

На правах рукописи

КОСТЫЛЕВ Антон Игоревич

**Разработка методов расчета параметров судов при нестационарном  
движении в ледовых условиях**

специальность 05.08.01 – Теория корабля и строительная механика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2017 г.

Работа выполнена в ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

Научный руководитель: **Сазонов Кирилл Евгеньевич**, д.т.н., с.н.с. начальник лаборатории исследований и экспериментальной отработки архитектуры средств освоения шельфа и судов в ледовых условиях ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

Официальные оппоненты: **Зуев Валерий Андреевич**, д.т.н., профессор, з.д.н., заведующий кафедрой кораблестроения и авиационной техники ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»  
**Ионов Борис Петрович**, д.т.н., заместитель главного инженера АО «ЦКБ «ОСК-Айсберг»

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное учреждение «Арктический и антарктический научно – исследовательский институт» (ФГБУ «АНИИ»)**, г. Санкт-Петербург

Защита состоится «\_\_\_»\_\_\_\_\_ 2018 года в \_\_\_ часов \_\_\_ минут на заседании диссертационного совета Д 411.004.01 при Федеральном государственном унитарном предприятии «Крыловский государственный научный центр», по адресу: г. Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГУП «Крыловский государственный научный центр» и на сайте <http://krylov-center.ru> в разделе «Ученый и диссертационные советы».

Автореферат разослан «\_\_\_»\_\_\_\_\_ 2018 года

Отзывы просим направлять в 2-х экземплярах по адресу: по почте – 196158, г. Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44, ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук

Л.И. Вишнеvский

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** На сегодняшний день такие качества корабля, как ледовая ходкость и ледовая маневренность изучена достаточно хорошо с позиции стационарного движения, при котором объект характеризуется постоянством по времени его скорости и сопротивления движению.

Нестационарное движение судна – переход от одного стационарного положения в другое под воздействием возмущающих сил, действующих на объект, в произвольные моменты времени. К нестационарным движениям судна в ледовых условиях, например, относятся маневрирование и работа судна набегами. На практике, данные виды движения применяются для преодоления ледовых перемычек, предотвращения опасных ситуаций, вызванных взаимодействием ледовых полей и торосистых образований, а также для продления приемлемых ледовых условий при поисково – разведочных работах и погрузочно-разгрузочных операциях вблизи морских инженерных сооружений и снижения уровня ледовой нагрузки на них. Для определения возможности выполнения этих мероприятий конкретным судном и прогнозирования затрачиваемого при этом времени, требуется создание метода расчета параметров судов, учитывающего нестационарность процессов при их движении. Описание переходных процессов, характеризующих нестационарное движение судна в ледовых условиях, в литературе встречается в основном лишь с теоретической точки зрения, без приведения результатов расчетных, модельных и натурных данных.

В свою очередь, информация о времени выполнения конкретного способа движения судна в заданных ледовых условиях позволит нефтегазовым компаниям, желающим уменьшить собственные затраты, производить экономические расчеты по эксплуатации и более взвешенно подходить к вопросу о фрахтовании конкретного судна для этих операций, в том числе для управления ледовой обстановкой (УЛО).

Развитие ледотехники требует создания математического аппарата, позволяющего проектировщикам проводить поверочные расчеты маневров судна в ледовых условиях, а также выбирать какая наиболее подходящая траектория движения судна будет эффективна для решения поставленной задачи при заданных ледовых условиях и какое судно, имеющееся на данный момент, будет наиболее подходящим для этого.

Для целей применения технологии УЛО, интерес представляет результат эффективности действий ледоколов вблизи морских сооружений, заключающийся в степени снижения уровня ледовой нагрузки на морские сооружения. На данный момент отсутствуют достоверные методики расчета этого явления.

Таким образом, задача по разработке методов расчета параметров судов при нестационарном движении является актуальной.

**Целью настоящей работы** является разработка практических методов расчета параметров судов при нестационарном движении при работе судна набегами и маневрировании в различных ледовых условиях. Разработанные расчетные методы, учитывающие динамический характер взаимодействия корпуса судна со льдом, могут служить надежным инструментом при определении маневренных характеристик в

ледовых условиях, проведении поверочных расчетов при сравнении форм корпуса судна, оценки применения ледоколов и ледокольных судов в операциях УЛО.

Для достижения поставленной цели должны быть решены следующие **основные задачи**:

1. Анализ предыдущих работ по исследованию ледовой ходкости и маневренности, а также способам оценки нестационарности движения судов в различных ледовых условиях.
2. Разработка методов расчета параметров судов при нестационарном движении при работе набегам и маневрировании в различных ледовых условиях и их проверка на основе модельных и натурных испытаний ледоколов.
3. Разработка формул для оценок времени выполнения тактических маневров при стационарном движении.
4. Разработка алгоритмов оценки снижения ледовой нагрузки на сооружения от действия ровного льда и торосистых образований, а также их проверка на основе экспериментальных исследований в ледовом бассейне.
5. Создание программного комплекса для исследования поведения объектов морской техники во льду.

**Объектом исследования** настоящей диссертационной работы являются современные ледоколы и ледокольные суда, а также морские инженерные сооружения.

**Предметом исследования** являются параметры судна, характеризующие его ледовую ходкость и маневренность при нестационарном движении в различных ледовых условиях: линейная и угловая скорость, радиус циркуляции, угол перекладки рулей или винто - рулевых колонок, угол дрейфа, время выполнения тактического приема, количество набегов, ледовые силы и ледовый момент, действующие на корпус судна, а также глобальная ледовая нагрузка на платформы.

**Методы исследований.** Применяются знания из области теории корабля, систем автоматического управления, принятия решений, системного анализа, механики разрушения и динамики ледяного покрова. В работе используются геометрические зависимости, методы аппроксимации функций, методы решения дифференциальных уравнений, методы расчета ледового сопротивления и сопротивления чистой воды. Используются экспериментальные и натурные испытания ледоколов «Санкт-Петербург» проекта 21900, «Владивосток» проекта 21900М, многофункционального ледокольного судна «Юрий Топчев» проекта Moss 828, а также модельные испытания в ледовом бассейне «Ледокола - Лидера», арктического танкера и буровых платформ.

Программное обеспечение разработано на языке программирования Matlab, а численное моделирование производится в инженерной среде Simulink.

**Научная новизна.** На основе решения системы нелинейных дифференциальных уравнений и применении алгоритмов изменения моделирования движения объекта, разработан метод расчета для оценки параметров судна при нестационарном движении в ровных льдах и торосистых образованиях. При данном подходе исследуемый объект переводится из одного стационарного режима в другой. Новая модель позволяет получать как установившиеся, так и динамические значения

параметров судна при движении в ледовых условиях. Выполненные расчеты подкреплены результатами натурных и модельных испытаний.

Разработанные алгоритмы оценки снижения уровня глобальной ледовой нагрузки на сооружения позволяют количественно оценить результаты деятельности ледоколов вблизи буровых платформ.

**Практическая ценность.** Метод расчета параметров судов при нестационарном движении во время работы судна набегам позволяет прогнозировать время преодоления торосистых образований и определять количество необходимых набегов требуемых для этого, что может быть использовано в системах УЛО и морских транспортных системах.

Метод расчета параметров судов при нестационарном движении во время маневрирования в ровном льду позволяет прогнозировать время выполнения тактических приемов и траекторию движения судна, рассчитывать относительный радиус циркуляции судна в заданных ледовых условиях.

В результате проведения многочисленных расчетов по созданной математической модели была получена новая информация о маневренности судов во льдах, которую можно использовать при оптимизации формы корпусов, создании интеллектуальных систем принятия решений при операциях УЛО.

Временные интервалы выполнения судами тактических приемов, полученные в результате расчетов, могут быть применены для определения границ зон безопасности и времени реагирования в плане ледового менеджмента – документа, регламентирующего выполнение морских операций во льду. Полученные формулы для оценок времени выполнения тактических маневров могут быть использованы на начальных этапах проектирования и составления технико-экономического обоснования систем УЛО.

Программный комплекс (ПК) состоит из двух программ для ЭВМ, на которые получены свидетельства о государственной регистрации. С помощью ПК возможно проводить расчеты ледовой ходкости и маневренности при нестационарном движении судов в различных ледовых условиях, а также проводить расчеты глобальной ледовой нагрузки на разные типы морских сооружений по существующим методикам и определять процент снижения уровня ледовой нагрузки на них при УЛО. Данный программный комплекс может быть использован для научных и учебных целей, а также как самостоятельный вид услуги по математическим расчетам, потенциальные потребители которых – компании, занимающейся добычей полезных ископаемых на шельфе, операторы морских транспортных систем, проектные организации.

В целом, результаты работы позволяют проводить поверочные расчеты маневров судна в ледовых условиях и давать рекомендации по выбору ледокольного флота, количеству судов, характеристикам корпусов и движительно – рулевого комплекса судов, необходимых для участия в операциях УЛО. Сформулированные алгоритмы оценки снижения уровня ледовой нагрузки позволяют количественно оценить результаты деятельности ледоколов вблизи буровых платформ.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Метод расчета параметров судна при нестационарном движении во время работы набегам;
2. Метод расчета параметров судна при нестационарном движении во время маневрирования в ровном льду;

3. Формулы для оценки времени выполнения тактических приемов ледокольными судами при стационарном движении;
4. Алгоритм оценки снижения уровня глобальной ледовой нагрузки на сооружения от действия торосистых образований при использовании ледоколов;
5. Алгоритм оценки снижения уровня глобальной ледовой нагрузки на сооружения от действия ровного льда при использовании ледоколов;
6. Способ оценки эффективности выполнения тактических приемов исследуемыми судами

**Внедрение результатов работы.** Результаты работы использованы ФГУП «Крыловский государственный научный центр» при проведении экспертной оценки показателей ледовой ходкости и управляемости ледокола «Мурманск» пр.21900М, выполненной для ПАО «Выборгский судостроительный завод», при расчете скорости движения «Ледокола – Лидера» при преодолении торосов, выполненного для ОАО «ЦКБ Айсберг».

**Достоверность** полученных результатов подтверждена корректностью теоретического обоснования приведенных утверждений и сравнительным анализом данных, полученных в ходе проведения численного моделирования и экспериментальных исследований.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертации изложены и обсуждены на 8 конференциях: «Крыловские чтения 2011, 2013», «Навигация и управление движением 2012», «Полярная механика 2014, 2016, 2017», «Молодые ученые и специалисты ФГУП Крыловский ГНЦ 2014, 2015» и на научной секции в «Доме ученых» 2016 г.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 13 научно-технических статей, из которых в изданиях, рекомендуемых перечнем ВАК РФ, опубликовано 6 работ, в числе которых 3 работы имеют 100% участия автора. Свидетельства на программу для ЭВМ: «Программа расчета динамики движения морских подвижных объектов во льду» (№2017618910) и «Программа расчета ледовой нагрузки действующей на морские инженерные сооружения при операциях управления ледовой обстановкой» (№2017618925).

**Личный вклад.** Все исследования и разработки, описанные в настоящей диссертационной работе, выполнены автором лично.

**Объем и структура работы.** Работа состоит из введения, 5-ти глав и заключения, содержит 129 страниц основного текста, включая 23 таблицы, 46 рисунков, 3 страницы оглавления и список литературы из 111 названий. Приложения 1 – 3 имеют объем 3 страницы.

#### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована основная цель, указаны задачи, подлежащие решению в данной работе, приведены результаты, выносимые на защиту, обоснована научная новизна и практическая значимость работы.

**В первой главе** проведен анализ применяемых в современной практике методов оценки ледовой ходкости и маневренности судов в различных ледовых условиях. В работе проанализирован мировой опыт применения ледокольных судов для морских операций во льду, с целью снижения ледовой нагрузки на морские сооружения и предотвращения опасных ситуаций, вызванных взаимодействием с ледяными образованиями. Одним из результатов обобщения является классификация тактических приемов, применяемых ледокольными судами. Рассмотрены методики расчета ледовых нагрузок, действующие на морские инженерные сооружения.

Первый параграф главы посвящен анализу расчетных методов определения параметров ледовой ходкости и маневренности судов в различных ледовых условиях. Предпосылками для исследований автора послужили работы отечественных и зарубежных ученых: В.И. Каштеляна, Б.П. Ионова, К.Е. Сазонова, А.Я. Рывлина, В.А. Зуева, Е.М. Грамузова, В.А. Лобанова, М.К. Таршиса, В.А. Тронина, М.С. Яковлева, Л.М. Ногида, А.В. Бронникова, Н.В. Калининой, Е. Энквиста, В.Р. Милано, И. Левиса, Р. Эдвардса, Г. Линдквиста, С.А. Линдстрема, П. Валанто, Д. Эшли, М. Лау, К. Риска, Biou Su, Q. Zhou, J. Sawamura, и других. Отмечено, что все перечисленные методики для расчета ледовых сил и моментов разработаны для стационарного случая взаимодействия корпуса судна со льдом.

В части касающейся ледовых нагрузок на сооружения рассмотрены подходы: К.Н. Коржавина, В.П. Афанасьева и Ю.В. Долгополова, А. Продановика, М. Меллора, К. Кроасдейла, а также методики расчета, рекомендованные отечественными и зарубежными стандартами.

Во втором параграфе обобщен мировой опыт применения ледокольных судов для морских операций во льду, с целью снижения ледовой нагрузки на морские сооружения и предотвращения опасных ситуаций, вызванных взаимодействием с ледяными образованиями. Результатом обобщения является классификация тактических приемов, применяемых ледокольными судами. Сформулированы принципы построения систем УЛО, представлена структурная схема и дано описание основных ее элементов. Приведен анализ технических средств мониторинга и прогнозирования ледовой обстановкой.

Отмечается необходимость усовершенствования метода расчета маневрирования судна во льду, создания метода расчета динамических параметров движения судна через торосистые образования и оценки эффективности при защите стационарных морских инженерных сооружений от воздействия ровного льда и однолетних торосов.

**Вторая глава** посвящена разработке методов расчета параметров судна при нестационарном движении в ледовых условиях, математической модели и алгоритмам управления движением судна, используемым для моделирования, а также разработке формул для оценок выполнения тактических приемов.

В первом параграфе описан метод расчета параметров судна при нестационарном движении во время работы набегами, разработанный с целью определения необходимого для преодоления торосистого образования количества набегов и затрачиваемого при этом времени.

Метод расчета параметров судна при нестационарном движении при работе набегами, включает в себя методики расчета сопротивления в разных ледовых условиях, в соответствии с этапами движения судна, и уравнение прямолинейного движения судна.

В методе расчета использованы аналитические выражения для определения максимального сопротивления судна в торосе, предложенные К.Е. Сазоновым. Следует отметить, что метод был разработан для случая преодоления ледового препятствия с постоянной скоростью. Однако в реальности, процесс преодоления сопровождается изменением скорости движения. В данной работе нестационарность движения учитывается. В работе принята треугольная в плане модель торосистого образования, однако, используемые подходы позволяют применять метод и при произвольной форме тороса.

Для расчета движения в ровном льду используется формула Б.П. Ионова, при расчете отхода судна после набега и движения по каналу битого льда – формула А.Я. Рывлина. В общем виде сопротивление льда на каждом этапе движения можно представить в следующем виде:

$$R = \begin{cases} R_{level\ ice}, & \text{если вне тороса} \\ l_{ridge} \cdot \tan\left(\frac{R_{ridge\_max} - R_{level\ ice}}{0.5 \cdot B_{ridge}}\right), & \text{если в торосе,} \\ R_{broken\ ice}, & \text{при отходе / набеге} \end{cases} \quad (1)$$

где:  $l_{ridge}$  - длина внедрения в торос,  $B_{ridge}$  - протяженность тороса в направлении движения,  $R_{level\ ice}$  - сопротивление в ровном льду,  $R_{broken\ ice}$  - сопротивление в битых льдах,  $R_{ridge\ max}$  - максимальное сопротивление в торосе.

Описанная задача сводится к решению задачи Коши для каждого отдельного этапа движения судна при начальных условиях соответствующих установившимся значениям предыдущего этапа. Для первого этапа движения – разгона судна в ровном льду, задача решается при нулевых начальных условиях:  $V=0$  при  $t=0$ . Переход же от одного этапа движения к другому осуществляется выполнением соответствующих алгоритмов управления движением судна, реализующие изменение знака и значения тягового усилия -  $T$ , а также формулы расчета сопротивления судна -  $R$ , соответствующей ледовому условию в котором находится объект в данный момент времени.

Принимается, что при очередном набеге расчет сопротивления в битых льдах производится до точки остановки в торосе при предыдущем набеге. Как только судно преодолело точку остановки, то расчет сопротивления уже проходит по кривой, построенной для тороса с учетом текущей скорости.

Представленный метод расчета параметров судна при нестационарном движении при работе набегами через торосистые образования имеет ряд допущений. Первое заключается в том, что ледовый покров представляется абсолютно ровным и однородным веществом. Второе – судно движется строго перпендикулярно к



торосистому образованию без крена и дифферента. Третье – отсутствие заклинивания судна в торосе. Четвертое – не учитывается расползание киля тороса во время движения судна.

Во втором параграфе рассматривается метод расчета параметров судна при нестационарном движении во время маневрирования во льду, разработанный с целью определения скорости на циркуляции, времени выполнения маневра, траектории движения и относительного радиуса циркуляций судна в заданных ледовых условиях.

Математическая модель движения в связанной с судном системе координат, удобной для расчета сил и моментов, описывается системой дифференциальных уравнений, полученной из общей формы уравнений динамики морского подвижного объекта с начальными условиями  $V_x=V_y=\omega_z=0$  при  $t=0$ . При этом ледовые силы и моменты рассчитываются по модифицированному автором методу К.Е. Сазонова. В соответствии с этим методом ледовая нагрузка распределена в пределах зон контакта корпуса судна со льдом. Положение зон контакта на корпусе вычисляется из кинематического условия о положительности проекции скорости рассматриваемой точки корпуса на внешнюю нормаль. Распределение ледового давления по длине зон контакта определяется с помощью двух коэффициентов, один из которых пропорционален местной нормальной скорости рассматриваемой точки корпуса, а другой – пропорционален некоторой фиктивной ширине корпуса в данной точке. Фиктивная ширина корпуса определяется для каждой точки с учетом угла дрейфа и угловой скорости вращения. Определение коэффициентов пропорциональности осуществляется по данным о ледовом сопротивлении корпуса при прямолинейном движении во льдах.

Анализ применения метода К.Е. Сазонова показал завышение результатов расчета в случаях выполнения циркуляций с большими углами перекадки средств управления судном. Автором было установлено, что во время выполнения циркуляций с большими углами перекадки судно развивает большую угловую скорость, возникает дрейф, увеличивается угол рыскания, тем самым изменяется зона контакта корпуса судна со льдом. В этом случае, в процессе поворота в большей степени взаимодействие происходит в зоне боковых скул носовой и кормовой части судна, а также вблизи вертикальных бортов. Коэффициенты пропорциональности рассчитываются для случая прямого хода, в этом случае взаимодействие корпуса судна со льдом происходит лишь в носовой части судна. Несоответствие точек контакта корпуса судна со льдом и приводит к завышению результатов расчетов.

Модификация метода состоит в осреднении коэффициентов пропорциональности по всей длине судна, а не только по носовой части. Однако данная мера не полностью решает вопрос соответствия. На основании модельных и натурных данных, установлено, что для улучшения сходимости получаемых результатов, в величину фиктивной ширины корпуса по сравнению с ранее использованной величиной необходимо ввести эмпирический поправочный коэффициент –  $k = 0,75-1,00$ .

Решение указанной системы дифференциальных уравнений даёт лишь установившееся значения переменных состояния (проекций линейной и угловой

скорости), характеризующие стационарное (установившиеся) движение судна на циркуляции. Переход из одного установившего положения в другое осуществляется выполнением соответствующих алгоритмов моделирования движением объекта.

Под алгоритмами подразумевается математическая зависимость изменения начальных условий дифференцирования и «постоянных» коэффициентов, стоящих в правой части уравнений системы, в конкретные моменты времени.

Для расчета следующего (j-го) этапа движения, начинающегося в момент времени –  $t_j$ , начальные условия дифференцирования изменяются на установившиеся (или текущие) значения переменных состояния предыдущего этапа, т.е.  $V_x(j) = V_x(j-1)$ ,  $V_y(j) = V_y(j-1)$ ,  $\omega_y(j) = \omega_y(j-1)$  при  $t = t_j$ .

Коэффициенты в правой части уравнений, зависящие от тягового усилия судна, вычисляются при изменении управляющих воздействий и угла перекладки средств управления движением судна. Управляющие воздействия, производящие операцию умножения для расчета коэффициентов, в общем случае представляет собой единичную ступенчатую функцию.

При изменении угла перекладки изменяются проекции тягового усилия судна, происходит перераспределение зоны контакта корпуса судна с ледяным покровом, вследствие чего изменяются значения сил, моментов и происходит перерасчет переменных состояния судна. Это процесс продолжается до тех пор, пока не будет изменено время начала следующего этапа движения. Предложенный подход позволяет получать как «динамические», так и «стационарные» характеристики рассматриваемых процессов.

Представленный метод расчета параметров судна при нестационарном движении во время выполнения маневрирования судна во льду имеет ряд допущений. Первое заключается в том, что ледовые силы и моменты действуют только в плоскости ватерлинии. Второе – пренебрежение углом крена и дифферента при маневрировании судна во льду, что подтверждается натурными наблюдениями.

В третьем параграфе предлагается описание формул оценки времени выполнения судном тактических приемов (схем движения) разрушения ледяного покрова, применяемые в УЛО, разработанные для стационарного движения.

Представляется возможным классифицировать основные методы использования ледокольных судов для снижения уровня ледовой нагрузки на морские инженерные объекты, следующим образом:

- линейный прием разрушения ледяного покрова;
- секторный прием разрушения ледяного покрова;
- циркуляционный прием разрушения ледяного покрова.

Математическое описание схем движения ледоколов получено из условия: ледокол должен успеть выполнить один цикл управления пока ледовое поле надвигается с постоянной скоростью на защищаемый объект. Время до взаимодействия защищаемого объекта со льдом –  $t_{льда}$  рассчитывается из размера зоны безопасности перед сооружением –  $S_{льда}$  и его скорости дрейфа льда –  $V_{льда}$ . Основными параметрами оценки времени выполнения цикла управления –  $t_{общ}$

являются: радиус циркуляции судна во льду -  $R$ , скорость прямолинейного движения судна во льду -  $V_{ship}$ , скорость на циркуляции -  $V_{circ}$ .

В ходе проведения исследования получены следующие оценки:

- линейный метод – «змейка»:

$$t_{общ} = N \left( \frac{L + k\pi R}{V_{ship}} \right), \quad (2)$$

где:  $N$  – общее количество проходов,  $L$  – длина судна,  $k$  – отношение скорости движения ледокола на прямолинейном участке к скорости на циркуляции.

- двойной линейный метод:

$$t_{общ} = \frac{L(1.5N + 2) + R(1.5\pi(Nk_1 + k_2) - 1)}{V_{ship}}, \quad (3)$$

где:  $k_1$  – отношение скорости движения на прямолинейном участке к скорости движения на циркуляции в первом цикле управления,  $k_2$  – отношение скорости движения на прямолинейном участке к скорости движения на циркуляции большего радиуса во втором цикле управления;

- секторный метод – «секторная змейка»:

$$t_{общ} = \frac{l_0 + (N-1)k\pi R + N(l_0 + 2NR \operatorname{ctg}(\alpha))}{V_{ship}}, \quad (4)$$

где:  $l_0$  – дистанция начального участка траектории,

$$\alpha = \frac{\pi - \varphi}{2}, \quad (5)$$

где:  $\varphi$  – угол сектора.

- секторный метод – переменное движение носом - кормой:

$$t_{общ} = l_1 \cdot \frac{(1 - q^N)}{V_{ship}(1 - q)} + (N - 1) \cdot t_{turn}, \quad (6)$$

где:  $l_1$  – длина первого участка траектории,  $t_{turn}$  – время выполнения разворота,

$$q = \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin(\alpha - \beta)}, \quad (7)$$

где:  $\beta$  – угол курса.

- секторный метод – «восьмерка»:

$$t_{общ} = \frac{2}{V_{ship}}(l + k\pi R), \quad (8)$$

где:  $l$  – длина прямолинейного участка траектории.

Применение двухступенчатой схемы, т.е. схемы в которой участвуют два ледокольных судна, значительно повышает общую эффективность операций по управлению ледовой обстановкой.

- циркуляционный метод – полная циркуляция:

$$t_{общ i} = \frac{2k_i\pi R_i}{V_{ship i}}, \quad (9)$$

где:  $k_i$ - соответствует отношению скорости движения ледокола на прямолинейном участке к скорости на циркуляции для каждого ледокола.

- циркуляционный метод – эллипс:

$$t_{\text{общ } i} = \frac{q_i \pi (a_i + b_i)}{V_{\text{ship } i}}, \quad (10)$$

где:  $a_i$ - большая полуось эллипса для  $i$ -го ледокола,  $b_i$  - малая полуось эллипса для  $i$ -го ледокола,  $q_i$  - отношение скорости движения ледокола на прямолинейном участке к средней скорости движения на эллиптической траектории:

$$q_i = \frac{V_{\text{ship } i}}{V_{\text{circ } i}}. \quad (11)$$

В **третье** главе представлен сравнительный анализ результатов расчетов, выполненных по разработанным автором математическим моделям, с данными, полученными в ходе проведения экспериментальных исследований.

В первом параграфе представлен сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных при преодолении судном торосов. Для проведения расчетов в среде моделирования *Simulink* была составлена схема компьютерного моделирования, описывающая математическую модель нестационарного движения судна при работе набегам. В ходе проведения компьютерного моделирования рассчитывается сопротивление, скорость и время движения судна, его перемещение, а также определяются точки в торосе, где происходит остановка.

На первом этапе проверки разработанного метода, было проведено сравнение результатов по значениям сопротивления судна, полученным при буксировке модели судна с постоянной скоростью движения через торосистые образования. На втором этапе проверки проводилось сравнение данных по времени преодоления и значению максимального падения скорости при преодолении моделью судна на режиме свободного самохода через торос.

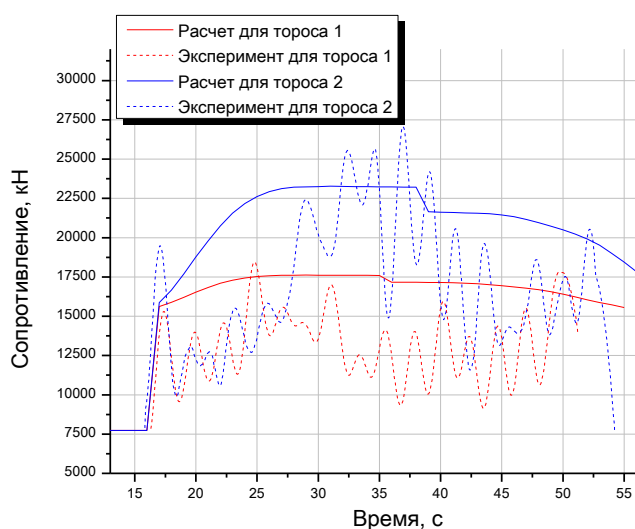


Рисунок 1 – Графики изменения сопротивления ледокола «Лидер» в торосах

На рисунке 1 представлены графики изменения сопротивления ледокола «Лидер» при движении через торосистые образования протяженностью - 73,0/75,0 м и глубиной киля - 9,5/11,0 м (в пересчете на натуру) при постоянной скорости. Максимальные значения сопротивления ледокола «Лидер» в торосах, полученные по расчету, отличаются от значений, которые были получены в ходе проведения модельных испытаний, на величину, не превышающую 15 %. Отмечается сходство начальных, средних и конечных участков определения сопротивления судна при движении через торос.

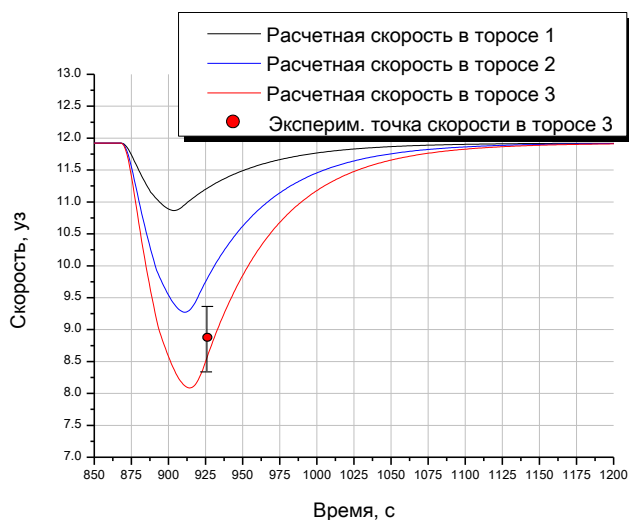


Рисунок 2 – Графики изменения скорости ледокола «Лидер» в торосах

3,5 уз (минимальная скорость – 8,5 уз), что на 6 % меньше, чем расчетное.

Сравнительный анализ результатов расчетов был проведен и по данным, полученным в 2005 году при проведении модельных испытаний ледокола проекта 21900 «Москва», которые также показали приемлемый результат использования разработанного метода нестационарного движения судна при работе набегам с погрешностью не более 20%, что для задач исследований ледотехники считается нормой.

Далее в работе представлено применение предложенного метода, позволяющего определить общее количество набегов, необходимое судну для преодоления торосистого образования, а также затрачиваемого при этом времени, в зависимости от ширины торосистого образования – рисунок 3.

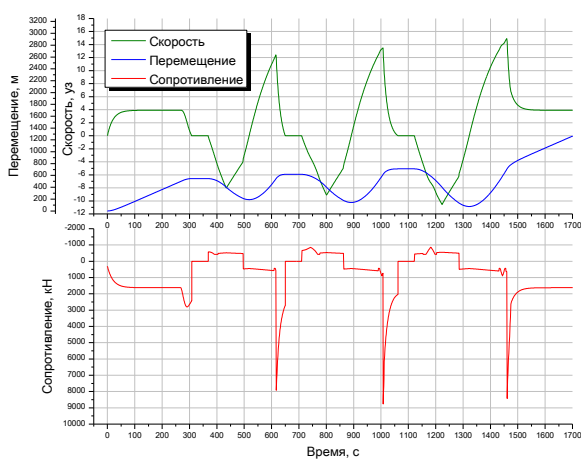


Рисунок 3 – График изменения переменных параметров при работе судна набегам

Далее в работе представлены результаты математического моделирования циркуляций судна в ровном льду и их сравнение с экспериментальными данными.

Для этих целей был разработана схема математического моделирования в среде *Simulink*. В схеме математического моделирования движения судна содержится блок

На рисунке 2 представлен график падения скорости ледокола «Лидер» и точка максимального падения скорости, полученная при обработке видеоматериалов записи проведения модельного эксперимента. Падение скорости ледокола, полученное расчетным путем, при начальной скорости 12,0 уз, соответствующей установившейся скорости движения судна в ровном сплошном льду толщиной 2,0 м, составило 4,0 уз (минимальная скорость – 8,0 уз). Экспериментальные данные показывают падение скорости ледокола в

По графику видно, что ледокол преодолел торосистое образование треугольной формы длиной 175,0 м с глубиной киля 11,0 м с третьего раза, при этом максимальное сопротивление в момент внедрения в торос со скоростью 13,5 узлов достигало 8,8 МН, время работы судна набегам составило около 1300 секунд. Результаты расчетов могут быть использованы при планировании маршрутов судов через торосистые поля, в системах управления ледовой обстановкой и принятии решений капитаном судна и др.

расчета ледовых и гидродинамических сил и моментов, действующих на корпус судна во время движения, блок расчета тяговых характеристик и блок имитации перекладки движительно – рулевого комплекса. На первом этапе выполнения программы рассматривается прямолинейное движение судна, при достижении судном установившейся скорости происходит перекладка средства управления судном на заданный угол.

Проверка метода расчета произведена по экспериментальным и натурным данным, полученным в ходе проведения испытаний ледоколов «Санкт-Петербург» проекта 21900, «Владивосток» проекта 21900М, многофункционального ледокольного судна (МФЛС) «Юрий Топчев», а также модельных испытаний в ледовом бассейне ледокола «Лидер» и других ледоколов.

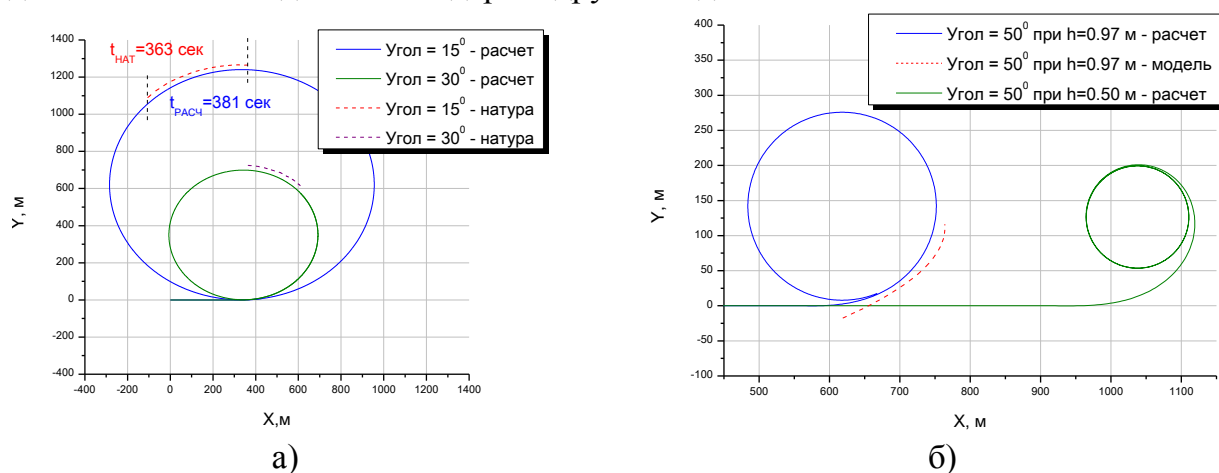


Рисунок 3 – Циркуляции судов во льду: а) Циркуляция ледокола «Владивосток» в ровном льду толщиной 1,6 м; б) Циркуляция МФЛС в ровном льду толщиной 0,5 м и 0,97 м.

На рисунке 3 представлены расчетные и экспериментальные циркуляции ледокола «Владивосток» и МФЛС, которые показывают совпадение результатов.

В процессе моделирования выявлено наличие заметного периода неустановившегося движения судна при выполнении им циркуляции в относительно тонких льдах. Данный факт демонстрирует траектория МФЛС при толщине льда 0,5 м. Обычно считается, что режим установившейся циркуляции возникает в ледовых условиях практически мгновенно. Данное свойство используется при проведении модельных испытаний на управляемость в ледовых бассейнах, в которых технически возможно выполнить лишь небольшой участок циркуляционной траектории. По полученному участку траектории с помощью методики МКОБ определяется установившийся радиус циркуляции. По-видимому, такие эксперименты могут содержать существенную погрешность, если они проводятся во льдах, толщина которых меньше половины предельной ледопроеходимости судна, что необходимо учитывать при проведении модельных испытаний.

При использовании планарного механизма проведены испытания модели ледокола «Лидер» на циркуляции с целью определения значений ледовых сил и момента на корпусе судна. На графиках (рисунок 4) видно, что полученные расчетом, установившиеся значения сил совпадают с модельными данными (погрешность не

превышает 20%). Время установления по расчетному методу составляет 100 секунд, что в переводе на модельное значение соответствует 15 секундам, однако, поперечная составляющая в эксперименте выходит на прогнозируемый уровень лишь через 30 секунд. Это может быть связано с процессами взаимодействия корпуса модели со льдом, не учтенными в расчетном методе. Для уточнения результатов необходимо проведение серий испытаний в ледовом бассейне с использованием других моделей судов.

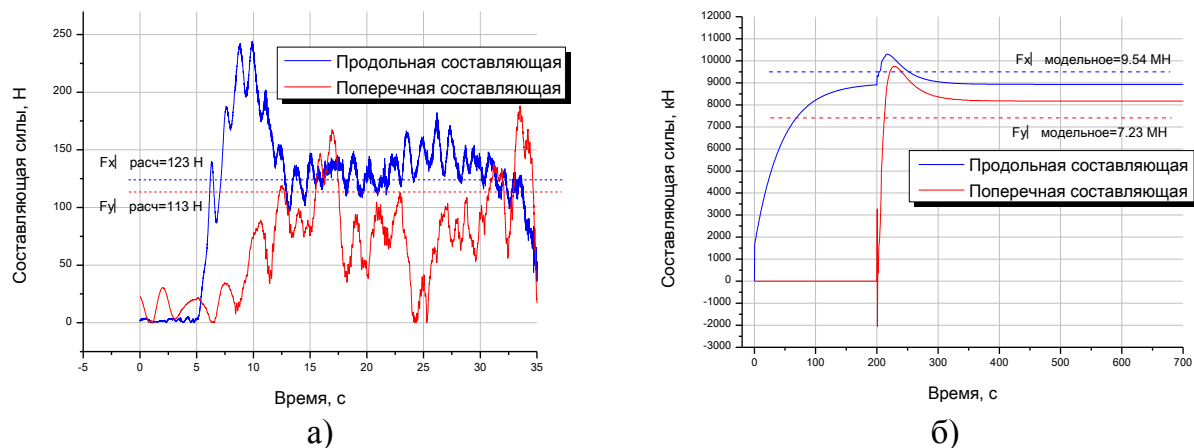


Рисунок 4 – Ледовые силы на циркуляции при угле перекладки рулей -  $30^\circ$  в ровном льду толщиной 2,0 м: а) модельный эксперимент; б) расчетный метод

С использованием разработанного метода расчета параметров судов при нестационарном движении во время выполнения циркуляций, реализованном в программном комплексе, было проведено исследование сложных траекторий движения ледоколов и ледокольных судов. Исследуемые траектории выполняются судами с целью создания приемлемых ледовых условий при поисково – разведочных работах и погрузочно - разгрузочных операциях вблизи морских инженерных сооружений и снижения уровня ледовой нагрузки на них.

Во втором параграфе представлены результаты численного моделирования тактических приемов и их сравнение с теоретическими оценками, описанными во второй главе. Для сравнения результатов вначале были определены скорость на прямом курсе и на циркуляции, а также радиус установившейся циркуляции для каждого исследуемого объекта. Установлено, что влияние нестационарности на движение в рассмотренных случаях не превышало 12-13 %.

Результаты исследования позволили получить оценку возможности выполнения конкретным объектом заданного тактического приема, применяемого в определенных ледовых условиях. Построены зависимости изменения времени выполнения маневра от мощности судна при различных толщинах льда. Установлено, что с увеличением толщины льда характер зависимости меняется от экспоненциального до линейного. Выявлено, что влияние особенностей формы корпуса сказывается в относительно толстых льдах.

В третьем параграфе приводится сравнение результатов натурных ледовых испытаний, проведенных в Карском море в 2016, по выполнению ледоколом «Владивосток» траектории маневра «змейка» с результатами численного моделирования.

В результате моделирования время выполнения двух полу-циркуляций (поворотов на 180°) и трех прямолинейных участков составило 587 с. Радиус установившейся циркуляции составил 138 м. В натуральных условиях при толщине льда 0,6-0,7 м данный маневр занял 534 с, а радиусы циркуляции составляли 129 м и 124 м. Разница составила около минуты, что вполне можно считать хорошим результатом для столь сложной траектории движения.



Рисунок 5 – Изменение скорости при выполнении маневра «змейка»

Выполнено сопоставление расчетной и натурной скоростей движения ледокола при выполнении маневра «змейка» – рисунок 5.

Падение скорости на каждом участке выполнения поворота практически совпадает при выполнении циркуляций в расчетном методе и натурном эксперименте.

Приведенные выше примеры убедительно демонстрируют применимость предложенного метода расчета нестационарных движений судов при маневрировании во льдах.

Использование этого метода позволяет рассчитывать различные варианты движения судна при выполнении мероприятий по управлению ледовой обстановкой в окрестности морских инженерных сооружений.

В четвертом параграфе рассматривается способ оценки эффективности выполнения тактических приемов исследуемыми судами. Одним из главных результатов моделирования, является получение времени выполнения тактического приема ледоколом в определенных ледовых условиях. На примере выполнения тактического приема «змейка» проведен дальнейший анализ.

На рисунке 6 представлен график зависимости времени выполнения маневра «змейка» от мощности ледокольных судов с учетом разработанных ограничений:

- снизу линией максимального времени выполнения исследуемого приема на чистой воде;
- слева сверху линией ограничения предельной ледопроеходимости судов в зависимости от их мощности;
- горизонтальными линиями нанесены скорости дрейфа льда, показывающие необходимое время выполнения маневра.

Подобные закономерности изменения времени выполнения маневра наблюдаются и при других тактических приемах.

При дрейфе льда толщиной 1,2 м и скоростью до 0,37 м/с достаточно судна мощностью от 8 МВт. Наиболее оптимальным с точки зрения экономических затрат и маневренных свойств будет выбор судна, имеющего мощность от 13 до 16 МВт. Однако если толщина льда увеличиться, то для работы потребуется судно мощностью от 28 МВт или изменение тактики движения ледокола.



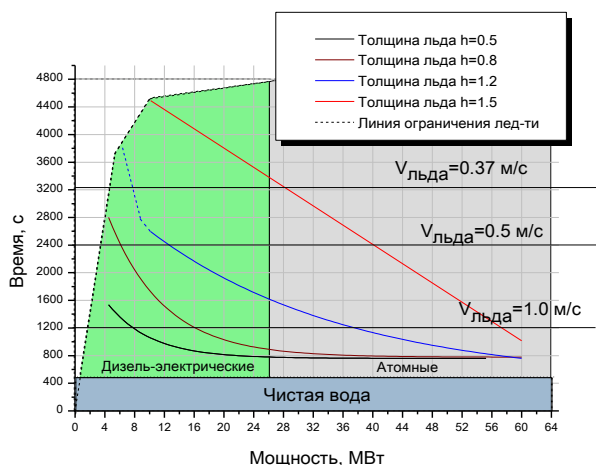


Рисунок 6 – Время выполнения маневра с учетом ограничений

отношение скорости судна на циркуляции к его скорости при прямолинейном движении, критерий оценки выполнения полной циркуляции – отношение скорости на циркуляции к массовому расходу топлива за полный круг, критерий оценки быстроты разрушения заданной области – отношение разрушаемой площади ледового поля к затрачиваемому времени, критерий энергетических затрат на разрушение заданной области – отношение разрушаемой площади ледового поля к массовому расходу топлива, необходимому для этого.

Результаты применения разработанного способа оценки эффективности показывают, что суда мощностью 16 и 18 МВт наиболее предпочтительны для обеспечения безопасности и обслуживания морских инженерных сооружений в ледовых условиях от 0,8 – 1,2 м. Всего проанализировано 7 существующих дизель-электрических ледоколов, которые применяются для обслуживания платформ и терминалов.

**В четвертой главе** разработаны алгоритмы оценки результатов деятельности ледоколов вблизи буровых платформ, применяемой для снижения уровня ледовой нагрузки на них.

Предложенные оценки построены на основе утверждений о том, что, величина глобальной ледовой нагрузки во многом определяется шириной сооружения. Если произвести разделение всей конструкции на более простые элементы: прямоугольник и треугольник в плане, то сумма ледовых нагрузок каждому из этих элементов будет соответствовать ледовой нагрузке всего сооружения. Данные утверждения позволяют использовать методики расчета глобальной ледовой нагрузки на сооружения, рекомендованные различными нормативными документами.

В первом параграфе рассматривается алгоритм оценки снижения уровня глобальной ледовой нагрузки на сооружения с наклонной передней гранью от действия торосистых образований. При оценке предполагалось, что воздействие ледокола на торос сводится к разрушению консолидированного слоя и трансформации формы киля тороса из-за процессов расползания ледяной массы. Для учета процессов расползания вводится коэффициент разрушаемости –  $k$ , величина которого оценена по результатам наблюдения в ледовом бассейне.

Эффективность применения ледокольного флота для защиты инженерных сооружений требует многокритериальной оценки. В диссертационной работе предполагается, что частные критерии имеют одинаковую важность, поэтому для оценки эффективности применения конкретного судна используется мультипликативный критерий, образующийся путем перемножения частных критериев. К применяемым частным критериям относятся: критерий оценки скорости на циркуляции –

Алгоритм оценки снижения уровня глобальной ледовой нагрузки на сооружения от действия торосистых образований состоит из нескольких этапов:

- Определение глобальной ледовой нагрузки, действующей на сооружение при взаимодействии с торосистыми образованиями по методике, рекомендованной стандартом ISO 19906;
- Расчет ледовой нагрузки на инженерное сооружение с учетом одиночного воздействия ледокола на торосистое образование. При этом считается, что неразрушенный торос взаимодействует с сооружением на участке длиной  $D-B$ , где  $D$  – ширина сооружения,  $B$  – ширина ледокола. На участке длины сооружения, равном  $B$ , считается, что взаимодействие происходит только с трансформированным килем тороса;
- На третьем этапе производится определение максимального возможного количества проходов ледокола в торосе с учетом ширины сооружения;
- Далее определяется суммарно возможный уровень снижаемой нагрузки при полном разрушении торосистого образования ледоколом;
- На последнем этапе производится оценка эффективности после  $Z$  - проходов ледокола через торос перед сооружением, определяемая как отношение остаточной нагрузки после действий ледокола к первоначальной глобальной нагрузке, рассчитанной в п.1 представленного алгоритма.

Расчет показал, что уже при первом проходе в торосе общий уровень глобальной ледовой нагрузки, действующей на сооружение, снижается на 11 - 12 %, а при четвертом проходе достигает 46 - 52 %. Результаты, полученные в процессе проведения теоретического расчета, могут быть использованы для определения эффективности действия ледоколов при защите морских инженерных сооружений с наклонной передней гранью, например для «МЛСП Приразломная», от воздействия однолетних торосистых образований.

Во втором параграфе рассматривается алгоритм оценки снижения уровня глобальной ледовой нагрузки на сооружения с вертикальной передней гранью от действия ровного льда.

Для исследования была выбрана методика расчета ледовой нагрузки от воздействия ледяных полей на сооружения с вертикальной передней гранью, рекомендуемая СНиП 2.06.04-82. По этой методике рассчитывается ледовая нагрузка от ровного льда, действующая на участок сооружения до прохода ледокола.

Алгоритм оценки снижения уровня ледовой нагрузки при защите морского инженерного сооружения, имеющего вертикальную стенку, при воздействии ровного льда на него состоит из нескольких этапов:

- Определение глобальной ледовой нагрузки, действующей на сооружение с вертикальной стенкой, при взаимодействии с ровным льдом по методике, рекомендованной стандартом СНиП;
- Расчет ледовой нагрузки на инженерное сооружение с учетом продольного прохода ледокола в ровном льду, т.е. для расчета принимается ширина сооружения за вычетом ширины ледокола:  $D-B$ , где  $D$  – ширина сооружения,  $B$  – ширина ледокола;
- На участке длины сооружения, равном  $B$ , принято, что взаимодействие сооружения происходит только с уплотненными осколками льда. Для расчета

можно воспользоваться методиками по определению ледовой нагрузки от киля тороса. В частности, в исследовании была использована модель Меллора;

- На четвертом этапе определяется суммарно возможный уровень снижаемой нагрузки при одиночном проходе ледокола;
- На последнем этапе производится оценка эффективности после одиночного прохода ледокола перед сооружением в продольном направлении, определяемая как отношение остаточной нагрузки после действий ледокола к первоначальной глобальной нагрузке, рассчитанной в п.1 представленного алгоритма.

В заключительной части параграфа представлены результаты исследования снижения уровня ледовой нагрузки для сооружений с вертикальной гранью в условиях ровного льда. Данное исследование подтверждено модельными испытаниями.

На рисунке 7 изображена временная диаграмма изменения продольной составляющей ледовой нагрузки в ходе проведения модельного эксперимента по управлению ледовой обстановкой. Синим пунктиром, указан уровень продольной составляющей ледовой нагрузки при взаимодействии сооружения с ровным льдом, красным – осредненные значения продольной составляющей ледовой нагрузки при использовании ледокола, зеленым – уровень продольной составляющей ледовой нагрузки при использовании ледокола, принимаемый для дальнейших расчетов.

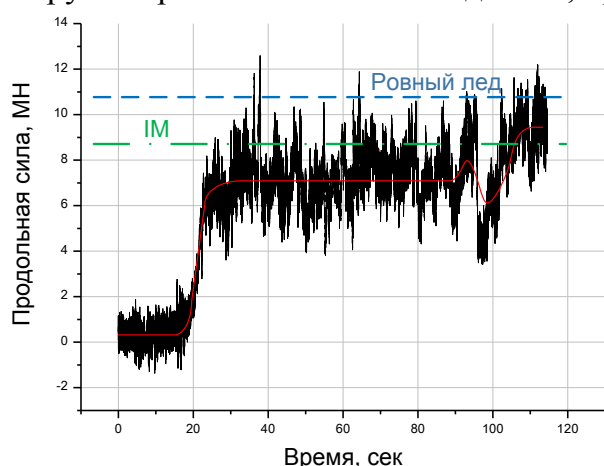


Рисунок 7 – Изменение ледовой нагрузки в эксперименте

Результат модельных испытаний по определению снижения ледовой нагрузки составил около 20 % при единичном проходе модели ледокола.

Теоретические оценки эффективности снижения уровня глобальной ледовой нагрузки на сооружения при операциях УЛО подтвердились результатами модельных испытаний. Расхождения в оценках составили примерно 2%.

**Пятая глава** посвящена разработке программного комплекса по исследованию поведения объектов морской техники во льду. Программный комплекс состоит из двух программ для ЭВМ: «Программа расчета динамики движения морских подвижных объектов во льду» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017618910) и «Программа расчета ледовой нагрузки действующей на морские инженерные сооружения при операциях управления ледовой обстановкой» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017618925).

В первом параграфе представлено общее описание разрабатываемого программного обеспечения для решения задач исследования поведения объектов морской техники во льду. Представлена общая схема программного комплекса.

Программное обеспечение, построенное по модульному принципу, позволяет решать как отдельные более простые задачи, так и более сложные задачи путем перехода от одного модуля к другому, получая в качестве входных данных следующего блока – результат предыдущего.

Исходными данными для работы программы являются теоретический чертеж исследуемого судна, основные параметры и тяговая характеристика движительно-рулевого комплекса, геометрические параметры формы морских инженерных сооружений и физико-механические свойства льда. Порядка 30-ти параметров и 3-х уравнений характеристических углов формы корпуса и уравнения ватерлинии необходимо, чтобы математически описать судно. Для математического описания морского инженерного сооружения требуется около 10-ти параметров.

В программном комплексе реализованы разработанные методы расчета параметров судов при нестационарном движении в ледовых условиях и алгоритмы оценки снижения уровня ледовой нагрузки на сооружения, что позволило провести многократное и оперативное численное моделирование. Кроме того, реализованы общеизвестные методы расчета ледовой ходкости судов, а также методы расчета глобальной ледовой нагрузки на сооружения разной формы в различных ледовых условиях.

Во втором параграфе представлены примеры решения задач исследования ледотехники с использованием программного комплекса: исследование сопротивления танкера в ровном льду по различным методам расчета, определение ледопроеходимости судна снабжения, исследование инерционных характеристик нескольких типов судов в ровном льду.

Таким образом, используя разработанный программный комплекс по исследованию поведения объектов морской техники во льду, позволило получить целый ряд новых научных знаний.

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработан метод расчета параметров судна при нестационарном движении во время работы набегами, учитывающий динамику процесса и позволяющий прогнозировать время преодоления торосистых образований, а также определять количество необходимых набегов. Разработанный метод подтвержден экспериментальными данными.
2. Разработан метод расчета параметров судна при нестационарном движении во время маневрирования в ровном сплошном льду, позволяющий прогнозировать время выполнения тактических приемов и траекторию движения судна, рассчитывать радиус циркуляции судна, угловую скорость, угол дрейфа и другие параметры в заданных ледовых условиях. По сравнению с экспериментальными данными средняя оценка в расхождениях не превышает 20%.
3. Разработаны формулы для оценки времени выполнения тактических приемов при стационарном движении, которые могут быть применены на этапе планирования операций управления ледовой обстановкой. Расчеты по этим формулам позволяют оценить необходимость учета нестационарности

движения судна при выполнении маневров. Выявлено, что учет влияния нестационарности при определении времени выполнения маневра позволяет избежать ошибки в 12-13%.

4. Разработан алгоритм оценки снижения уровня глобальной ледовой нагрузки на сооружения с наклонной гранью от действия торосистых образований при использовании ледоколов. Этот алгоритм позволяет определить эффективность действия ледоколов при защите морских инженерных сооружений от воздействия однолетних торосов.
5. Разработан алгоритм оценки снижения уровня глобальной ледовой нагрузки на сооружения с вертикальной гранью от действия ровного льда при использовании ледоколов. Этот алгоритм позволяет определить эффективность действия ледоколов при защите таких сооружений. Результаты расчетов по разработанному алгоритму подтверждены данными модельных испытаний.
6. Разработан способ оценки эффективности выполнения тактических приемов судами, основанный на анализе времени выполнения этих приемов с учетом возможности работы в определенных ледовых условиях.
7. Разработан программный комплекс по исследованию поведения объектов морской техники во льду, позволяющий проводить расчеты ледовой ходкости, маневренности и сложных траекторий движения судов в различных ледовых условиях, а также оценивать снижение глобальной ледовой нагрузки на разные типы морских сооружений.

#### СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

*В журналах, рекомендованных перечнем ВАК РФ:*

1. **Костылев А.И.** Оценка эффективности применения ледоколов при защите морского инженерного сооружения от действия торосистых образований. // Труды Крыловского государственного научного центра, вып. 88 (372), 2015. С. 217-222.
2. **Костылев А.И.** Математическое описание схем движения ледокольных судов около платформ и терминалов. // Труды Крыловского государственного научного центра, вып. 91 (375), 2016. С. 107-118.
3. **Костылев А.И.** Сравнительный анализ теоретической оценки эффективности ледового менеджмента с исследованиями в ледовом опытовом бассейне. // Труды Крыловского государственного научного центра, вып. 92 (376), 2016. С. 119-128.
4. **Костылев А.И., Сазонов К.Е.** Динамические характеристики ледокола «Владивосток» по данным натурного эксперимента. // Труды Крыловского государственного научного центра, вып. 93(377), 2016. С. 57-74.
5. **Костылев А.И., Сазонов К.Е.** Мировой опыт изучения методов управления ледовой обстановкой. // Арктика: экология и экономика, №3 (23), 2016. С. 86-97.

6. **Костылев А.И., Сазонов К.Е.** Метод расчета движения судов по криволинейной траектории в сплошных льдах. // Труды Крыловского государственного научного центра, вып. 95(379), 2017.

*Свидетельства на программу для ЭВМ:*

1. **Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ №2017618910, Российская Федерация.** Программа расчета динамики движения морских подвижных объектов во льду/**Костылев А.И.**; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «Крыловский государственный научный центр» (RU) – №2017616129/69; заявлено 27.06.2017 г.; опубликовано 11.08.2017 г.

2. **Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ №2017618925, Российская Федерация.** Программа расчета ледовой нагрузки действующей на морские инженерные сооружения при операциях управления ледовой обстановкой /**Костылев А.И.**; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «Крыловский государственный научный центр» (RU) – №2017616130/69; заявлено 27.06.2017 г.; опубликовано 11.08.2017 г.

*Публикации в других изданиях:*

1. **Костылев А.И.** Обзор современного состояния технологии управления ледовой обстановкой. // Сборник докладов XLV Крыловские чтения, 2013. С. 121-123.

2. **Костылев А.И.** Исследование тактических приемов разрушения льда ледокольными судами и способы их эффективности. // Тезисы докладов Всероссийской конференции «Полярная механика», СПб, ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2014. С. 37-38.

3. **Костылев А.И., Сазонов К.Е.** Метод расчета сопротивления судна при работе набегами. // Судостроение, № 5 (822), 2015. С. 24-27.

4. **Костылев А.И.** Методы и алгоритмы эффективного управления ледовой обстановкой. // Полярная механика: материалы третьей международной конференции, 2016. С. 104-114.

5. **Костылев А.И., Сазонов К.Е., Тимофеев О.Я., Егиазаров Г.Е., Соловьев А.С., Егоров Д.Н., Штрамбрант В.И.** Ледовые натурные испытания ледокола «Владивосток». // Судостроение, № 6 (829), 2016. С. 9-12.

6. **Костылев А.И.** Математический аппарат для выбора судна из числа имеющихся для обслуживания морских инженерных сооружений // Сборник тезисов докладов научно – технической конференции «Морские нефтегазовые сооружения – текущее состояние и перспективы развития», СПбГМТУ, 2017, с.51-53.

7. **Костылев А.И.** Исследование нестационарного движения судна в ледовых условиях. // Тезисы докладов Четвертой Всероссийской конференции с международным участием «Полярная механика», ФГБУ «ААНИИ», 2017, с.38-39.