).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, шести глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и шести приложений. Общий объем работы 495 страниц, из которых 66 страниц приложений с 24 иллюстрациями, основная часть включает 10 таблиц и 168 иллюстраций. Список литературы состоит из 370 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, дана оценка научной новизны, практической значимости полученных результатов.

В первой главе рассмотрены закономерности возникновения аварийных происшествий с судами мирового флота. Представлены данные по причинам потерь судов, из которых следует, что несмотря на постоянное совершенствование навигационного оборудования, аварии по причине навигационных оши-

бок (столкновения, посадки на мель) составляют в сумме почти 40% от всех видов происшествий, возникающих в процессе эксплуатации судов. Отмечено, что аварийность на промысловом флоте несколько выше, чем на судах других ведомств, что связано со спецификой эксплуатации промыслового флота, проведением швартовых операций в открытом море, заходом в битый лёд, обледенением, работой с орудиями лова и т.д. Показана возможность гибели судов на развитом встречном волнении от потери прочности и остойчивости в результате захвата волной носовой оконечности судна.

Обращено внимание на тот факт, что бортовые перекрытия судов являются самыми повреждаемыми конструкциями, т.к. помимо деформаций от общего изгиба они должны воспринимать нагрузки местного характера: гидростатические, волновые и интенсивные локально распределенные нагрузки. Статистические данные по повреждениям бортовых конструкций свидетельствуют, что наибольшее их число вызвано именно интенсивными локально распределёнными нагрузками, поэтому снижение объёмов повреждений и повышение надёжности бортовых конструкций не возможно без анализа их поведения при восприятии интенсивных локальных нагрузок.

Наиболее эффективным для ремонта бортовых перекрытий судов является применение подкреплений. При их разработке должно учитываться, что бортовая обшивка помимо участия в общем продольном изгибе корпуса подвергается действию интенсивных локально распределенных нагрузок, а также участвует в изгибе набора в качестве присоединенных поясков и играет роль некоторого упруго-пластического основания для балок набора. Поскольку пластические деформации связей бортовых конструкций, обеспечивающих местную прочность, допускаются, возникает необходимость рассматривать задачу выбора размеров подкрепляющих связей из условия деформирования их в пластической стадии. При учёте взаимодействия шпангоута с обшивкой данная задача сводится к рассмотрению деформирования упруго-пластической балки, лежа-

щей на нелинейном упруго-пластическом основании.

Снижение повреждаемости корпусов судов может быть обеспечено не только посредством подкреплений и модернизации, но и за счёт использования бортовых ИС, которые могут подсказать судоводителю оптимальные курсы и скорости движения судов (рисунок 1).



Рисунок 1 – Концептуальная модель интегрированного вычислительного комплекса контроля эксплуатационной прочности судна

Бортовые ИС разрабатывают, в основном, в рамках отдельных разделов корабельной науки, таких как остойчивость, непотопляемость. Раздел, посвящённый задачам регламентации эксплуатационной прочности требует серьезной проработки, так как в экстремальных ситуациях человек зачастую не в состоянии принимать оптимальные решения по управлению судном для обеспечения его прочности в условиях дефицита времени и неполноты исходной информации. Концептуальная модель бортовой ИС контроля эксплуатационной прочности представлена на рисунке 1.

Рассмотрены подходы к оценке риска при эксплуатации судов флота рыбной промышленности. Показана необходимость разработки математических моделей для оценки вероятности возникновения навигационных аварий и повреждений корпусных конструкций.

Вторая глава посвящена обеспечению безопасности судов в условиях захвата волной носовой оконечности на встречном волнении. На основании анализа аварии танкера «Находка», вызвавшей большой интерес специалистов, занимающихся совершенствованием критериальной базы и архитектурных решений морских судов новых поколений, отмечены особенности взаимодействия судна с внешней средой и предложены конструктивные решения, позволяющие снизить риск аварий судов в штормовых условиях на встречном волнении.

Сценарий гибели танкера «Находка» у берегов Японии в 1997 году связан с периодическим погружением в воду носовой оконечности на встречном волнении и существенным изменением режима обтекания палубы. Динамика взаимодействия в этих условиях характеризуется возникновением значительных нагрузок, вызванных асимметричным обтеканием погруженной палубы, которую можно рассматривать как крыло сложной формы, расположенное под углом атаки к набегающему потоку жидкости (рисунок 2, где σ – частота волны; r_w – радиус орбиты на свободной поверхности воды; V_w – окружная скорость частиц воды в волне; V_{WH} – горизонтальная скорость частиц воды в волне; V_{wV} – вертикальная скорость частиц воды в волне; h_B – высота надводного борта; ψ_δ – угол дифферента, $O\xi\zeta$ – система координат). Потеря площади ватерлинии (до 50% и более) вызывала периодическое ухудшение продольной и поперечной остойчивости.

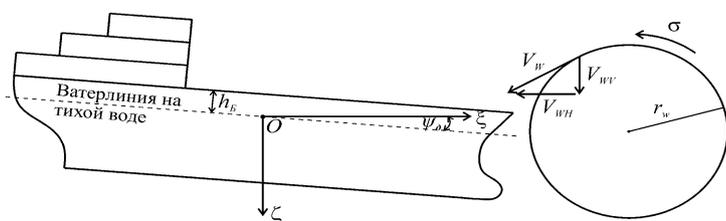


Рисунок 2 – Схема обтекания носовой оконечности судна

Величины гидродинамических давлений, действующих на палубу судна в носовой оконечности в условиях её захвата волной, могут быть определены в первом приближении из уравнений килевой и вертикальной качки судна в условиях зарывания носовой оконечности в воду. Модифицированное уравнение

килевой качки является нелинейным относительно угла дифферента, т.к. угловая скорость судна при килевой качке определяет результирующую скорость обтекания палубы V_R , и будет иметь вид:

$$\begin{aligned} & (J_y + \lambda_{55}) \cdot \ddot{\psi}_\delta + \nu_{55} \cdot \dot{\psi}_\delta + D \cdot H \cdot \psi_\delta - \gamma_B \cdot \int_0^{\psi_\delta} \left(I_F + F_{II} \cdot \xi_F^2 \cdot \frac{S_{BI}}{S_{BI} - F_{II}} \right) \cdot d\psi_\delta - \\ & - \frac{1}{2} C_N \cdot \frac{\gamma_B}{g} \cdot V_R^2 \cdot F_{II} \cdot \xi_F = -r_w \cdot [\sigma \cdot b_1' \cdot \cos(\sigma_k \cdot t) + (\gamma_B \cdot b_1 - \sigma^2 \cdot b_1'') \cdot \sin(\sigma_k \cdot t)]. \end{aligned} \quad (1)$$

где D – водоизмещение судна; ψ_δ – угол дифферента судна; J_y – момент инерции массы судна относительно центра тяжести судна; γ_B – удельный вес воды; λ_{55} – суммарная присоединенная масса (присоединенный момент инерции) при килевой качке; ν_{55} – суммарный коэффициент сопротивления для судна при килевой качке; S_{BI} – площадь ватерлинии судна; H – продольная метацентрическая высота; b_1 – коэффициент главной части возмущающих сил, определяемый по приближённым формулам А.В. Герасимова; b_1'' – коэффициент для дифракционных компонентов возмущающих сил инерционной природы, определяемый по приближённым формулам А.В. Герасимова; b_1' – коэффициент для демпфирующих дифракционных компонентов возмущающих сил, определяемый по приближённым формулам А.В. Герасимова; σ_k – кажущаяся частота волны; r_w – радиус орбиты на свободной поверхности воды; F_{II} – погруженная в воду площадь палубы, вычисляемая с использованием теоретического чертежа; ξ_F – координата центра тяжести погруженной площади палубы, отсчитываемая от миделя; I_F – собственный момент инерции погруженной в воду площади палубы относительно оси, перпендикулярной диаметральной плоскости; V_R – результирующая скорость обтекания палубы; C_N – гидродинамический коэффициент, зависящий от телесности корпуса в носовой оконечности и от надпалубных конструкций в носовой оконечности (фальшборт, кнехты и т.д.).

Этот коэффициент был уточнён экспериментально на специально изготовленной в масштабе 1:100 и испытанной в опытовом бассейне модели носовой оконечности судна.

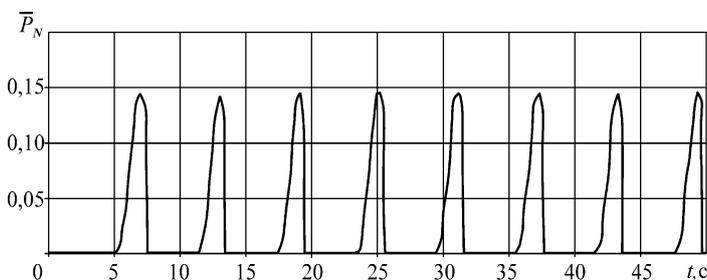


Рисунок 3 – Экстремальные значения гидродинамической силы, действующей на палубу судна

Результаты расчёта гидродинамических сил P , действующих на носовую оконечность, представлены на рисунке 3.

Результаты эксперимента подтвердили отрицательное влияние фальшборта на безопасность судна в условиях захвата волной

носовой оконечности. Наличие фальшборта приводит к росту гидродинамиче-

ских нагрузок, действующих на палубу судна, на величину порядка 25%.

Захват волной носовой оконечности сопровождается резким снижением характеристик остойчивости судна, что может способствовать его опрокидыванию и практически исключает возможность спасения людей, находящихся на борту. Расчётно-экспериментальные исследования, выполненные с использованием специально разработанной установки (патент №2667434), и представленные на рисунке 4, свидетельствуют о том, что в условиях захвата волной носовой оконечности происходит трансформация диаграммы статической остойчивости и при сравнительно небольших усилиях происходит обнуление начальной поперечной метацентрической высоты. Таким образом, опрокидывание может произойти уже при сравнительно малых давлениях на палубу, когда величина

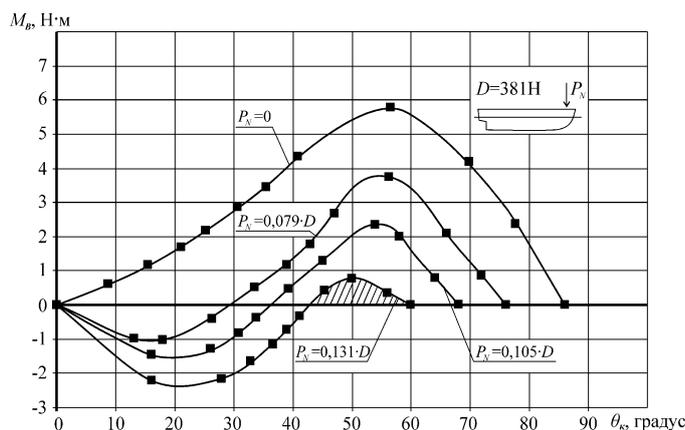


Рисунок 4 – Трансформация диаграммы статической остойчивости судна в условиях захвата волной носовой оконечности

величина результирующей гидродинамической силы, создающей дополнительный кренящий момент, составляет всего $P_N \approx 0,13 \cdot D$, что примерно соответствует величине малого груза.

Эта же гидродинамическая сила создает и дополнительный динамический изгибающий момент $M_{дон}$, результаты его расчёта представлены в таблице 1.

Можно констатировать, что этот момент может быть выше динамического изгибающего момента,

вызванного ударами волн в развалы бортов и определяемого в соответствии с Правилами Регистра, и находится в некоторых случаях на уровне волнового изгибающего момента.

Таблица 1 – Сопоставление расчётных изгибающих моментов в корпусе судна

№ п/п	Длина судна L , м	Волновой изгибающий момент M_w , кН·м		Изгибающий момент от ударов волн в развал бортов M_F , кН·м	Дополнительный динамический изгибающий момент при захвате волной носовой оконечности $M_{дон}$, кН·м
		При перегибе	При прогибе		
1	110	$1,53 \cdot 10^5$	$-2,06 \cdot 10^5$	$-1,34 \cdot 10^4$	$2,4 \cdot 10^4$
2	168	$8,49 \cdot 10^5$	$-9,53 \cdot 10^5$	$-1,63 \cdot 10^5$	$2,6 \cdot 10^5$

При больших давлениях P_N на палубу в носовой оконечности может наблюдаться случай выхода кормовой части судна из воды, что приведет к появлению второго экстремума изгибающего момента и возможности отрыва кормовой оконечности судна.

На этом основании была предложена методика расчёта общей прочности корпусов судов в условиях захвата волной носовой оконечности и выхода кормовой оконечности из воды. По результатам моделирования с использованием уравнения (1) следует определять длину выходящих из воды оконечностей судна и рассчитывать изгибающий момент и перерезывающую силу от весовой нагрузки вышедших из воды теоретических шпаций с учетом сил инерции, при этом для шпаций не полностью вышедших из воды необходимо учитывать остаточные силы поддержания.

Причиной выхода оконечностей из воды может являться и воздействие аномальных волн, поэтому представляет интерес оценка вероятности встречи судна с такими волнами. На основании разработанной автором математической модели оценена вероятность встречи судна с аномальной волной за время T_a :

$$P_*(T_a) = 1 - \exp[-2 \cdot I_a \cdot T_a \cdot M(\theta_a \cdot v_a \cdot \rho_a)], \quad (2)$$

где θ_a , v_a , ρ_a – случайное время жизни, скорость и полуширина аномалии соответственно; M – математическое ожидание; I_a – плотность интенсивности пуассоновского потока аномалий.

С помощью разработанной модели на базе данных наблюдений аномальных волн из космоса показано, что вероятность может быть весьма существенной.

Для экспериментального исследования захвата волной носовой оконечности судна на встречном волнении были проведены испытания самоходной модели в опытовом бассейне научно-исследовательского центра судостроения КГТУ. Целью экспериментального исследования являлась проверка возможности реализации эффекта создания гидродинамического давления на палубе в носовой оконечности, приводящего к опрокидыванию судна. В процессе эксперимента зафиксировано явление потери устойчивости за счет постоянного увеличения угла крена судна вследствие воздействия на носовую оконечность серии гидродинамических импульсов при её многократном погружении в воду.

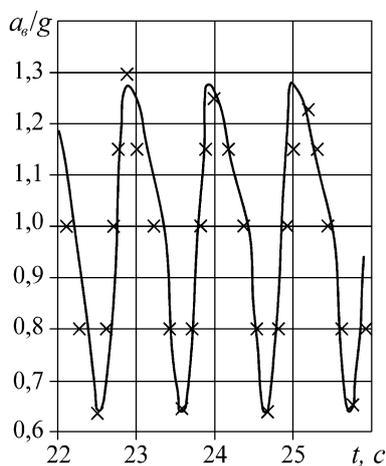


Рисунок 5 – Результаты расчётного и экспериментального определения ускорений носовой оконечности модели судна

При испытаниях самоходной модели на волнении ускорения её носовой оконечности контролировались при помощи датчика ускорений. Результаты замеров и расчёта ускорений по разработанной автором методике представлены на рисунке 5, где a_g – вертикальное ускорение носовой оконечности; g – ускорение свободного падения; t – время. Данная методика адекватно описывает поведение модели на развитом встречном волнении в условиях захвата носовой оконечности судна волной, что позволяет рекомендовать её для практического применения.

При испытаниях самоходной модели на волнении ускорения её носовой оконечности контролировались при помощи датчика ускорений. Результаты замеров и расчёта ускорений по разработанной автором методике представлены на рисунке 5, где a_g – вертикальное ускорение носовой оконечности; g – ускорение свободного падения; t – время. Данная методика адекватно описывает поведение модели на развитом встречном волнении в условиях захвата носовой оконечности судна волной, что позволяет рекомендовать её для практического применения.

Выполнено исследование влияния профиля седловатости палубы на величину гидродинамических нагрузок, действующих на палубу судна в носовой оконечности на встречном волнении. Предложена методика для обоснования выбора профиля седловатости палубы из условия ограничения величины гидродинамических нагрузок на палубу в штормовых условиях на встречном волнении.

Для уменьшения вероятности захвата носовой оконечности судна набегающей волной в работе предложена серия конструкций, снижающих давление на палубу и уменьшающих зарывание судна носом в волну, что позволяет повысить безопасность мореплавания. В частности, предлагается установка успокоителей качки, выполненных в виде крыльев-стабилизаторов (патенты № 2582328, №2621407), а также фальшборта, секции которого имеют возможность вращения относительно оси шарнира по направлению от палубы к борту (патент № 2595094).

Для повышения безопасности судов на развитом встречном волнении их корпуса могут выполняться с изменяемой геометрией палубы в носовой оконечности (патенты № 2672225, №2672227).

Третья глава посвящена проблеме обеспечения местной прочности корпусов судов ФРП. Исследуется поведение пластин бортовых перекрытий за пределом упругости, рассматриваются вопросы прогнозирования рисков разрушения пластинчатых элементов корпусных конструкций. Отмечено, что повышение точности инженерных методов расчёта элементов конструкций корпусов судов, в том числе пластин, связано с уточнением распределения их площади, работающей в составе «жёстких» и «гибких» связей.

В работе показано, что восприятие эксплуатационных контактных нагрузок сопровождается падением их интенсивности в средней части пролёта пластин. Результаты исследования в рамках гипотезы «о мгновенном раскрытии пластических шарниров» в предположении, что коэффициент недогрузки γ является линейной функцией прогиба, показывают, что учёт реальных значений коэффициентов недогрузки позволяет более обоснованно прогнозировать поведение пластин при развитых прогибах.

Для судов, находящихся в эксплуатации, актуальным является прогнозирование поведения прогрессирующих дефектов с целью определения сроков постановки судна в ремонт или определения наступления опасных экстремальных состояний при накоплении прогибов под действием многократной эксплуатационной нагрузки. Эти чрезвычайно важные задачи связаны с определением приспособляемости элементов корпусных конструкций при восприятии многократных случайных нагрузок с учётом влияния на этот процесс различных факторов.

Прогнозирование прогибов пластин позволяет определять величины внешних нагрузок по остаточным прогибам обшивки и более корректно прогнозировать техническое состояние корпусов судов. Выполненная автором обработка результатов экспериментов, проведенных в ОЛЭППС, позволила предложить алгоритм прогнозирования стрелок прогиба пластин, подверженных случайному нагружению (рисунок 6).

Проведённые исследования дали возможность сформулировать основные положения характера деформирования пластин, позволяющие учесть влияние истории нагружения на результирующий прогиб и получить функциональные зависимости для оценки риска разрушения пластин за время эксплуатации t_{\exists} :

$$\int_0^{\infty} \Phi(w_{\phi} + y) f_{\xi}(w_{\phi}, t_{\exists}, y) dy = P_*, \quad (3)$$

где w_{ϕ} – стрелка прогиба при дефектации; P_* – допустимая вероятность разрушения; $f_{\xi}(w_{\phi}, t_{\exists}, y)$ – плотность распределения приращения стрелки прогиба;

$\Phi(w) = \int_0^{w/a} \varphi(\bar{w}_p) d\bar{w}_p$ – функция распределения разрушающих стрелок прогиба; a –

шпация; $\varphi(\bar{w}_p)$ – плотность распределения разрушающих стрелок прогиба пластин, определяемая экспериментально, и имеющая следующий вид в практическом диапазоне изменения коэффициента распора

$$\varphi(\bar{w}_p) = \frac{1}{(0,022 - 0,3 \cdot K_p) \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left(- \frac{\left\{ \bar{w}_p - (1,8 \cdot K_p^2 - 0,81 \cdot K_p + 0,41) \cdot \sin^{1,8} \left[\frac{\pi}{4} \cdot (2,5 + 1,25 \cdot K_p) \right] \right\}^2}{2 \cdot (0,022 - 0,3 \cdot K_p)^2} \right). \quad (4)$$

Путём решения уравнения (3) относительно w_{ϕ} , можно определить значение прогиба w_1 , соответствующее принятой вероятности разрушения P_* .

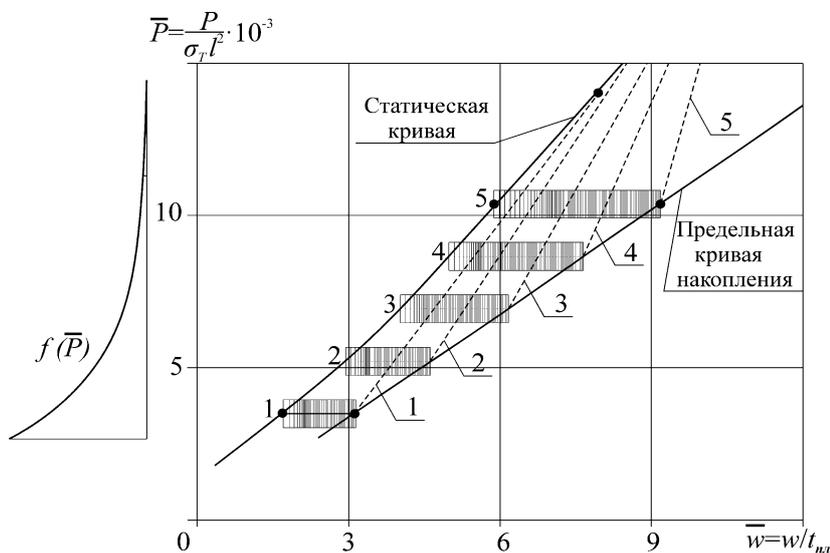


Рисунок 6 – Моделирование процесса накопления остаточных прогибов пластин при многократном случайном нагружении

Плотность распределения разрушающих стрелок прогиба пластин приведена на рисунке 7. Обращает на себя внимание тот факт, что при одинаковой вероятности разрушения для пластин с развитой гофрировкой ($K_p = 0,05$) стрелка прогиба почти на 30% больше, чем для пластин судового перекрытия без гофрировки.

Рассмотренные подходы могут применяться и в задачах нормирования гофрировки с использованием вероятностных критериев, что позволит существенно снизить объёмы ремонтных работ и повысить эффективность эксплуатации судов. Автором предложены способы испытаний образцов на сложный изгиб с изменением коэффициента распора в процессе нагружения и соответствующие экспериментальные установки (патенты №2533999, №2645430), а также разработана методика оценки рисков раз-

рушения пластин при различном техническом состоянии элементов корпусных перекрытий.

Показано, что при нормировании параметров эксплуатационных дефектов корпусов судов необходимо учитывать влияние гофрировки пластин обшивки на величину момента сопротивления балок набора, в состав которых участки обшивки включаются в качестве присоединённого пояска.

Влияние гофрировки обшивки на момент сопротивления балок набора представлено на рисунке 8, где h – высота балки набора; a – шпация перекрытия, принятая в расчётах равной 600 мм; w – стрелка прогиба пластин при гофрировке; W_f – момент сопротивления балки набора при наличии гофриров-

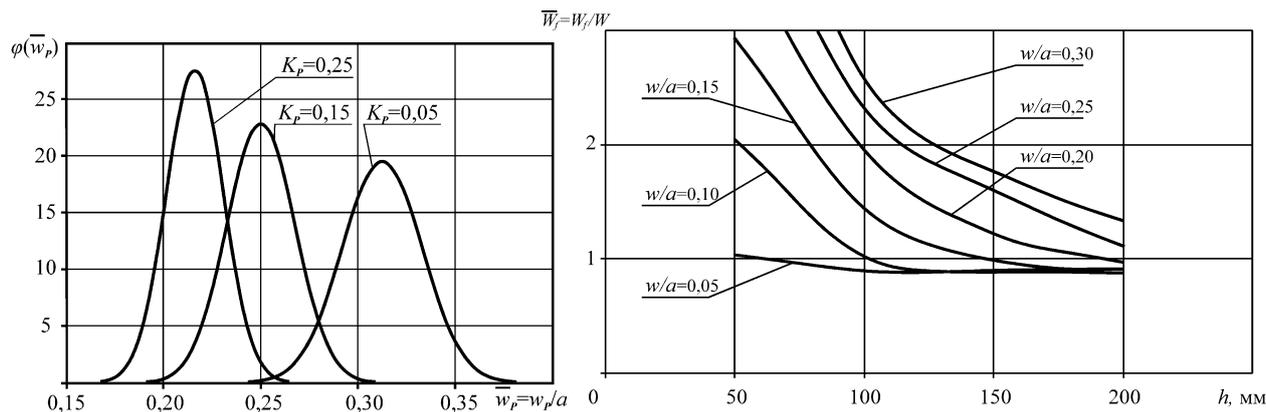


Рисунок 7 – Схема оценки риска разрушения пластин при различной степени их гофрировки

Рисунок 8 – Изменение момента сопротивления балки набора с ростом гофрировки пластин обшивки

ки присоединенного пояска; W – момент сопротивления балки набора при отсутствии гофрировки присоединенного пояска. Видно, что с ростом стрелок прогибов пластин сначала наблюдается некоторое снижение момента сопротивления балок, после чего он начинает возрастать, причём с уменьшением высоты набора влияние гофрировки обшивки на момент сопротивления балки становится более существенным. Следует отметить, что снижение величины момента сопротивления балок набора на величину порядка 10% наблюдается при прогибах пластин, сопоставимых с нормативными значениями стрелок прогиба при гофрировке.

Четвёртая глава посвящена обеспечению местной прочности при деформировании балочных конструкций судового корпуса. Отмечено, что под действием локальных эксплуатационных нагрузок все элементы конструкции (пластины, шпангоуты и стрингеры) в той или иной степени взаимодействуют между собой, реакции взаимодействия носят нелинейный характер при работе конструкций в пластической области. При этом возникает проблема учёта геометрической и физической нелинейности, а процесс деформирования описывается нелинейным дифференциальным уравнением:

$$EI \frac{d^4 w(x)}{dx^4} + K(w(x)) \cdot w(x) = q(x), \quad (5)$$

где EI – жёсткость балки при изгибе; $w(x)$ – упругая линия балки; $q(x)$ – интенсивность внешней нагрузки; $K(w(x))$ – коэффициент жёсткости упруго-

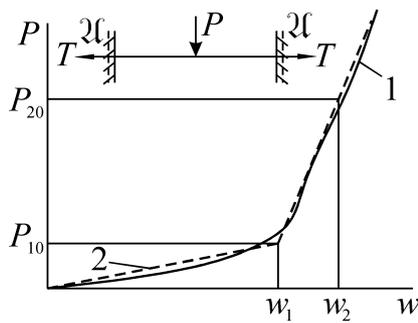


Рисунок 9 – Схема определения характеристик жёсткости основания шпангоута

пластического основания, являющийся функцией прогиба.

Для решения уравнения (5) могут быть использованы численные методы, например, метод Рунге-Кутты. Однако для использования в бортовых ИС с целью уменьшения затрат вычислительных мощностей в настоящей работе получены кусочно-аналитические решения в рамках гипотезы «о мгновенном изменении параметров изгиба».

Проводя кусочно-линейную аппроксимацию зависимости сила – прогиб для балки-полоски обшивки, выполняющей роль основания балки (рисунок 9, 1 – зависимость сила – прогиб для пластины; 2 – аппроксимация двумя прямыми линиями), можно получить искомые характеристики упруго-пластического основания:

$$\begin{cases} K_1 = \frac{P_{10}}{w_1}, \\ K_2 = \frac{P_{20} - P_{10}}{w_2 - w_1}. \end{cases} \quad (6)$$

В простейшем случае рассматривается упруго-пластическая балка, лежащая на основании прандтлевского типа с линейным упрочнением. Для получения кусочно-аналитических решений её следует разбить на две части, полубесконечную, лежащую на основании жёсткостью K_1 и имеющую на кромке прогиб w_1 , и балку, лежащую на основании жёсткостью K_2 . С учётом соответствующих граничных условий уравнения упругой линии балок записываются в следующей форме:

$$w_1(x) = P\xi_{*1}(x) + \xi_{*2}(x); \quad (7)$$

$$w_2(x) = P\lambda_{*1}(x) + \lambda_{*2}(x), \quad (8)$$

где $\xi_{*i}(x), \lambda_{*i}(x)$ – функции, определяемые из граничных условий.

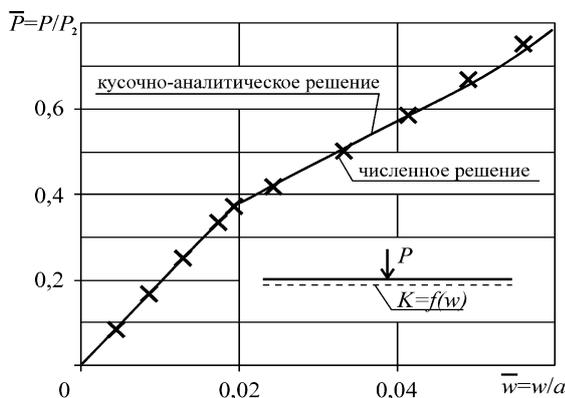


Рисунок 10 – Сопоставление кусочно-аналитических и численных решений

Сопоставление кусочно-аналитических и численных решений (метод Рунге-Кутты) нелинейного дифференциального уравнения (5) представлено на рисунке 10.

При увеличении внешней нагрузки P процесс деформирования распадается на ряд стадий, на каждой из которых, в соответствии с граничными условиями, этот процесс описывается уравнениями, аналогичными (7), (8). В случае, если характеристики

основания имеют существенную нелинейность, следует произвести их кусочно-линейную аппроксимацию так, чтобы на каждом из участков характери-

стики жёсткости представлялись линейными функциями. Тогда количество уравнений будет увеличиваться в соответствии с принятым числом оснований.

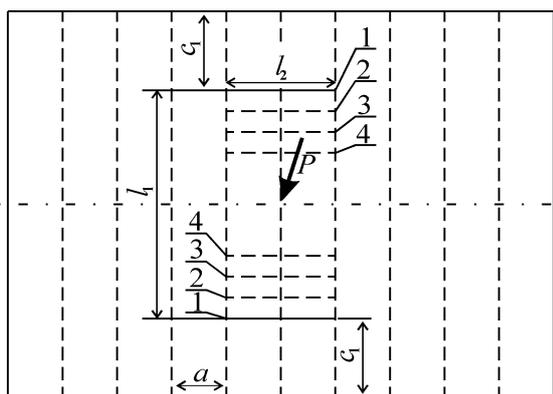


Рисунок 11 – Схема трансформации зоны обрушения перекрытия

их образования, l_1 – расстояние между смежными с загруженным шпангоутами, s_1 – расстояние от внешнего шарнира до края перекрытия).

Варьируя жёсткостью шпангоутов и пластин, с помощью разработанной методики можно оценить их влияние на несущую способность шпангоутов и определить рациональное соотношение между жёсткостью шпангоутов и пластин (рисунок 12). Параметр $\bar{h} = h/h_{\max}$ на графиках представляет собой долю высоты некоторой балки набора h от наибольшей из исследованных h_{\max} , а кривые показывают, как меняется несущая способность шпангоута при изменении шпации a и толщины обшивки t_{nl} (по оси абсцисс отложена жёсткость пластин a/t_{nl} , а по оси ординат – отношение предельных нагрузок балок при шпации P_2 и шпации 600 мм $P_{2(600)}$).

Следует заметить, что при образовании трёхзвенного шарнирного механизма в зоне обрушения шпангоутная ветвь не теряет несущей способности и способна воспринимать нагрузку, существенно превышающую ту, при которой образовался трёхзвенный механизм (запредельное состояние). Это объясняется тем, что реакции поддержания обрушившихся звеньев со стороны обшивки продолжают расти с увеличением прогибов балки. Заметную роль начинают играть продольные силы, возникающие в шпангоутной ветви бортового перекрытия судна. Располагая распорной жёсткостью конструкции, нетрудно описать процесс деформирования обрушившихся звеньев в запредельном состоянии (рисунок 13).

Расчёт локально загруженной шпангоутной ветви сопровождается учетом не только реактивных усилий со стороны пластин, но и возникающих в шпангоуте продольных усилий. Размеры зоны обрушения непрерывно изменяются из-за движения внешних нестационарных пластических шарниров (рисунок 11, где a – поперечная шпация перекрытия, l_1 – расстояние между внешними нестационарными пластическими шарнирами в момент

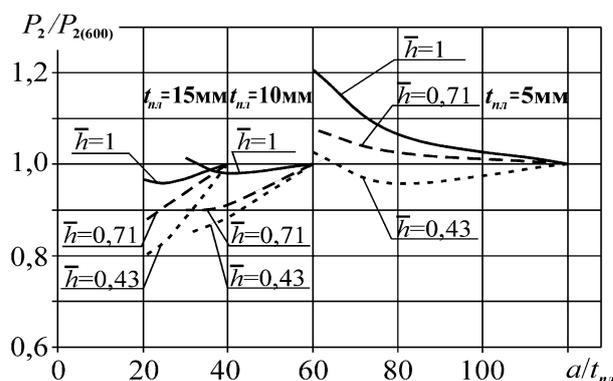


Рисунок 12 – Изменение несущей способности балок в зависимости от жёсткости пластин

Расчёты шпангоутов с учетом действия в них перерезывающих сил свидетельствуют о том, что наличие перерезывающей силы оказывает влияние на несущую способность шпангоутов, но резкого возрастания прогибов при достижении ею предельного значения не наблюдается, что обусловлено резким возрастанием продольных усилий в балке и реакции со стороны пластин обшивки с ростом прогибов. При дальнейшем увеличении внешней нагрузки продольные растягивающие усилия в балке будут равны T_0 , и балка будет вести себя как пластическая струна.

Реальные площади приложения эксплуатационных локально распределенных нагрузок могут сильно различаться, поэтому представляет интерес определение характера развития локализованных деформаций и установление размеров пятен нагружения, при которых возможна их замена сосредоточенными силами. Как следует из расчётов, влияние распределения внешней нагрузки, протяженность которой по высоте шпангоута составляет менее половины шпации, на несущую способность балки незначительно. Поэтому в подобных случаях нагружения для оценки несущей способности может быть использована расчётная схема с сосредоточенной силой.

Для оценки достоверности результатов моделирования проводилось сравнение данных, полученных на основе предлагаемых расчётных методик, использующих кусочно-аналитические решения, с данными эксперимента, проведенного в ОЛ-ЭППС, и расчётами по методу конечных элементов (МКЭ), выполненными с применением программ ANSYS и NASTRAN (рисунок 14). Для сопоставления были выбраны конструктивно-подобные жестяные модели, так как они позволяют моделировать явления, связанные с разрушением и предельной прочностью конструкций, благодаря идентичности диаграмм растяжения стали и жести.

На рисунке 14 по осям отложены в безразмерном виде прогиб \bar{w} и нагрузка \bar{P} (w – стрелка прогиба, EI – жёсткость балки модели по отношению к изгибу, M_0 – предельный момент сечения, $l_{обp}$ – расстояние между внешними

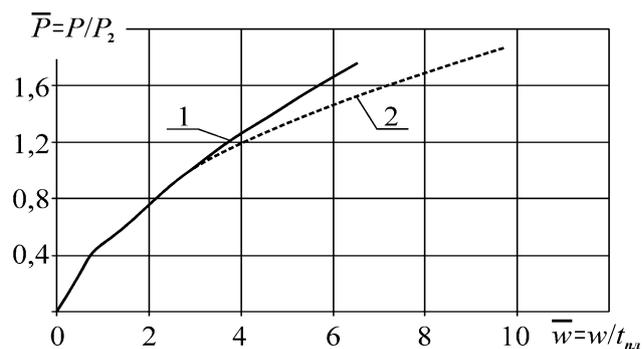


Рисунок 13 – Зависимости сила – прогиб для шпангоутов в запредельном состоянии с учётом (кривая 1) и без учёта (кривая 2) продольных усилий

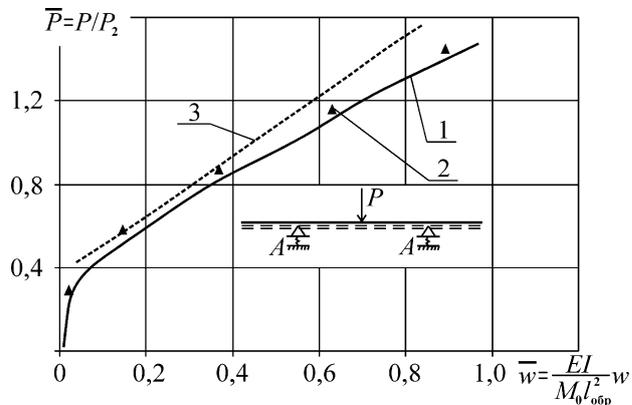


Рисунок 14 – Максимальный остаточный прогиб при нагружении шпангоута 110 конструктивно подобной модели перекрытия (1 – предлагаемая методика, 2 – эксперимент, 3 – МКЭ)

нестационарными пластическими шарнирами в момент их образования, A – податливость опоры, остальные обозначения были приведены выше). Расхождение данных не превышает 5%, что позволяет рекомендовать предлагаемые методики к использованию при подкреплении и модернизации бортовых перекрытий судов.

Показано, что нельзя пренебрегать ролью пластин в обеспечении несущей способности шпангоутов при развитых пластических деформациях, особенно при работе балки в запредельном состоянии (после образования кинематически изменяемого механизма). В этом состоянии существенную роль играют не только реакции со стороны пластин обшивки, но и продольные усилия, возникающие в шпангоутах.

На основании проведенных исследований предложена методика оценки вероятности $P_*(w)$ и риска разрушения балочных конструкций

$$P_*(w) = \int_0^{\varepsilon_{\max}(w)} \psi_{nl}(\varepsilon) d\varepsilon, \quad (9)$$

где $\psi_{nl}(\varepsilon)$ – плотность распределения пластических удлинений в материале образцов при разрушении; $\varepsilon_{\max}(w)$ – зависимость максимальных пластических удлинений в материале балки от её прогиба.

Пятая глава посвящена вопросам разработки конструктивных мероприятий по снижению риска разрушения корпусных конструкций и повышения несущей способности связей и бортового перекрытия. Учитывая закономерности деформирования локально загруженных шпангоутов, можно откорректировать положение перекрестных связей бортовых перекрытий из условия выполнения ими функций опорных элементов для шпангоутов.

Результаты проведенного анализа с использованием кусочно-аналитических решений представлены на рисунках 15 и 16, откуда следует, что расстояние от опоры до места приложения нагрузки Δ при определенных значениях существенно влияет как на несущую способность шпангоутной ветви, так и на размеры зон обрушения.

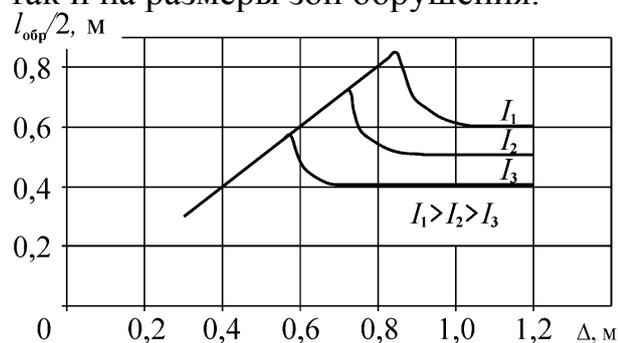


Рисунок 15 – Влияние жёсткости балки и положения опоры на размеры зоны обрушения

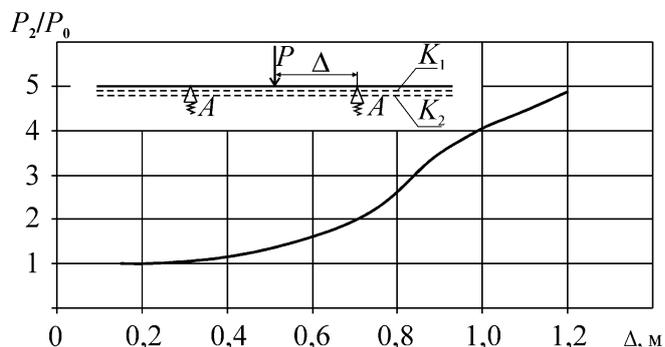


Рисунок 16 – Изменение нагрузки при образовании кинематического механизма балки в зависимости от положения опоры

На рисунках приняты следующие обозначения: нагрузка P_2 соответствует образованию кинематически изменяемого механизма, P_0 – предельная нагрузка,

определенная по теории предельного равновесия, I_1, I_2, I_3 – моменты инерции балок. Сопоставление величины нагрузок балок при образовании кинематического механизма с нагрузками, полученными по теории предельного равновесия, указывает на серьёзные расхождения.

Наличие кривых сила–прогиб для шпангоутов с учетом поддерживающих их пластин даёт возможность откорректировать и характеристики упруго-пластического основания бортового стрингера судна, что позволяет более корректно описать его деформационные характеристики при локальном нагружении.

По мере увеличения эксплуатационной нагрузки, приложенной к бортовому стрингеру, наблюдается движение внешних пластических шарниров как в шпангоутах, так и в стрингере, в результате чего коэффициент распора шпангоута и стрингера непрерывно меняется (рисунок 17). За l_1 обозначена половина протяженности зоны обрушения перекрытия в направлении шпангоута, за L_c – в направлении стрингера.

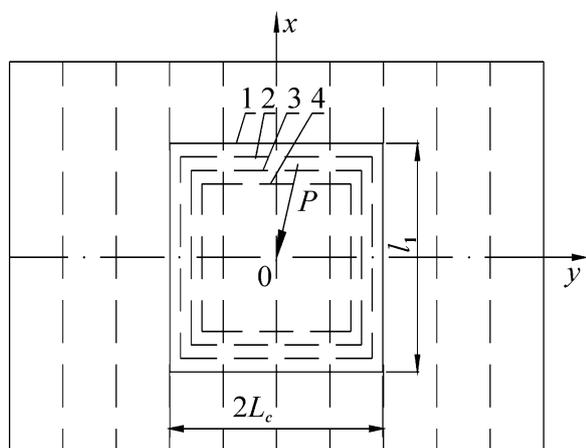


Рисунок 17 – Схема обрушения бортового перекрытия

Изложенные выше подходы к расчёту корпусных конструкций в упруго-пластической стадии позволяют проектировать корпусные конструкции с равнопрочными связями при обеспечении минимальных весовых характеристик. Эта задача связана, главным образом, с распределением металла между обшивкой, составляющей около 60–70 % веса перекрытий, и набором перекрытий. При этом должна быть обеспечена равнопрочность связей, так как место приложения локальной нагрузки не стационарно: она перемещается по полю перекрытия. Суть методики выбора равнопрочных размеров связей бортовых перекрытий заключается в поэтапном удовлетворении прочности всех элементов бортовых перекрытий (пластин, шпангоутов и стрингеров) при действии на них расчётных нагрузок. В качестве критерия равнопрочности целесообразно использовать равновероятностную схему разрушения.

Обеспечивая равную вероятность разрушения пластин $P_{*пл}$, шпангоутов $P_{*шт}$ и стрингеров $P_{*стр}$ можно сформулировать условие их равнопрочности, т.е.

$$P_{*пл} = P_{*шт} = P_{*стр} = P_{*Н}, \quad (10)$$

где

$$P_{*шт} = \int_0^{\infty} \Psi(q) dF(q, t_3), \quad (11)$$

а $F(q, t_3)$ – функция, представляющая вероятность того, что при пуассоновском потоке нагрузок, действующих на бортовое перекрытие, за период эксплуата-

ции t_3 максимальная из нагрузок не превысит некоторое фиксированное значение q ; $\Psi(q)$ – вероятность разрушения при нагрузке q ; P_{*H} – значение вероятности разрушения, принятое за допустимое.

На заключительном этапе производится сравнение весовых характеристик полученных перекрытий и выбирается вариант, обеспечивающий минимальный вес. При незначительной разнице в металлоемкости конструкций следует учитывать, что уменьшение шпации перекрытия и увеличение числа перекрестных связей приводит к росту трудоемкости при сборке.

Один из способов модернизации бортовых конструкций – установка промежуточных шпангоутов, что наиболее эффективно для листовых элементов (бортовой обшивки), т.к. уменьшение шпации в 2 раза ведет к уменьшению прогибов в 4 раза. Причём до сих пор не существует достаточно строгих обоснований выбора жёсткости устанавливаемых промежуточных шпангоутов.

Предложена методика определения жёсткости промежуточных шпангоутов исходя из условия ограничения величины максимальных относительных пластических деформаций на уровне, получаемом основным шпангоутом, на основе разработанного автором метода решения нелинейных задач деформирования судовых корпусных конструкций (глава 4).

На рисунке 18 приведена зависимость момента инерции I промежуточного шпангоута в безразмерном виде \bar{I} (I_0 – момент инерции основного шпангоута) от длины пятна приложения нагрузки к бортовому перекрытию в направлении шпангоута b .

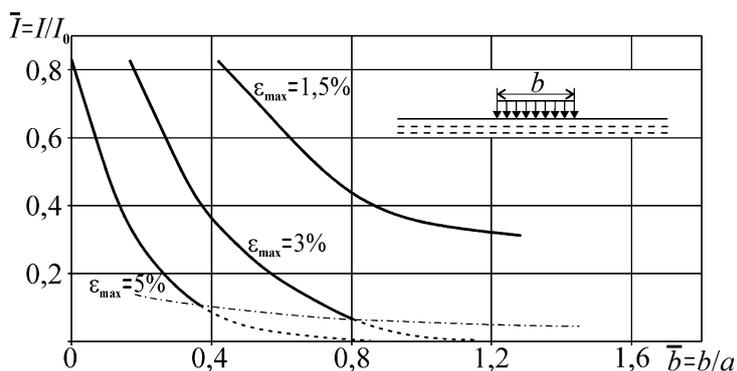


Рисунок 18 – Зависимость оптимального момента инерции промежуточного шпангоута от пятна приложения нагрузки для заданных удлинений в центральном шарнире

Данная зависимость позволяет выбирать момент инерции промежуточного шпангоута, располагая данными о характере локализации внешней нагрузки.

Штрихпунктирная кривая на рисунке соответствует минимальному моменту инерции промежуточного шпангоута, при котором прогибы подкрепленных пластин обшивки достигают нормативных значений.

Для существенного повышения несущей способности и снижения риска разрушения конструктивных элементов бортовых перекрытий в данной главе работы предложены различные схемы подкрепления элементов бортовых корпусных конструкций. Все предложенные конструктивные решения не имеют аналогов в мировой практике и защищены патентами на изобретения.

В частности, предложен способ повышения несущей способности пластин бортовых перекрытий судов, путем установки с внутренней стороны пластины упругой прослойки, опирающейся по контуру на полки рёбер жёсткости перекрытия. При этом между пластиной и упругой прослойкой предлагается

устанавливать прокладку для исключения точечного контакта между ними (патент №2382714). Внедрение данного технического решения в практику судостроения при проведении ремонтов и модернизации корпусов судов позволит повысить несущую способность пластин обшивки примерно на 30% или снизить их металлоемкость на ту же величину без потери их прочности.

Другим вариантом решения проблемы точечного контакта между пластиной обшивки и упругой прослойкой является установка эластичной емкости, наполненной жидкостью, с регулируемым давлением (патенты №2472666, №2621405). Здесь достигается равномерное распределения нагрузки на упругую прослойку и, соответственно, еще большее повышение её несущей способности.

Для подкрепления пластин обшивки, в том числе и деформированных, разработан и иной способ (патент №2463197), заключающийся в создании некоторой упруго-пластической опоры, устанавливаемой в средней части пролёта пластины (рисунок 19). Также разработана конструкция, содержащая опору с регулируемой податливостью (патент №2672147).

В данном техническом решении нагрузка, воспринимаемая пластинами обшивки, передается на упругую опору, состоящую из бруса, опирающегося на полосу, и посредством оттяжек передается на смежные шпангоуты. Подкреплённая пластина поддерживается силой реакции, действующей в середине пролёта, что существенным образом повышает несущую способность, так как изменение силовых факторов в средней части пролёта пластины резко изменяет параметры её изгиба.

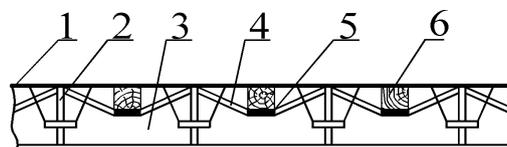


Рисунок 19 – Подкрепление пластины за счёт установки упруго-пластической опоры: 1– обшивка; 2– шпангоут; 3– стрингер; 4– оттяжка; 5– полоса; 6– брус

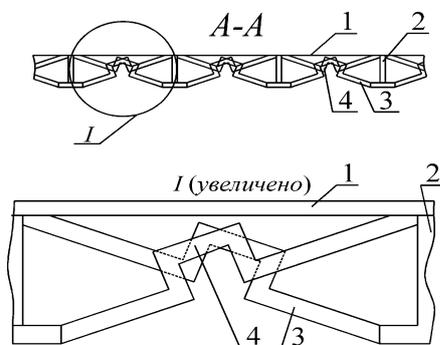


Рисунок 20 – Повышение несущей способности балок набора при помощи гофрированных подкрепляющих элементов: 1 – обшивка; 2– балка набора; 3– подкрепляющий элемент; 4– упругая вставка

ра с основаниями стенок соседних балок (рисунок 20).

В итоге, балка набора может рассматриваться как балка, лежащая на многослойном упруго-пластическом основании, параметры жёсткости которого соответствуют одновременному действию на балку как сил поддержания со стороны обшивки, так и со стороны подкрепляющих элементов. Расчёт такой балки может быть выполнен по методикам, изложенным в главе 4. Изменяя пара-

метры устанавливаемых подкрепляющих элементов можно добиться требуемого повышения несущей способности балок набора.

Для повышения эффективности схемы подкрепления на полки балок набора может быть установлен упругий брус и полоса, причем подкрепляющие элементы следует устанавливать на балке набора и на основания стенок смежных балок набора (патент №2486096).

Другим вариантом подкрепления является установка поверх полок балок набора системы струн, которые будут не только препятствовать завалу набора, но и повышать несущую способность балок, являясь для них упруго-пластическими опорами, а при большом числе струн – упруго пластическим основанием (патент №2472665). В последнем случае выбор параметров струн может проводиться с использованием расчётных методик, представленных в главе 4. Когда число струн невелико, можно воспользоваться формулой

$$F = \frac{\Delta w \cdot K \cdot a \cdot l_{обр}}{12 \cdot w_0 \cdot \sigma \cdot C_n}, \quad (12)$$

где F – площадь поперечного сечения струны; n – число струн, которые приходятся на зону обрушения балки, ограниченную внешними пластическими шарнирами; $l_{обр}$ – размеры зоны обрушения шпангоута как безопорной балки, лежащей на многослойном основании; $\Delta w = w_{\max} - w_0$ – разность между прогибом неподкрепленной балки и нормативным прогибом a – поперечная шпация перекрытия; w_0 – нормативный прогиб шпангоута; K – осредненный коэффициент жесткости основания шпангоута, определённый как $K = q_{\max} / w_{\max}$; C_n – табулированный коэффициент, зависящий от числа струн.

Шестая глава посвящена оценке риска возникновения навигационных аварий и снижению их последствий. На основании анализа проблемы посадок судов на мель разработаны три вероятностные модели возникновения аварийной ситуации для случая, когда количество возвышений на любой части акватории с заданной площадью является случайной величиной, распределённой по закону Пуассона. В первой модели характеристики подводных препятствий остаются постоянными величинами в пределах всей акватории, во второй – являются переменными величинами, третья модель дополнительно учитывает приливо-отливные явления. Согласно этой модели, вероятность безаварийного плавания определяется формулой

$$F_n(-d) = \prod_{i=1}^N F_{\eta_i}(-d) = \exp \left\{ -B \sum_{i=1}^N \lambda_{ai} \int_0^{L_{ai}} \overline{F_{\xi_i}}(u_i(l_a) - d) dl_a \right\}, \quad (13)$$

где $u_i(l_a)$ – текущий уровень поверхности воды на участке маршрута; l_a – расстояние от начала маршрута; N – количество участков; L_{ai} – длина участка; $\overline{F_{\xi_i}}(x)$ – функция, дополнительная к функции распределения высот подводных препятствий на участке маршрута; λ_{ai} – константа, являющаяся средним числом возвышений на единицу площади акватории на участке маршрута; B – ширина судна; d – осадка судна.

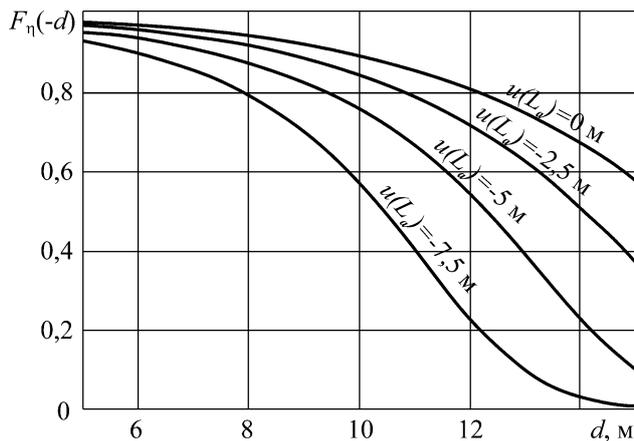


Рисунок 21 – Вероятность отсутствия посадки на мель согласно третьей модели

Представленные математические модели позволяют качественно оценить вероятность безаварийного плавания (отсутствия контакта со скалами и камнями) для различных условий эксплуатации судна. Результаты расчёта при различных скоростях изменения уровня воды представлены на рисунке 21, где L_a – длина всего маршрута. Рисунок показывает, что изменение уровня воды оказывает существенное влияние на вероятность аварии, что свидетельствует о необходимости учета явлений прилива и отлива и ограниченности области применения математических моделей, их игнорирующих.

Для снижения последствий посадок судов на мель в работе предложены различные схемы реализации конструктивной днищевой защиты (патенты № 2463198, №2677950), а также методика выбора параметров элементов конструктивной защиты для обеспечения её наибольшей эффективности.

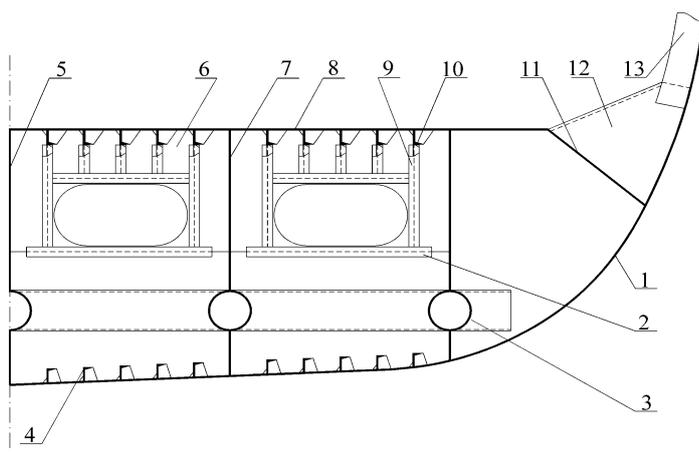


Рисунок 22 – Схема днищевой конструкции с трубчатыми элементами конструктивной защиты

Одна из конструкций приведена на рисунке 22, где приняты следующие обозначения: 1 – наружная обшивка; 2 – горизонтальное ребро жёсткости; 3 – трубчатый элемент конструктивной защиты; 4 – продольные балки; 5 – вертикальный киль; 6 – флор; 7 – стрингер; 8 – настил второго дна; 9 – вертикальное ребро жёсткости; 10 – продольные ребра жёсткости настила второго дна; 11 – крайний междудонный лист; 12 – скуловая кница; 13 – шпангоут.

Схема деформирования трубчатого элемента конструктивной защиты дана на рисунке 23, где P_0 – предельная нагрузка для трубчатого элемента конструктивной защиты единичной ширины; β – угол поворота звеньев кинематически изменяемого механизма; $P(\beta)$ – зависимость усилия, деформирующего трубчатый элемент конструктивной защиты, от угла поворота звеньев кинематически изменяемого механизма; M_0 , $M_1(\beta)$, $M_2(\beta)$ – предельные моменты сечения трубчатого элемента конструктивной защиты единичной ширины с учетом и без учета продольных сил. Параметры трубчатого элемента конструктивной днищевой защиты – толщину h_3 и диаметр d_3 , при которых конструкция

будет деформироваться раньше, чем произойдет повреждение верхних частей флоров и стрингеров и настила второго дна, следует определять из условия

$$h_{\text{э}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\left[\frac{\tau_T \cdot (F_{\text{ф}} \cdot n_{\text{ф}} + F_{\text{стр}} \cdot n_{\text{стр}})}{K_3 \sigma_T (m \cdot n_{\text{ф}} + n \cdot n_{\text{стр}})} + d_{\text{э}} \right]^2 - d_{\text{э}}^2}, \quad (14)$$

где K_3 – коэффициент запаса; $n_{\text{ф}}$ – количество флоров в зоне касания грунта; $n_{\text{стр}}$ – количество стрингеров в зоне касания грунта; n – размер среднестатистического пятна контакта вдоль судна; m – размер среднестатистического пятна контакта поперек судна; $F_{\text{ф}}$ – площадь стенки флора; $F_{\text{стр}}$ – площадь стенки стрингера; τ_T – предел текучести при сдвиге для материала флоров и стрингеров; σ_T – предел текучести материала элемента конструктивной защиты. В главе также уделено внимание другому распространенному виду аварий – столкновению судов. В частности, разработана математиче-

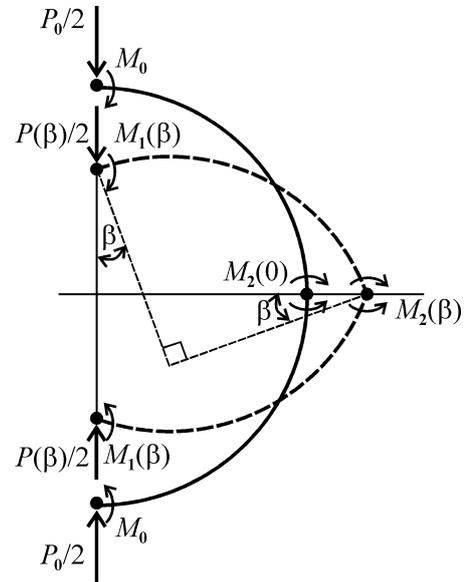


Рисунок 23 – Схема деформирования трубчатого элемента конструктивной защиты

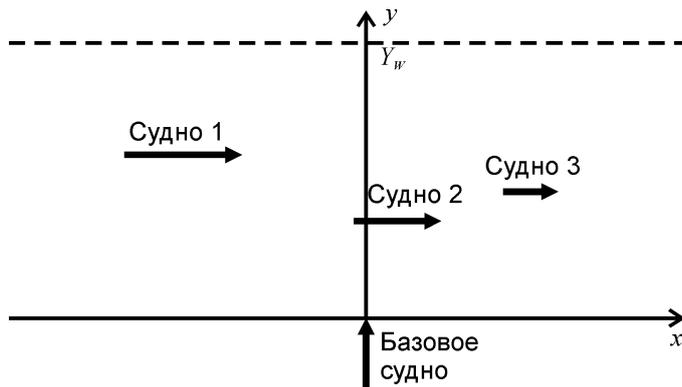


Рисунок 24 – Схема пересечения морского пути с интенсивным судоходством

ская модель оценки риска столкновения судов при пересечении судном морского пути с интенсивным судоходством (рисунок 24), когда часть судов движется справа налево (правый поток) и слева направо (левый поток). При этом считается, что суда образуют пуассоновское поле, их длины и скорости случайны, а плотность потока судов, а также математические ожидания их длин и скоростей, меняются по ширине морского пути. Получена формула, позволяющая определить вероятность \bar{P}_* отсутствия столкновения:

где $M_{L\lambda}(y)$, $M_{R\lambda}(y)$ – математические ожидания длин судов левого и правого потоков судов; $M_{Lv}(y)$, $M_{Rv}(y)$ – математические ожидания скоростей судов левого и правого потоков судов; $I_{aL}(y)$, $I_{aR}(y)$ – интенсивности левого и правого потоков судов; Y_w – ширина фарватера; v – скорость судна, пересекающего морской путь; L – длина судна, пересекающего морской путь.

$$\bar{P}_* = \exp \left\{ - \int_0^{Y_w} I_{aL}(y) (L \cdot M_{Lv}(y) / v + M_{L\lambda}(y)) dy - \int_0^{Y_w} I_{aR}(y) (L \cdot M_{Rv}(y) / v + M_{R\lambda}(y)) dy \right\}, \quad (15)$$

где $M_{L\lambda}(y)$, $M_{R\lambda}(y)$ – математические ожидания длин судов левого и правого потоков судов; $M_{Lv}(y)$, $M_{Rv}(y)$ – математические ожидания скоростей судов левого и правого потоков судов; $I_{aL}(y)$, $I_{aR}(y)$ – интенсивности левого и правого потоков судов; Y_w – ширина фарватера; v – скорость судна, пересекающего морской путь; L – длина судна, пересекающего морской путь.

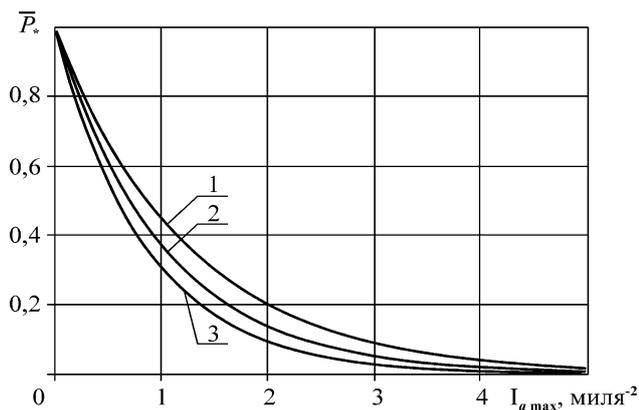


Рисунок 25 – Вероятность отсутствия аварии при пересечении морского пути с интенсивным судоходством

ширина морского пути равна восьми милям, базовое судно длиной 150 м идёт со скоростью 12 узлов. Средняя длина судов в потоке судов, движущихся слева направо, составляет 90 м, а справа налево – 130 м.

Из рисунка 25 видно, что с ростом максимальной интенсивности обоих потоков судов вероятность пересечь морской путь не столкнувшись ни с одним из них быстро падает, и при $I_{a \max} = 4$ миль⁻² практически равна нулю.

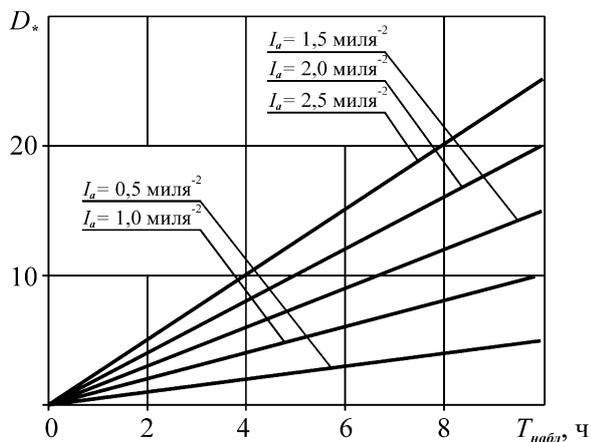


Рисунок 26 – Зависимость опасности столкновения от времени при равномерном распределении курсового угла

курсного угла на окружности $[-\pi, \pi]$, скорость базового судна $v = 12$ узлов, а длина – $L = 100$ м, математическое ожидание скоростей и длин прочих судов $M_v = 15$ узлов и $M_\lambda = 120$ м соответственно.

Разработанные математические модели могут быть использованы для выбора наиболее безопасного маршрута движения судна. Поскольку полностью исключить столкновения судов не возможно, в том числе из-за влияния человеческого фактора, то перспективной является разработка конструктивных мероприятий по снижению последствий аварий.

Результаты расчёта по данной модели приведены на рисунке 25, где $I_{a \max}$ – интенсивность потока прочих судов, а кривая 1 соответствует значениям $M_{Lv} = 10$ узлов, $M_{Rv} = 6$ узлов (средняя скорость судов в потоке судов, движущихся слева направо составляет 10 узлов, справа налево – 6 узлов), кривая 2 – $M_{Lv} = 14$ узлов, $M_{Rv} = 10$ узлов, кривая 3 – $M_{Lv} = 18$ узлов, $M_{Rv} = 14$ узлов. В расчёте принималось, что $v = 12$ узлов, $L = 150$ м, $Y_w = 8$ миль, $M_{L\lambda} = 90$ м, $M_{R\lambda} = 130$ м, т.е.

Предложенные в работе подходы позволили разработать математические модели оценки опасности столкновения судов при их движении в произвольных направлениях, что представлено на рисунке 26. Здесь под опасностью столкновения понимается функция

$$D_*(\vec{H}, T_{набл}) = -\ln \bar{P}_*(\vec{H}, T_{набл}), \quad \text{где}$$

$\bar{P}_*(\vec{H}, T_{набл})$ – вероятность избежать за время $T_{набл}$ столкновения базового судна, имеющего характеристики \vec{H} , с любым прочим. На рисунке даны зависимости для равномерного распределения

В главе предложены новые конструкции бульбообразных надделок с повышенной продольной податливостью, защищенные патентами РФ на изобретение, которые позволяют ликвидировать подводные пробойны в бортовых перекрытиях тараненных судов и тем самым повысить безопасность мореплавания и минимизировать последствия столкновений судов (патенты № 2518695, №2527619, №2652502). На рисунке 27 представлена гофрированная бульбовая надделка, где 1 – обтекатель; 2 – гофрированная вставка; 3 – бракета; 4 – эластичный наполнитель; 5 – выточки; Δ_i – глубина выточки i -го гофра. Глубина выточек должна определяться из условия обеспечения требуемой податливости бульба

$$\Delta_{\Gamma_i} = t_{\Gamma} - \sqrt{\frac{h_{\Gamma} \cdot P_{0i}}{\sigma_T \cdot \int_0^{\pi} \sqrt{[R'_i(\varphi)]^2 + [R_i(\varphi)]^2} d\varphi}}, \quad (16)$$

где Δ_{Γ_i} – глубина выточки i -го гофра; h_{Γ} – высота гофра; t_{Γ} – толщина гофра;

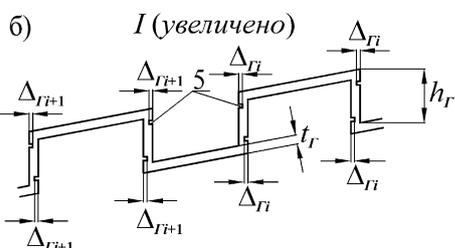
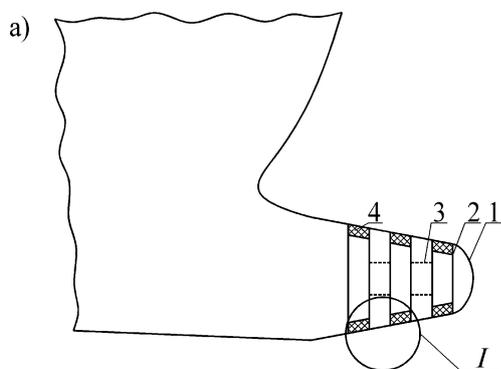


Рисунок 27 – Гофрированная бульбовая надделка с повышенной продольной податливостью

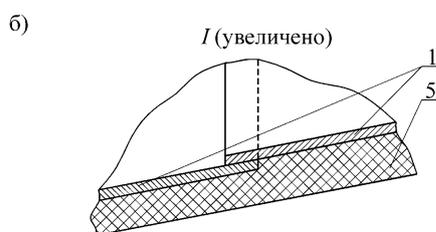
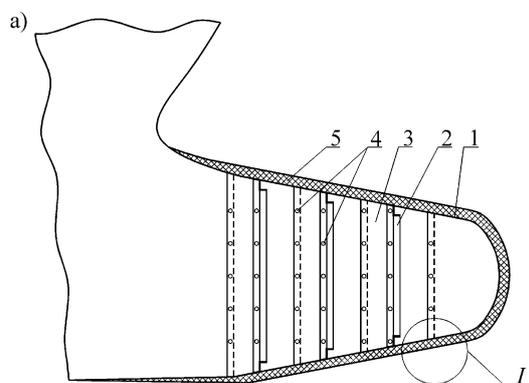


Рисунок 28 – Бульбовая надделка из отдельных секций с повышенной продольной податливостью

P_{0i} – предельная нагрузка i -го гофра, обеспечивающая требуемую податливость бульба; σ_T – предел текучести материала гофра; $R_i(\varphi)$ – функция, описывающая форму поперечного сечения i -го гофра.

На рисунке 28 представлена бульбовая надделка из отдельных секций, где 1 – наружная обшивка; 2 – кольцевой шпангоут; 3 – секция бульбовой надделки; 4 – соединительный элемент; 5 – эластичная оболочка. Податливость такой конструкции обеспечивается прочностными характеристиками соединительных элементов и их количеством.

Заключение

В рамках поставленной в диссертации проблемы получены следующие основные научные результаты.

1. Сформулированы рекомендации по обеспечению безопасности мореплавания на основе математической модели взаимодействия судна с внешней средой в условиях захвата волной его носовой оконечности, включающие комплекс конструктивных решений, направленных на предотвращение этого явления, а именно:

- создана математическая модель взаимодействия судна с внешней динамической средой, позволяющая определить величины гидродинамических нагрузок, действующих на палубу в носовой оконечности, и объяснить причины реализации нетрадиционной схемы разрушения корпусов судов и потери ими остойчивости при захвате волной носовой оконечности;

- представлена математическая модель оценки риска встречи морских судов с аномальными волнами;

- предложена методика расчета общей прочности судов в экстремальных условиях эксплуатации, сопряженных с захватом волной носовой оконечности судна и выходом из воды кормовой оконечности;

- дана новая классификация процесса заливаемости палубы и расчетным путем обоснована методика выбора профиля седловатости палубы для обеспечения безопасности судов в условиях шторма на встречном волнении;

- разработаны новые конструктивные решения, способствующие снижению вероятности аварий судов, связанных с захватом их носовой оконечности волной;

- создана установка для изучения остойчивости судна в условиях захвата носовой оконечности волной.

2. Создана методика оценки риска разрушения судовых пластин при действии многократных интенсивных локально распределенных нагрузок, основанная на анализе их деформирования под действием контактных эксплуатационных нагрузок с падающей и переменной в процессе нагружения интенсивностью, а также алгоритме прогнозирования их прогибов:

- уточнены распорные характеристики листовых элементов корпусов судов при локальном нагружении на основании корректировки соотношения между жесткими и гибкими связями, что позволяет более обоснованно назначать их толщины при проектировании и ремонте с учетом работы конструкции в упруго-пластической стадии;

- представлен алгоритм накопления стрелок прогиба, учитывающий историю нагружения, позволяющий прогнозировать рост упруго-пластических прогибов элементов корпусных конструкций при восприятии эксплуатационных нагрузок и риск их разрушения, а также решать обратную задачу – определять величины внешних эксплуатационных нагрузок по остаточным прогибам;

- разработана методика расчета судовых пластин, имеющих произвольные начальные погибы и граничные условия, подверженных действию эксплуатационной нагрузки с постоянно изменяющейся интенсивностью в средней части пролета;

- показана целесообразность использования разработанной методики оценки риска разрушения пластин, воспринимающих интенсивные нагрузки и работающих в составе судовых перекрытий, имеющих эксплуатационные повреждения в смежных с нагружаемым районах, при назначении толщин бортовой обшивки в процессе проектирования судовых корпусов;

- предложены способы испытания образцов при сложном изгибе и установки для их осуществления, позволяющие проводить испытания балок-полосок пластин за пределом упругости в режиме повторно-статического нагружения при изменяющемся в процессе проведения эксперимента коэффициенте распора.

3. Создана методика учёта большой физической и геометрической нелинейности при деформировании элементов стержневых систем, а именно:

- сформулированы требования к методам расчёта стержневых систем, работающих при развитых упруго-пластических деформациях, с целью снижения повреждаемости корпусных конструкций в условиях судоремонтного производства при определении размеров подкрепляющих связей и в бортовых интеллектуальных системах для контроля прочности судов в процессе эксплуатации;

- разработаны методы расчета стержневых систем, деформируемых совместно с многослойными упруго-пластическими основаниями, с большой геометрической и физической нелинейностью, основанные на кусочно-аналитических решениях.

4. Представлена методика оценки риска разрушения балок и бортовых перекрытий судовых корпусов и методика расчета их упруго-пластического деформирования с учетом особенностей взаимодействия составных элементов бортовых перекрытий, в том числе в запредельном состоянии:

- предложены методы расчета локально загруженных упруго-пластических шпангоутов и стрингеров, работающих совместно с нелинейными упруго-пластическими основаниями, в том числе в запредельном состоянии;

- найдены закономерности деформирования судовых конструкций в упруго-пластической стадии с использованием разработанного математического аппарата, позволяющие определять размеры связей локально загруженных перекрытий с минимальными весовыми характеристиками при проектировании и ремонте корпусов судов;

- выявлена взаимосвязь между конструктивными элементами бортовых перекрытий при восприятии интенсивных локально распределенных нагрузок с учетом нелинейных эффектов и постоянного изменения зоны обрушения перекрытия на основании разработанных методов расчета;

- разработана подходы к оценке риска разрушения бортовых перекрытий и входящих в их состав балок при восприятии интенсивных локально распределенных эксплуатационных нагрузок с учетом геометрической и физической нелинейности, дающая возможность выбирать эффективные конструктивные решения при проектировании бортовых перекрытий корпусов судов.

5. Подготовлен комплекс новых конструктивных решений, снижающих риск разрушения бортовых конструкций, на основе повышения их несущей

способности путем подкрепления, основанный на анализе их поведения при восприятии интенсивных локально распределенных нагрузок, в частности:

- уточнена роль перекрестных связей в обеспечении прочности локально загруженных бортовых перекрытий: при определенных соотношениях жесткостей пластин и набора перекрестные связи не поддерживают балки главного направления вследствие локализации деформаций в ограниченной зоне между перекрестными связями, вскрыты причины локализации деформаций бортовых перекрытий, воспринимающих интенсивные локально распределенные нагрузки и показана необходимость учета этого обстоятельства при проектировании и ремонте корпусных конструкций;

- усовершенствована методика проектирования бортовых перекрытий с равнопрочными связями;

- разработаны и обоснованы не имеющие аналогов в мировой практике схемы подкрепления элементов бортовых конструкций (стержневых систем и пластин), обладающие высокой эффективностью и низкой трудоемкостью, а также методики их расчета, что позволяет значительно повысить несущую способность бортовых перекрытий при действии интенсивных локально распределенных нагрузок, являющихся основной причиной возникновения повреждений.

6. Даны рекомендации по модернизации корпуса, повышающие безопасность мореплавания путем ограничения последствий навигационных аварий, на основе проектирования элементов конструктивной защиты и математических моделей оценки вероятности столкновений и посадки судов на мель, а именно:

- разработаны математические модели оценки риска столкновения судов для случаев пересечения морского пути с интенсивным судоходством, движения судов параллельными и произвольными курсами при переменных характеристиках потока судов, а также посадки судов на мель в условиях изменения глубины акватории, позволяющие обосновывать конструктивные решения при проектировании и модернизации корпусов судов;

- предложены новые конструкции бульбовых наделок корпуса судна с повышенной продольной податливостью, снижающие последствия столкновений судов;

- разработаны новые схемы конструктивной днищевой защиты, реализация которых позволяет не допустить повреждения фундаментов главных и вспомогательных механизмов, установленных на настиле второго дна, в случае посадки судна на мель и обеспечить возможность движения судна своим ходом после снятия с мели, а также расчетная методика для выбора параметров элементов защиты и оценки ее эффективности.

Большинство технических решений выполнено на уровне изобретений.

Полученные результаты могут быть использованы при создании бортовых ИС контроля эксплуатационной прочности, при проведении научных исследований, в проектных организациях при выборе оптимальных конструктивных решений, на судоремонтных предприятиях при восстановлении прочности изношенных и поврежденных конструкций корпусов судов и для обеспечения учебного процесса.

Дальнейшая разработка темы диссертационного исследования предусматривает:

- подготовку рекомендаций в Правила Регистра по корректировке динамических изгибающих моментов и метацентрической высоты у судов, склонных к заливаемости и захвату носовой оконечности волной, на основе уточнения гидродинамических сил, действующих на палубу в носовой оконечности при ее погружении в воду при нелинейной качке судна на встречном нерегулярном волнении;
- разработку нечеткой формальной системы, отображающей логические правила контроля ситуаций эксплуатационной прочности в рамках разработанных моделей;
- повышение качества алгоритмов контроля эксплуатационной прочности судна на базе бортовых ИС с использованием динамической теории катастроф и нейросетевых технологий;
- оптимизацию проектирования и конструирования корпусных конструкций судов в носовой оконечности с учетом восприятия гидродинамических нагрузок большой интенсивности;
- совершенствование методики оценки вероятности возникновения навигационных аварий на судах морского флота.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из «Перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук»:

1. Burakovskiy, E.P. To the problem of designing of board coverings that receive intensive local load / E.P. Burakovskiy, P.E. Burakovskiy, V.P. Prokhnich // Archives of Civil and mechanical Engineering. – 2007. – Vol. VII, No. 3. – P. 69–78. (автор 75%)
2. Бураковский, П.Е. Учет жесткости обшивки при деформировании связей судовых бортовых перекрытий, воспринимающих интенсивные локальные нагрузки / П.Е. Бураковский // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. – СПб, 2008.– Вып. 41(325). – С. 157–170. (автор 100%)
3. Бураковский, П.Е. К вопросу о выборе жесткости промежуточного шпангоута / П.Е. Бураковский // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова.– 2010.– Вып. 55(339). – С. 57–62. (автор 100%)
4. Бураковский, П.Е. Резервы прочности пластически деформированной бортовой обшивки судов / П.Е. Бураковский // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова.– 2012.– Вып. 67(351). – С. 35–40. (автор 100%)
5. Бураковский, Е.П. Учет изменения степени недогрузки пластин при их деформировании в контактной задаче / Е.П. Бураковский, П.Е. Бураковский, Ж.Г. Концедаева // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия Морская техника и технология.– 2012.– №2.– С.9–17. (автор 50%)
6. Бураковский, П.Е. Способ повышения несущей способности пластин бортовой обшивки / П.Е. Бураковский // Вестник Астраханского государственного

- технического университета. Серия «Морская техника и технология».– 2013.– №1.– С.9–16. (автор 100%)
7. Бураковский, П.Е. Экспериментальное исследование явления приспособляемости пластин при многократном нагружении / П.Е. Бураковский // Труды Крыловского государственного научного центра.– 2013.– Вып. 75(359). – С. 15–21. (автор 100%)
8. Бураковский, П.Е. Особенности деформирования локально нагруженных пластин / П.Е. Бураковский // Труды Крыловского государственного научного центра.– 2013.– Вып. 76(360). – С. 89–94. (автор 100%)
9. Бураковский, Е.П. Управление и принятие решений при контроле эксплуатационной прочности судна на основе современной теории катастроф / Е.П. Бураковский, П.Е. Бураковский, Ю.И. Нечаев, В.П. Прохнич // Морские интеллектуальные технологии.– 2013.– №1(19).– С.7–14. (автор 40%)
- 10.Бураковский, Е.П. Проблемы контроля динамики судна в экстремальных ситуациях на основе методов современной теории катастроф / Е.П. Бураковский, П.Е. Бураковский, Ю.И. Нечаев, В.П. Прохнич // Морской вестник.– 2013.– №1(45).– С.89–95. (автор 40%)
- 11.Бураковский, Е.П. Некоторые проблемы обеспечения общей прочности судов в чрезвычайных ситуациях /Е.П. Бураковский, П.Е. Бураковский // Труды Крыловского государственного научного центра.– 2014.– Вып. 82(366). – С. 21–30. (автор 50%)
- 12.Бураковский, П.Е. Практическая реализация графоаналитической системы контроля общей прочности промысловых судов на основе современной теории катастроф / П.Е. Бураковский, Ю.И. Нечаев // Морские интеллектуальные технологии.– 2014.– №2(24).– С.9–13. (автор 50%)
- 13.Бураковский, П.Е. Практическая реализация графоаналитической системы контроля прочности промысловых судов при посадке на мель, столкновении судов и входе в ледовое поле на основе современной теории катастроф / П.Е. Бураковский, Ю.И. Нечаев // Морские интеллектуальные технологии.– 2014.– №3(25).– С.99–104. (автор 60%)
- 14.Бураковский, П.Е. Практическая реализация графоаналитической системы контроля эксплуатационной прочности промысловых судов при коррозии корпуса, швартовых операциях и восприятии многократных нагрузок на основе современной теории катастроф / П.Е. Бураковский, Ю.И. Нечаев // Морские интеллектуальные технологии.– 2014.– №4(26), т. 2.– С.24–31. (автор 55%)
- 15.Бураковский, П.Е. Разработка конструктивной днищевой защиты для снижения последствий от посадок судов на мель / П.Е. Бураковский // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия Морская техника и технология.– 2014.– №2.– С.14–20. (автор 100%)
- 16.Бураковский, П.Е. Применение струн для повышения несущей способности шпангоутов / П.Е. Бураковский // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия Морская техника и технология.– 2014.– №3.– С.40–46. (автор 100%)
- 17.Бураковский, Е.П. К вопросу оценки риска столкновения судов / Е.П. Бураковский, П.Е. Бураковский, В.А. Дмитриевский // Морские интеллектуальные

технологии.– 2015.– №4(30), т. 2.– С.35–39. (автор 60%)

18.Бураковский, П.Е. К вопросу о прогнозировании стрелок прогиба пластин при восприятии случайных нагрузок / П.Е. Бураковский// Труды Крыловского государственного научного центра.– 2015.– Вып. 89.2. – С. 145–150. (автор 100%)

19.Бураковский, П.Е. Учет влияния перекрестных связей на деформирование локально загруженных шпангоутов в запредельном состоянии / П.Е. Бураковский // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия «Морская техника и технология».– 2017.– №3.– С.16–23. (автор 100%)

20.Бураковский, П.Е. Разработка конструктивных решений, направленных на предотвращение захвата волной носовой оконечности судна / П.Е. Бураковский // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия «Морская техника и технология».– 2017.– №2.– С.7–13. (автор 100%)

21.Бураковский, П.Е. Разработка конструктивных мероприятий по снижению последствий столкновений судов / П.Е. Бураковский // Морской вестник.– 2017.– Спецвыпуск №1(13).– С.36–38. (автор 100%)

22.Бураковский, П.Е. К вопросу об учете гофрировки бортовой обшивки при дефектации балок набора судовых корпусов / П.Е. Бураковский // Морские интеллектуальные технологии.– 2017.– №3(37), т. 1.– С.11–16. (автор 100%)

23.Бураковский, Е.П. Сценарии гибели нефте-рудовоза MV «Derbyshire» / Е.П. Бураковский, П.Е. Бураковский // Морские интеллектуальные технологии.– 2017.– №3(37), т. 1.– С.17–22. (автор 50%)

24.Бураковский, Е.П. Математическая модель столкновения судов, движущихся параллельными курсами / Е.П. Бураковский, П.Е. Бураковский, В.А. Дмитриевский // Морские интеллектуальные технологии.– 2017.– №3(37), т. 1.– С.23–28. (автор 40%)

25.Бураковский, Е.П. К вопросу о сценарии гибели судов во время шторма вследствие захвата волной их носовой оконечности / Е.П. Бураковский, П.Е. Бураковский // Морские интеллектуальные технологии.– 2017.– №4(38), т. 2. – С. 27–33. (автор 40%)

26.Бураковский, Е.П. Математическая модель столкновения судов при движении произвольными курсами / Е.П. Бураковский, П.Е. Бураковский, В.А. Дмитриевский // Морские интеллектуальные технологии.– 2017.– №4(38), т. 2. – С. 23–28. (автор 40%)

27.Бураковский, Е.П. Проблемы самоорганизации при взаимодействии судна с внешней средой / Е.П. Бураковский, П.Е. Бураковский, Ю.И. Нечаев, В.П. Прохнич // Морские интеллектуальные технологии.– 2017.– №4(38), т. 2. – С. 39–48. (автор 40%)

28.Бураковский, П.Е. Исследование остойчивости судна в условиях захвата волной носовой оконечности / П.Е. Бураковский // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия Морская техника и технология.– 2018.– №2. – С. 7–13. (автор 100%)

29.Бураковский, Е.П. Учёт сдвига при расчёте балок судовых бортовых перекрытий, воспринимающих интенсивные локально распределённые нагрузки / Е.П. Бураковский, П.Е. Бураковский // Вестник Астраханского государственного

го технического университета. Серия «Морская техника и технология».– 2018.– №3. – С. 7–16. (автор 50%)

30.Бураковский, Е.П. К вопросу об определении нагрузки, действующей на палубу судна в носовой оконечности при ее залипании на встречном волнении / Е.П. Бураковский, П.Е. Бураковский // Морские интеллектуальные технологии.– 2018.– №4(42), т. 3.– С. 19–25. (автор 50%)

31.Бураковский, Е.П. Математическая модель оценки риска столкновения в потоке судов с произвольным направлением движения / Е.П. Бураковский, П.Е. Бураковский, В.А. Дмитриевский // Морские интеллектуальные технологии.– 2018.– №4(42), т. 3.– С. 11–18. (автор 40%)

32.Бураковский, Е.П. Учет упругих свойств конструкции при деформировании балок судовых перекрытий в запредельном состоянии / Е.П. Бураковский, П.Е. Бураковский, А.В. Мыслик // Морские интеллектуальные технологии.– 2018.– №4(42), т. 3. – С. 26–30. (автор 40%)

33.Бураковский, Е.П. Оценка вероятности встречи морских судов с аномальными волнами / Е.П. Бураковский, П.Е. Бураковский, В.А. Дмитриевский // Морские интеллектуальные технологии.– 2019.– №4(46), т. 4. – С. 10–15. (автор 40%)

34.Бураковский, П.Е. Исследование влияния седловатости палубы на безопасность судна в штормовых условиях / П.Е. Бураковский // Морские интеллектуальные технологии.– 2019.– №4(46), т. 4. – С. 16–23. (автор 100%)

35.Бураковский, Е.П. К вопросу о нормировании общей прочности корпусов морских судов / Е.П. Бураковский, П.Е. Бураковский // Морские интеллектуальные технологии.– 2019.– №4(46), т. 4. – С. 31–37. (автор 50%)

36.Бураковский, П.Е. Экспериментальное исследование гидродинамических сил, действующих на носовую оконечность судна в процессе захвата ее волной / П.Е. Бураковский // Труды Крыловского государственного научного центра.– 2019.– Специальный выпуск 1. – С. 146–152. (автор 100%)

37.Бураковский, Е.П. Изучение структуры коэффициента, учитывающего человеческий фактор при навигационных авариях / Е.П. Бураковский, П.Е. Бураковский // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова.– 2019.– Т. 11, №3.– С. 439-447. (автор 50%)

38.Бураковский, П.Е. К вопросу об определении максимальных изгибающих моментов в задачах нормирования общей прочности корпусов судов / П.Е. Бураковский // Труды Крыловского государственного научного центра.– 2020.– Специальный выпуск 1. – С. 18–23. (автор 100%)

Монографии:

39.Бураковский, П.Е. Расчет подкреплений локально загруженных связей бортовых перекрытий судов / П.Е. Бураковский. – Калининград: Изд-во ФГОУ ВПО «КГТУ», 2011. – 268 с. (автор 100%)

40.Бураковский, П.Е. Обеспечение прочности корпусных конструкций судов в процессе эксплуатации: монография / П.Е. Бураковский. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2015. – 298 с. (автор 100%)

41.Бураковский, Е.П. Нелинейные задачи упруго-пластического деформирования судовых корпусных конструкций: монография. / Е.П. Бураковский, П.Е.

Бураковский. – Калининград: Филиал ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия» в г. Калининграде, 2019.– 440 с. (автор 50%)

42.Бураковский, Е.П. Конструктивное обеспечение безопасности мореплавания: монография / Е.П. Бураковский, П.Е. Бураковский, В.А. Дмитровский. – СПб.: Лань, 2020. – 300 с. (автор 40%)

Патенты РФ на изобретения:

43.Пат. 2382714 Российская Федерация, МПК В63В 3/14. Бортовое перекрытие / Бураковский Е.П., Бураковский П.Е., Концедаева Ж.Г., Прохнич В.П.: заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «КГТУ».– № 2009113394/11; заявл. 09.04.2009; опубл. 27.02.2010, бюл. № 6. – 8 с. (автор 45%)

44.Пат. 2463197 Российская Федерация, МПК В63В 3/14, В63В 3/26. Бортовое перекрытие/ Бураковский П.Е.: заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «КГТУ».–№ 2011118911/11; заявл.11.05.2011; опубл. 10.10.2012,бюл.№ 28.–9 с. (автор 100%)

45.Пат. 2463198 Российская Федерация, МПК В63В 3/24. Днищевое перекрытие судна/ Бураковский П.Е.: заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «КГТУ».–№ 2011117730/11; заявл. 03.05.2011; опубл. 10.10.2012,бюл.№ 28.–9 с. (автор 100%)

46.Пат. 2472665 Российская Федерация, МПК В63В 3/14, В63В 3/26. Бортовое перекрытие/ Бураковский П.Е.: заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «КГТУ».–№ 2011114621/11; заявл.13.04.2011;опубл. 20.01.2013,бюл. № 2.– 12 с. (автор 100%)

47.Пат. 2472666 Российская Федерация, МПК В63В 3/14. Бортовое перекрытие/ Бураковский П.Е.: заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «КГТУ».– № 2011115174/11; заявл. 18.04.2011; опубл. 20.01.2013, бюл. № 2.– 8 с. (автор 100%)

48.Пат. 2486096 Российская Федерация, МПК В63В 3/14, В63В 3/26. Бортовое перекрытие/ Бураковский Е.П., Бураковский П.Е.: заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «КГТУ».– № 2012109943/11; заявл. 14.03.2012; опубл. 27.06.2013, бюл. № 18.– 6 с. (автор 50%)

49.Пат. 2507103 Российская Федерация, МПК В63В 3/14, В63В 3/26. Бортовое перекрытие/ Бураковский Е.П., Бураковский П.Е.: заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «КГТУ».– № 2012151746/11; заявл. 03.12.2012; опубл. 20.02.2014, бюл. № 5.– 7 с. (автор 55%)

50.Пат. 2518695 Российская Федерация, МПК В63В 1/06, В63В 43/18. Бульбовая наделка корпуса судна/ Бураковский Е.П., Бураковский П.Е.: заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «КГТУ».– № 2013110907/11; заявл. 12.03.2013; опубл. 10.06.2014, бюл. № 16.– 7 с. (автор 60%)

51.Пат. 2527619 Российская Федерация, МПК В63В 1/06, В63В 43/18. Бульбовая наделка корпуса судна/ Бураковский П.Е.: заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «КГТУ».– № 2013121519/11; заявл. 07.05.2013; опубл. 10.09.2014, бюл. № 25.– 7 с. (автор 100%)

52.Пат. 2533999 Российская Федерация, МПК G01N 3/20. Способ испытания плоских образцов на изгиб/ Бураковский Е.П., Бураковский П.Е.: заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «КГТУ».– № 2013110909/28; заявл.

- 12.03.2013; опубл. 27.11.2014, бюл. №33.– 7 с. (автор 55%)
53. Пат. 2582328 Российская Федерация, МПК В63В 39/06, В63В 1/16, В63В 3/44. Успокоитель качки судна / Бураковский Е.П., Бураковский П.Е., Юсып В.М.: заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «КГТУ». – № 2014138317/11; заявл. 22.09.2014; опубл. 20.04.2016, бюл. №11.– 7 с. (автор 50%)
54. Пат. 2595094 Российская Федерация, МПК В63В 17/00, В63В 17/04. Фальшборт/ Бураковский Е.П., Бураковский П.Е., Юсып В.М.: заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «КГТУ». – № 2015126230/11; заявл. 30.06.2015; опубл. 20.08.2016, бюл. № 23.– 7 с. (автор 50%)
55. Пат. 2617866 Российская Федерация, МПК В63В 43/02, В63В 3/04. Корпус судна / Бураковский П.Е.: заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КГТУ». – № 2016111017; заявл. 24.03.2016; опубл. 28.04.2017, бюл. №13.– 10 с. (автор 100%)
56. Пат. 2621407 Российская Федерация, МПК В63В 39/06, В63В 1/16, В63В 3/44. Успокоитель качки судна / Бураковский П.Е.: заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КГТУ». – № 2016124096; заявл. 16.06.2016; опубл. 05.06.2017, бюл. № 16.– 8 с. (автор 100%)
57. Пат. 2621405 Российская Федерация, МПК В63В 3/14. Бортовое перекрытие / Бураковский П.Е.: заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КГТУ». – № 2016114627; заявл. 14.04.2016; опубл. 05.06.2017, бюл. № 16.– 8 с. (автор 100%)
58. Пат. 2645430 Российская Федерация, МПК G01N 3/20. Способ испытания плоских образцов на изгиб / Бураковский П.Е.: заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КГТУ». – № 2017112480; заявл. 11.04.2017; опубл. 21.02.2018, бюл. № 6.– 14 с. (автор 100%)
59. Пат. 2652502 Российская Федерация, МПК В63В 1/06, В63В 43/18. Бульбовая наделка корпуса судна / Бураковский П.Е.: заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КГТУ». – № 2017111555; заявл. 05.04.2017; опубл. 26.04.2018, бюл. №12.– 8 с. (автор 100%)
60. Пат. 2667025 Российская Федерация, МПК В63В 43/02, В63В 3/04. Корпус судна / Бураковский П.Е.: заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КГТУ». – № 2017140393; заявл. 20.11.2017; опубл. 13.09.2018, бюл. №26.– 10 с. (автор 100%)
61. Пат. 2667434 Российская Федерация, МПК В63В 9/08, G01M 10/00. Способ испытаний моделей корпусов судов / Бураковский П.Е.: заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КГТУ». – № 2017140392; заявл. 20.11.2017; опубл. 19.09.2018, бюл. №26.– 10 с. (автор 100%)
62. Пат. 2672147 Российская Федерация, МПК В63В 3/14, В63В 3/26. Бортовое перекрытие / Бураковский Е.П., Бураковский П.Е., Мысник А.В.: заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КГТУ». – № 2017142866; заявл. 07.12.2017; опубл. 12.11.2018, бюл. №32.– 12 с. (автор 40%)
63. Пат. 2672225 Российская Федерация, МПК В63В 1/06, В63В 43/02. Корпус судна / Бураковский Е.П., Бураковский П.Е., Юсып В.М.: заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КГТУ». – № 2017142865; заявл. 07.12.2017; опубл.

- 12.11.2018, бюл. №32.– 8 с. (автор 40%)
64. Пат. 2672227 Российская Федерация, МПК В63В 1/06, В63В 43/02. Корпус судна / Бураковский П.Е.: заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КГТУ».– № 2017142863; заявл. 07.12.2017; опубл. 12.11.2018, бюл. №32.– 9 с. (автор 100%)
65. Пат. 2677950 Российская Федерация, МПК В63В 3/24, В63В 3/14, В63В 43/18. Днищевое перекрытие судна / Бураковский П.Е. : заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КГТУ».– № 2018112938; заявл. 09.04.2018; опубл. 22.01.2019, бюл. №3.– 12 с. (автор 100%)
66. Пат. 2682385 Российская Федерация, МПК В63В 1/06, В63В 43/02. Корпус судна / Бураковский П.Е. : заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КГТУ».– № 2017145861; заявл. 25.12.2017; опубл. 19.03.2019, бюл. №8.– 12 с. (автор 100%)
67. Пат. 2685369 Российская Федерация, МПК В63В 43/02, В63В 3/04. Корпус судна / Бураковский П.Е. : заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КГТУ».– № 2018113616; заявл. 13.04.2018; опубл. 17.04.2019, бюл. №11.– 10 с. (автор 100%)
68. Пат. 2688611 Российская Федерация, МПК G01N 3/20. Способ испытания плоских образцов на изгиб / Бураковский П.Е. : заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КГТУ».– № 2018110922; заявл. 27.03.2018; опубл. 21.05.2019, бюл. №15.– 11 с. (автор 100%)
69. Пат. 2689048 Российская Федерация, МПК В63В 43/00, В63В 9/00. Способ выявления повреждений в наружной обшивке корпуса судна / Бураковский Е.П., Бураковский П.Е., Мысник А.В.: заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КГТУ».– № 2018109313; заявл. 15.03.2018; опубл. 23.05.2019, бюл. №15.– 10 с. (автор 40%)
70. Пат. 2689094 Российская Федерация, МПК В63В 43/02, В63В 3/02, В63В 1/06. Корпус судна / Бураковский П.Е. : заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КГТУ».– № 2017144335; заявл. 18.12.2017; опубл. 23.05.2019, бюл. №15.– 10 с. (автор 100%)
71. Пат. 2690642 Российская Федерация, МПК В63В 1/06, В63В 43/02. Носовая оконечность корпуса судна / Бураковский Е.П., Бураковский П.Е. : заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КГТУ».– № 2018123395; заявл. 27.06.2018; опубл. 04.06.2019, бюл. №16.– 9 с. (автор 50%)
72. Пат. 2690658 Российская Федерация, МПК В63В 3/24, В63В 3/14, В63В 43/18. Днищевое перекрытие судна / Бураковский П.Е. : заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КГТУ».– № 2018117054; заявл. 07.05.2018; опубл. 05.06.2019, бюл. №16.– 12 с. (автор 100%)
73. Пат. 2690784 Российская Федерация, МПК В63В 3/14, В63В 3/26. Бортовое перекрытие / Бураковский Е.П., Бураковский П.Е., Мысник А.В.: заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КГТУ».– № 2018118451; заявл. 18.05.2018; опубл. 05.06.2019, бюл. №16.– 12 с. (автор 40%)
74. Пат. 2693725 Российская Федерация, МПК В63В 3/24, В63В 3/14, В63В 43/18. Днищевое перекрытие судна / Бураковский П.Е. : заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КГТУ».– № 2018122218; заявл. 15.06.2018; опубл.

04.07.2019, бюл. №19.– 10 с. (автор 100%)

75. Пат. 2694705 Российская Федерация, МПК В63В 3/24, В63В 3/14, В63В 43/18. Днищевое перекрытие судна / Бураковский П.Е. : заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КГТУ». – № 2018129491; заявл. 13.08.2018; опубл. 16.07.2019, бюл. №20.– 12 с. (автор 100%)

76. Пат. 2716890 Российская Федерация, МПК В63В 3/14, В63В 3/26. Бортовое перекрытие / Бураковский Е.П., Бураковский П.Е., Мысник А.В.: заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КГТУ». – № 2018133750; заявл. 24.09.2018; опубл. 17.03.2020, бюл. №8.– 13 с. (автор 40%)

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ:

77. Программа расчета пластины судового корпуса в упруго-пластической стадии под нагрузкой, распределенной в средней части пролета / Бураковский П.Е., Прохнич В.П. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2013615147 от 20.06.2013. (автор 50%)

78. Программа расчета балок судового корпуса в упругопластической стадии под действием сильно локализованных нагрузок / Бураковский П.Е. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2014614573 от 20.05.2014. (автор 100%)

79. Программа расчета судовых пластин под действием нагрузки с падающей интенсивностью / Бураковский П.Е., Исаева М.В. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ №2019665202 от 20.11.2019. (автор 50%)

80. Программа расчета балок судового корпуса на многослойных упруго-пластических основаниях с нелинейным упрочнением под действием сильно локализованных нагрузок / Бураковский П.Е., Исаева М.В. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ №2019665203 от 20.11.2019. (автор 50%)

Публикации в прочих изданиях:

81. Бураковский, П.Е. Информационно-аналитический блок контроля динамики судна при движении в условиях ограниченной акватории / П.Е. Бураковский, Ю.И. Нечаев // Нейрокомпьютеры: разработка, применение.– 2010.– №5.– С.14–22. (автор 60%)

82. Бураковский, Е.П. Контроль скорости судна на ограниченном фарватере при функционировании бортовой интеллектуальной системы «Прочность и вибрация» / Е.П. Бураковский, П.Е. Бураковский, В.П. Прохнич // Системы искусственного интеллекта в интеллектуальных технологиях XXI века: коллективная монография. – СПб.: Арт-Экспресс, 2011.– С. 213–224. (автор 50%)

83. Burakovskiy, E.P. Problem wytrzymałości powłoki statku / E.P. Burakovskiy, P.E. Burakovskiy // VII międzynarodowa konferencja naukowo-techniczna EXPLO-SHIP 2012: Problemy eksploatacji obiektów pływających i urządzeń portowych. Świnoujście, 15–17 05.2012. – Szczecin: Wydawnictwo Naukowe Akademii Morskiej, 2012. – S. 25. (автор 50%)

84. Burakovskiy, E.P. Problem of ship shell durability / E.P. Burakovskiy, P.E. Burakovskiy // Zeszyty naukowe Akademia Morska w Szczecinie. – Szczecin: Wydawnictwo Naukowe Akademii Morskiej, 2012. – №29(101). – P. 15–20. (автор 50%)

85. Burakovskiy, E.P. Forecasting deflections of plates in case of perception of

transient loads / E.P. Burakovskiy, P.E. Burakovskiy // Zeszyty naukowe Akademia Morska w Szczecinie. – Szczecin: Wydawnictwo Naukowe Akademii Morskiej, 2014. – №39(111). – P. 43–46. (автор 50%)

86. Burakovskiy, E.P. To the question of vessels safety ensuring in the emergency situations / E.P. Burakovskiy, P.E. Burakovskiy // The 11th International Conference on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation.– Gdynia, Poland, 2015.– P. 51. (автор 50%)

87. Burakovskiy, E.P. To the question of vessels safety ensuring in the emergency situations / E.P. Burakovskiy, P.E. Burakovskiy // Marine Navigation and Safety of Sea Transportation: Activities in navigation.– UK, Croydon: CRC Press/Balkema, 2015.– P. 19–24. (автор 50%)