

На правах рукописи



ДОБРОДЕЕВ Алексей Алексеевич

Разработка метода расчета ледового сопротивления судна при движении в крупнобитых льдах и обломках ледяных полей и его применение для оценки различных способов проводки крупнотоннажных судов

специальность 05.08.01 – Теория корабля и строительная механика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2016

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: **Андрюшин Александр Владиславович**, д.т.н.,
заведующий лабораторией пропульсивных
комплексов судов АО «Центральный научно-
исследовательский и проектно-конструкторский
институт морского флота»
Лихоманов Владимир Алексеевич, к.т.н.,
заведующий отделом ледовых качеств судов –
заведующий лабораторией ФГБУ Арктический
и Антарктический научно-исследовательский
институт

Ведущая организация: **Акционерное общество «Центральное
конструкторское бюро «ОСК-Айсберг»**,
г. Санкт-Петербург

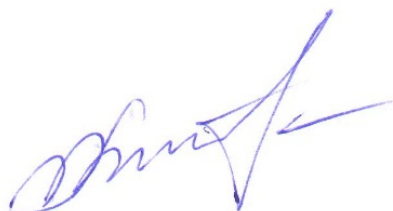
Защита состоится «10» марта 2017 года в 10 часов 00 минут
на заседании диссертационного совета Д 411.004.01 при Федеральном
государственном унитарном предприятии «Крыловский государственный
научный центр», по адресу: г. Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44.

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 «23» декабря 2016 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



Вишневский Л.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В последнее время освоение нефтегазовых месторождений на шельфе арктических морей, а также на прибрежных территориях, получило большое распространение. Отдаленность регионов, где происходит добыча углеводородов, и отсутствие там развитой инфраструктуры, придает вопросам транспортировки добытой продукции особую значимость. Одним из наиболее эффективных способов обеспечения круглогодичного вывоза углеводородов является создание морских транспортных систем (МТС), которые в своем составе используют арктические суда ледового плавания высокой грузоподъемности. При этом ширина крупнотоннажных судов существенно превышает ширину любого из существующих в настоящее время ледоколов. Опыт эксплуатации подобных судов в арктических морях весьма ограничен, что делает практически невозможным получение достоверных данных об особенностях использования крупнотоннажных судов, функционирующих в ледовых условиях. Данный вопрос требует немедленной проработки, т.к. в ближайшие годы в МТС произойдет внедрение строящихся на данный момент судов, предназначенных для эксплуатации в зоне освоения месторождений Ямала. Причем крупнотоннажные суда экономически выгодно использовать не только для вывоза добытых на арктическом шельфе и прилегающих к нему территорий углеводородов, но, и для транзитных рейсов через Северный Ледовитый океан.

Разработка новых тактических приемов и технических средств для обеспечения безопасной и эффективной проводки крупнотоннажных судов является весьма **актуальной** задачей. При проводке двумя ледоколами движение крупнотоннажного судна осуществляется в крупнобитых льдах. В связи с этим создание метода определения ледового сопротивления крупнобитого льда и обломков ледовых полей движению судна **актуально** как в научном, так и в практическом плане при создании морских транспортных систем, проектировании форм корпусов судов ледового плавания и выполнении расчетных исследований ледовых качеств крупнотоннажных судов и ледоколов. При этом анализ их эффективности реализуется с использованием предложенного автором метода расчета ледового сопротивления судна в крупнобитых льдах.

Целью настоящей работы является разработка метода расчета ледового сопротивления судна при движении в крупнобитых льдах и обломках ледяных полей и его применение для оценки различных способов проводки крупнотоннажных судов во льдах. Предложенный метод расчета ледового сопротивления позволяет оптимизировать формы корпусов транспортных судов и обеспечивает создание эффективных морских транспортных систем.

Достижение поставленной цели исследования обусловило необходимость постановки и решения следующих задач:

- Анализ предыдущих работ по исследованию ледовой ходкости судов и способам их проводки в сплошных льдах;
- Разработка метода расчета ледового сопротивления судна при движении в крупнобитых льдах и обломках ледяных полей, и оценка эффективности проводки крупнотоннажного судна двумя ледоколами;
- Верификация метода определения ледового сопротивления судна при движении в крупнобитых льдах и обломках ледяных полей на основе экспериментальных исследований в ледовом бассейне;
- Создание метода расчета ледового сопротивления крупнотоннажного судна при движении по извилистому каналу для оценки предложенного способа проводки одним ледоколом и создание математической модели прокладки ледоколом данного извилистого канала;
- Разработка метода расчета ледового сопротивления многокорпусного ледокола как нового инновационного технического средства, предназначенного для прокладки широких каналов во льдах;
- Разработка технических решений по созданию самоходных буксируемой и толкаемой систем, предназначенных для прокладки широкого канала в ледовых условиях;
- Оценка эффективности прокладки широкого канала во льдах, включающего в себя исследования объемов выбросов углекислого газа при использовании различных типов проводки крупнотоннажных судов.

Методы исследования. В диссертации использованы аналитические методы расчета ледового сопротивления судов, методы гидродинамики, численные методы вычислительной математики. Сопоставление и обобщение результатов исследований производились с привлечением данных литературных источников, модельных и натуральных экспериментов.

Научная новизна исследования состоит в разработке:

1. Метода расчета ледового сопротивления судна при движении в крупнобитых льдах и обломках ледяных полей;
2. Математической модели прокладки ледоколом извилистого канала;
3. Метода расчета ледового сопротивления при движении крупнотоннажного судна по извилистому каналу;
4. Экспериментально-теоретических методов оценки возможности создания широкого канала во льдах для проводки крупнотоннажных судов;
5. Метода расчета ледового сопротивления многокорпусного ледокола в сплошных льдах;
6. Технические решений – буксируемой и толкаемой систем для создания широкого канала во льдах.

Достоверность научных положений и выводов подтверждается корректностью математических выкладок при разработке метода расчета ледового сопротивления в крупнобитом льду, обоснованностью используемых допущений, результатами экспериментальной проверки разработанных методов в ледовом опытовом бассейне.

Практическая значимость работы в части создания метода расчета ледового сопротивления в крупнобитых льдах и обломках ледяных полей заключается в возможности методического обеспечения создания современных морских транспортных систем и инновационных способов проводки крупнотоннажных судов во льдах, а также оптимизации форм корпусов судов на ранней стадии проектирования.

Метод расчёта ледового сопротивления многокорпусного ледокола позволяет уже на ранней стадии проектирования достаточно объективно определять его главные размерения, форму обводов, расстояние между корпусами, что дает возможность оптимизировать форму корпуса и повысить качество проектирования инновационного ледокола за счет снижения его потребной мощности и уменьшения ледового сопротивления.

Предложенные технические решения, буксируемая (патент №2508224) и толкаемая (патент №2549738) ледокольные приставки увеличивают ширины ледовых каналов для обеспечения безопасной проводки крупнотоннажных судов во льдах. Они позволяют снизить затраты мощности ледокола при движении во льдах и прокладке им широкого ледового канала, что обеспечивает эффективную, безопасную и дешевую проводку крупнотоннажного судна преимущественно на внутренних водных путях и при каботажном плавании.

Реализация результатов работы. Результаты работы применяются различными подразделениями ФГУП «Крыловский государственный научный центр» при выполнении контрактных работ, как для отечественных, так и для зарубежных заказчиков.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации были изложены и обсуждены на 18 конференциях, в числе которых 8 являются международными.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 26 научно-технических работ, из них 7 без соавторов. В изданиях из перечня ВАК опубликовано 9 работ, из них 2 без соавторов. Патенты на изобретение: № 2508224 «Буксируемое устройство для разрушения ледового покрова при формировании судоходного канала во льдах», № 2549738 «Толкаемая буксиром-толкачом ледокольная приставка для создания судоходного канала во льдах», № 2585393 «Ледокольное судно».

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, содержит 114 страниц основного текста (включая 5 таблиц и 53 рисунка), 2 страницы оглавления, список литературы, включающий 77 наименований.

На защиту выносятся следующие основные результаты работы:

1. Метод расчета ледового сопротивления судна при движении в крупнобитых льдах и обломках ледяных полей;
2. Метод расчета ледового сопротивления при движении крупнотоннажного судна по извилистому каналу, предназначенный для оценки эффективности предложенного способа проводки одним ледоколом;
3. Новые технические решения по созданию толкаемой и буксируемой несамоходных систем, предназначенных для расширения ледового канала при проводке крупнотоннажных судов;
4. Метод расчета ледового сопротивления инновационного многокорпусного ледокола при движении в условиях сплошного ровного ледяного покрова.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована основная цель диссертационного исследования, перечислены решаемые в нем задачи.

Значительное внимание уделено обоснованию актуальности темы диссертации. Показана необходимость проведения исследований, направленных на совершенствование методов расчета ледового сопротивления при движении судна в крупнобитых льдах и обломках ледяных полей. Обоснована целесообразность разработки новых технических решений, обеспечивающих создание широкого канала во льдах для проводки крупнотоннажных судов, а также способов проводки крупнотоннажного судна.

В первой главе приводятся основные направления в изучении ледовой ходкости судов. Рассмотрены основные ледовые качества судов, такие как ходкость, управляемость и прочность, которые определяют возможность их эксплуатации во льдах. Выделены общие принципы оценки ледового сопротивления судна, основным из которых является модельный эксперимент.

Автором выполнен обзор работ, посвященных исследованиям методов расчета сопротивления сплошного ровного льда движению судна (Ю.А. Шиманский, Л.М. Ногид, М.К. Таршис, М.С. Яковлев, В.И. Каштелян, Ю.Н. Алексеев и К.Е. Сазонов, Б.П. Ионов, а также ряд зарубежных специалистов, среди которых Е. Энквист, Х. Доргелох, Д. Картер, Г. Линдквист) и битого льда (В.С. Назаров, А.Л. Костюков, Л.М. Ногид, А.В. Бронников, О.В. Дубровин, А.Я. Рывлин, Я.Я. Гаккель, В.В. Дремлюг). Отмечается, что разработка методов

расчета ледовой ходкости осложняется огромным многообразием факторов, влияющих на ледовое сопротивление.

Рассмотрены различные способы проводки крупнотоннажных судов во льдах, существующие на сегодняшний день. Выполнена их систематизация по количеству обеспечивающих проводку ледоколов, особенностям движения в условиях ледовых сжатий, использованию различных форм корпуса транспортного судна для улучшения его ледовых качеств, а также применению специальных технических средств, обеспечивающих создание широких ледовых каналов.

Анализ литературных источников, проведенный в первой главе, показал следующее:

- Надежность функционирования современной морской транспортной системы, включающей в себя крупнотоннажные суда ледового плавания, и ее безопасность не могут быть обеспечены, т.к. традиционные технические средства и методы проводки судов во льдах ориентированы на транспортные суда, ширина которых меньше ширины ледоколов;

- По данным теоретических и экспериментальных исследований в ледовом бассейне эффективность различных способов проводки крупнотоннажных судов существенно зависит от ледовых условий и ледовых характеристик проводимого судна. Большая часть существующих методов может быть использована только в относительно легких ледовых условиях или на коротких дистанциях проводки. Наиболее надежным в настоящее время может считаться способ проводки крупнотоннажного судна двумя ледоколами, который позволяет проложить ледовый канал любой требуемой ширины;

- По мнению автора, необходимы новые инновационные решения, позволяющие создавать новые технические средства, которые способны прокладывать широкие каналы во льдах, и при этом не приводящие к увеличению ледового сопротивления;

- Отсутствие методов точного определения ледового сопротивления судна при движении в крупнобитых льдах и обломках ледяных полей, направляет автора на разработку методов оценки эффективности различных способов проводки крупнотоннажных судов во льдах.

Вторая глава посвящена разработке метода расчета ледового сопротивления при движении судна в крупнобитых льдах и обломках ледяных полей. Разработан метод расчета ледового сопротивления, основанный на решении дифференциального уравнения движения раздвигаемых корпусом льдин. Наличие процесса раздвигания крупнобитых льдин после образования магистральной трещины является особенностью физической картины взаимодействия корпуса судна с крупнобитым льдом и обломками полей (Рис. 1).

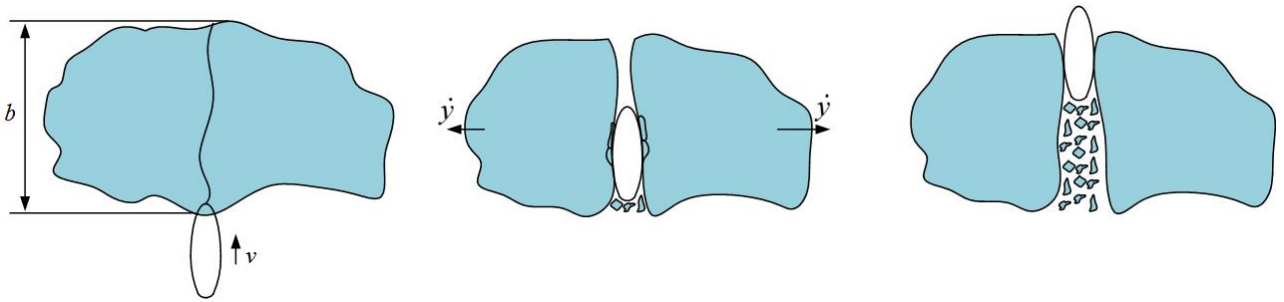


Рисунок 1 – Схема прохождения судном обломка крупнобитого льда:

- а) внедрение в льдину и образование магистральной трещины; б) раздвигание фрагмента крупнобитого льда с доламыванием бортом судна кромки образующегося канала; в) выход из обломка льдины

Фактически раздвигание крупнобитых льдин означает, что корпус судна движется по ледяному каналу переменной ширины, причем ширина этого канала меньше ширины судна. Изменение ширины канала находится из дифференциального уравнения движения фрагмента льда:

$$(1+k)M_l \ddot{y} = F - P_w - P_l, \quad (1)$$

где M_l – масса отколовшегося фрагмента льдины; k – коэффициент присоединенной массы льдины; F – сила, действующая на фрагмент со стороны корпуса судна; P_w – гидродинамическая сила сопротивления движению фрагмента; P_l – сила сопротивления движению фрагмента со стороны дрейфующего льда. При этом ось координат Oy в выражении направлена перпендикулярно направлению движения судна.

Дифференциальное уравнение движения льдины (1) является нелинейным, его решение можно получить численными методами. Задача Коши для дифференциального уравнения состоит в отыскании частного решения уравнения, удовлетворяющего начальным условиям $y = \dot{y} = 0$ при $t = 0$. Расчет заканчивается при выполнении условия $y \geq 0,5B$, где B – ширина судна. В результате расчета определяется момент времени t^* , в который выполняется указанное выше условие, и зависимость $y = y(t)$.

Апробация предложенного алгоритма выполнена применительно к современному транспортному судну активного ледового плавания, движущемуся в условиях крупнобитого льда под проводкой двух ледоколов, а также применительно к ледоколу, движущемуся в условиях обширных ледовых полей.

Функция зависимости ледового сопротивления от скорости хода является линейной и представлена полиномом первой степени, а от толщины льда и ширины ледяного канала полиномами 2-ой и 3-ьей степени, соответственно. В ходе решения задачи для выбранных автором вариантов крупнотоннажного судна и ледокола были получены аппроксимационные выражения функции

$R(\dot{x}, h, y)$, основанные на расчетных данных ледового сопротивления. Вычисление ледового сопротивления выполнялось применительно к движению судна в канале переменной ширины с помощью коэффициента η_2 ледорезности Ю.А. Шиманского.

Скорость движения судна при взаимодействии с обломками крупнобитого льда определяется путем решения следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} (1+k)D_{к.с.}\ddot{x} = T(x) - R_{lc}(\dot{x}, h, y) - R_w(\dot{x}) \\ M_I\ddot{y} = \eta_2(y)R_{lc}(y) - P_w - P_I \end{cases} \quad (2)$$

где $D_{к.с.}$ – масса корпуса судна, кг; $T(x)$ – тяга движительного комплекса судна, Н; R_{lc} – ледовое сопротивление судна, возникающее при раздвигании льда, Н; \dot{x} – скорость хода судна, м/с; h – толщина льда, м; y – ширина ледового канала, м; R_w – сопротивление судна на чистой воде, Н.

При выполнении расчетов варьировалась начальная скорость хода судна до встречи с рассматриваемым ледовым образованием. Полученные результаты представлены в виде графиков зависимости ширины канала, скорости хода и ледового сопротивления от времени для крупнотоннажного судна (Рис. 2).

Исследование динамики движения ледокола выполнено применительно к условиям обширных ледовых полей, размеры которых составляют от 100 до 500 метров (Рис. 3).

Анализ результатов расчетов по предложенной математической модели позволяет сказать, что разработан метод, позволяющий описать динамику движения различных типов судов в условиях крупнобитого льда и обширных ледовых полей. Анализ полученных данных показывает, что одним из важных параметров является характерный размер фрагментов ледового поля, который наравне с толщиной ледяного покрова существенно влияет на скорость движения.

Используя предложенный метод на стадии проектирования, можно оценить будущие эксплуатационные характеристики судна, рассчитать максимальную скорость его проводки для различных ледовых условий, и тем самым сделать более эффективной работу всей морской транспортной системы.

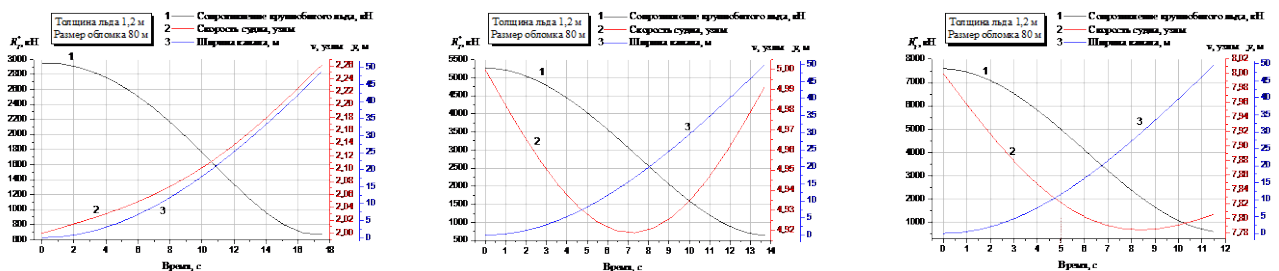


Рисунок 2 – Динамика движения крупнотоннажного судна в условиях крупнобитого льда при разных начальных скоростях хода

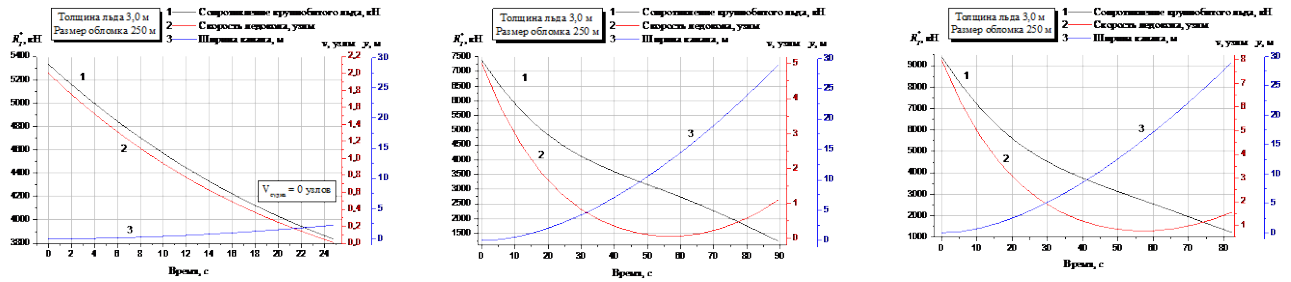


Рисунок 3 – Динамика движения ледокола в условиях обширных ледовых полей при разных начальных скоростях хода

В работе представлены результаты верификации расчетной модели с данными модельных испытаний в ледовом опытовом бассейне. По результатам испытаний выполнен анализ временной реализации ледового сопротивления судна (Рис. 4). Отмечается хорошее совпадение средних величин результатов проведенного эксперимента и расчетов ледового сопротивления.

Предложенный метод расчета ледового сопротивления дает возможность оценить эффективность проводки крупнотоннажного судна двумя ледоколами, который является одним из немногих тактических приемов, гарантирующих относительно безопасную и эффективную проводку судна в ледовых условиях. При этом способе проводки становится возможным получить ледяной канал любой заданной ширины. Движение проводимого судна при этом происходит в основном в крупнобитых льдах, которые образуются при сколе в канал, проложенный первым ледоколом, части ледяного покрова вторым ледоколом. Верификация метода расчета данными модельного эксперимента подтверждает достоверность результатов, получаемых в ходе его использования. Таким образом, он может получить широкое практическое применение и быть использован для оптимизации способа проводки двумя ледоколами, а также форм корпусов современных транспортных судов и ледоколов.

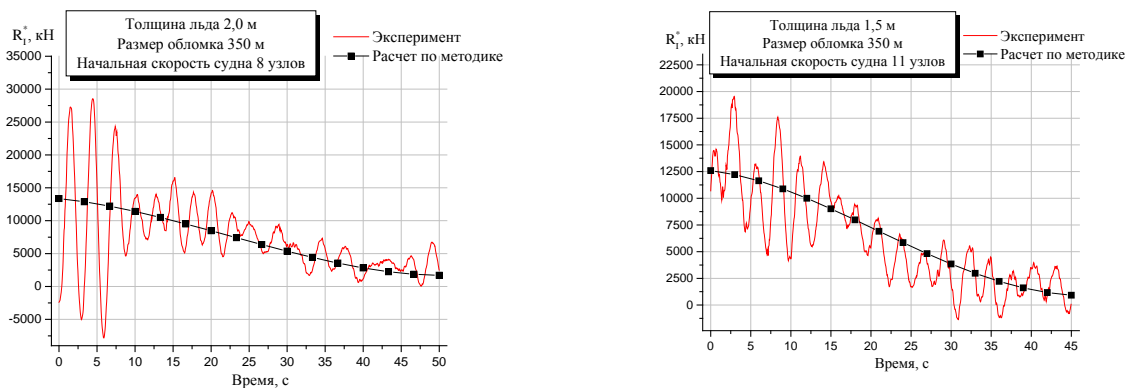


Рисунок 4 – Сравнение полученных расчетных и экспериментальных данных по ледовому сопротивлению судна в условиях обширных ледовых полей

В третьей главе предложен метод расчета ледового сопротивления крупнотоннажного судна при движении под проводкой одного ледокола, использующего новый тактический прием, который основан на прокладке извилистого канала.

Прием заключается в том, что ледокол движется по криволинейной траектории с определенным радиусом циркуляции перед проводимым

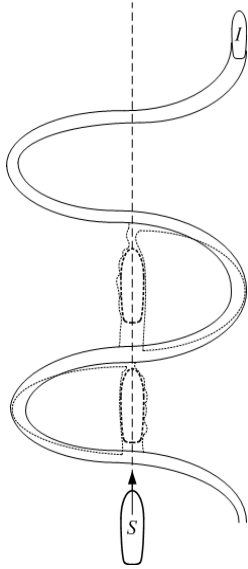


Рисунок 5 –
Схема
проводки
одним

крупнотоннажным судном (Рис. 5). Таким образом, при разрушении льда следующее за ледоколом судно испытывает меньшие нагрузки, чем в случае движения после прохода ледокола по прямолинейной траектории, когда своими бортами судну приходится смятием доламывать кромки образовавшегося канала. При использовании предлагаемого способа проводки крупнотоннажное судно частично преодолевает обломки мелкобитого льда при проходе непосредственно через проложенный канал, и также попеременно одним бортом скалывает обломки крупнобитого льда в канал, оставшийся за ледоколом, а другим бортом разрушает лед изгибом, что лучше сказывается на снижении ледового сопротивления, чем разрушение льда смятием.

Движение ледокола при создании извилистого канала во льдах можно представить в виде синусоиды. Для описания траектории движения ледокола предложено следующее математическое уравнение:

$$y_n = A \cdot \sin(x/a), \quad (3)$$

где A – амплитуда траектории, м; x – положение ледокола относительно оси Ox , м; a – коэффициент, характеризующий растяжение траектории по оси Ox , м.

Для обеспечения проводки крупнотоннажного судна необходимо выполнить следующие условия: $A > B_s/2$ и $a \geq L_s/\pi$, где B_s и L_s – ширина и длина крупнотоннажного судна соответственно.

При определении радиуса циркуляции ледокола в сплошных льдах, осуществляющего прокладку извилистого канала, используется следующая эмпирическая формула, представленная в работе К.Е. Сазонова «Ледовая управляемость судов»:

$$R_{lb} = \frac{D_w + k \cdot h_l^2}{2}, \quad (4)$$

где R_{lb} – радиус циркуляции ледокола в сплошных льдах, кб (кб – кабельтов, 1 кб= 185,2 м); D_w – диаметр циркуляции судна на чистой воде, кб; h_l – толщина льда, м; k – эмпирический коэффициент, равный 2,7.

С целью определения минимально возможного радиуса циркуляции ледокола, зависящего от характеристик проводимого крупнотоннажного судна, можно воспользоваться следующим выражением:

$$R_{\min} = \frac{a^2}{A} = \frac{L_s^2}{\pi^2 \cdot 0,6 \cdot B_s}, \quad (5)$$

где R_{\min} – минимальный радиус циркуляции ледокола, м.

Выполняя расчеты с использованием выражений (4) и (5) необходимо убедиться, что минимально возможный радиус циркуляции ледокола для обеспечения проводки выбранного крупнотоннажного судна не превышает его расчетного значения $R_{lb} \geq R_{\min}$. Тогда можно приравнять правые части данных уравнений и определить коэффициент a , зависящей от характеристик проводимого крупнотоннажного судна. Такой подход позволяет прокладывать оптимальный для эффективной проводки крупнотоннажного судна ледовый канал (Рис. 6).

Для определения ледового сопротивления судна при движении по извилистому каналу R_{Icurve} разработана, на основе метода, предложенного в Главе 2 диссертации, расчетная схема определения ледового сопротивления для случая взаимодействия корпуса с крупнобитым льдом, которая состоит в следующем: ледовое сопротивление представляется суммой двух составляющих, одна из которых зависит от скалывания обломка крупнобитого льда в канал, а другая – от классического разрушения льда корпусом судна. Таким образом, скорость движения судна определяется из решения следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} (1+k)D_{к.с.} \ddot{x} = T(x) - 0,5 \cdot R_{Ic}(\dot{x}, h, y) - 0,5 \cdot R_I(h, y) - R_w(\dot{x}) \\ M_I \ddot{y} = \eta_2(y) R_{Ic}(y) - P_w - P_I \end{cases} \quad (4)$$

где R_I – ледовое сопротивление судна в сплошном ровном ледяном покрове, Н.

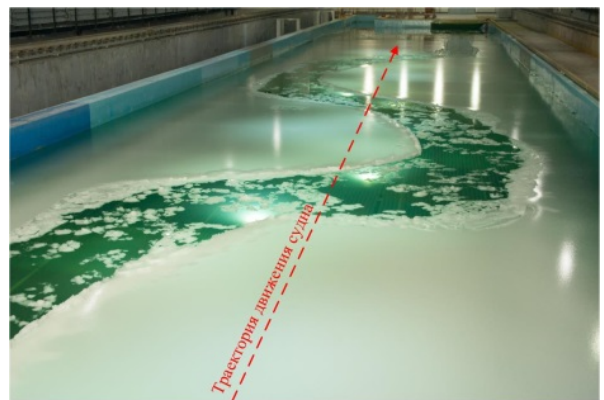
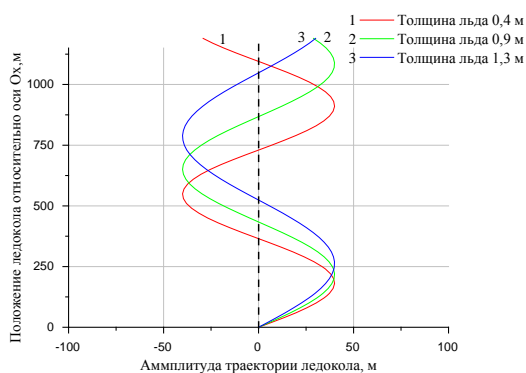


Рисунок 6 – Траектории движения ледокола при прокладке извилистого ледового канала во льдах разной толщины

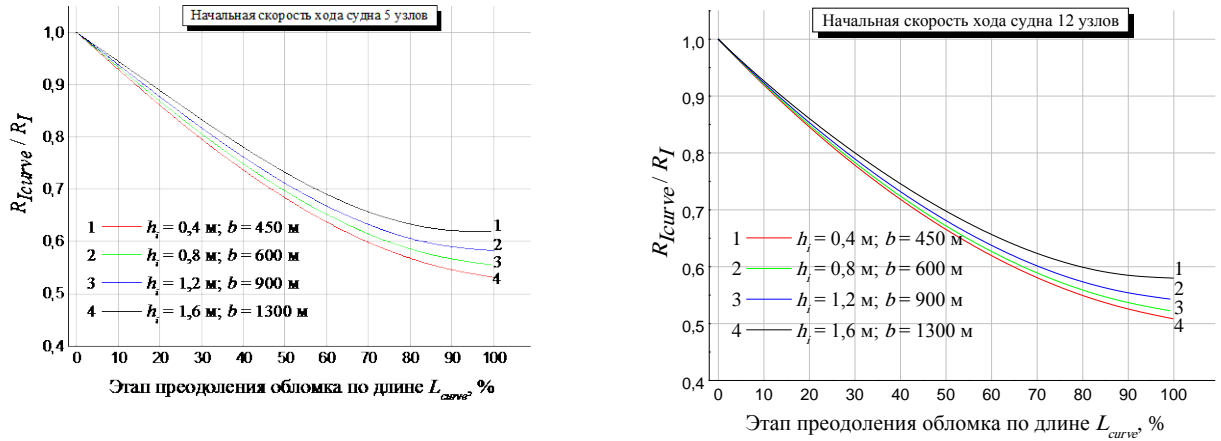


Рисунок 7 – Изменение ледового сопротивления судна при прохождении обломка ледового поля

Результаты расчетов, представленные на рисунке 7, позволяют определить снижение сопротивления судна при движении по извилистому каналу по сравнению с преодолением сплошного ледяного покрова, а также оценить влияние изменения геометрических характеристик обломков крупнобитого льда на ледовое сопротивление судна.

Разработанный метод расчета ледового сопротивления позволяет оценить эффективность предложенного способа проводки судна одним ледоколом. Движение крупнотоннажного судна по извилистому каналу способствует заметному снижению ледового сопротивления по сравнению с самостоятельным движением судна в сплошных льдах.

Важным фактором при обеспечении безопасности данного способа проводки становится выбор скорости движения ледокола и судна. Применять такую схему следует на небольших по протяженности участках движения судна, преимущественно в реках, покрывающихся льдом, в период, когда не наблюдается сильных ледовых сжатий, и толщина припая не превышает указанных величин.

С целью исследования вопроса экологической безопасности при использовании различных способов проводки судов во льдах, в работе выполнены расчеты выбросов CO_2 для способа прокладки широкого канала двумя ледоколами, движения судна по извилистому каналу и в сплошном ровном льду без проводки.

Согласно руководству по методам расчета эксплуатационного коэффициента энергетической эффективности судна ЕЕОІ выбросы CO_2 можно оценить, используя следующее выражение:

$$EEDI = 3,1144 \cdot \frac{190 \cdot f_j \cdot P_{ME} + 215 \cdot P_{AE}}{Capacity \cdot v_{ref}}, \quad (5)$$

где P_{ME} – мощность главного двигателя; $Capacity$ – это дедвейт судна; P_{AE} – мощность вспомогательных двигателей; v_{ref} – скорость судна; f_j и f_i – коэффициенты коррекции на мощность.

Для удобства анализа и, учитывая ограничения по использованию метода расчета ЕЕОІ, принято, что ледовый класс каждого из рассмотренных вариантов судов с набором различных основных характеристик соответствует категории Arc 5, а ледоколы, выполняющие проводку, являются атомными. Потребная мощность судов, требуемая в расчетах ЕЕОІ, определялась с учетом данных, полученных с использованием предложенного в работе метода расчета ледового сопротивления.

Выполненные расчеты (рис. 8) показывают, что на ранней стадии проектирования целесообразно воспользоваться одним из двух возможных способов снижения индекса энергетической эффективности судна при движении во льдах. Во-первых, количественно уменьшить расход топлива всеми судовыми потребителями (числитель выражения (5) для расчета ЕЕОІ), выбрав наиболее экономичный с точки зрения затрачиваемой мощности и соответственно выбросов CO_2 метод проводки. Во-вторых, увеличить производимую судном работу (знаменатель выражения (5) для расчета ЕЕОІ), за счет прироста скорости движения от выбора того или иного способа

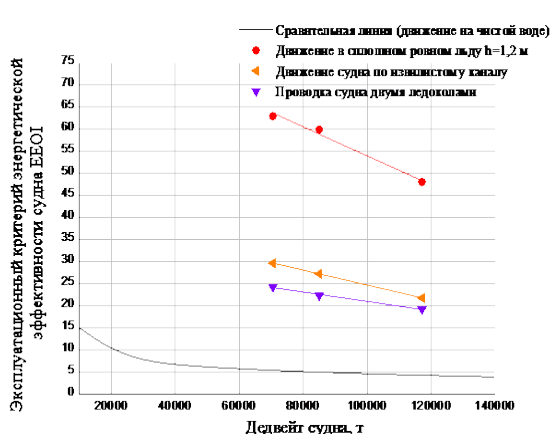


Рисунок 8 – Зависимость ЕЕОІ от дедвейта судна при различных тактиках движения во льдах

проводки. Используя результаты расчетов, появляется возможность подобрать оптимальный способ проводки крупнотоннажного судна, который оказывает наименьшее вредное воздействие на окружающую среду.

В четвертой главе подробно рассмотрено инновационное техническое решение для создания широких ледовых каналов – многокорпусный ледокол, разработанный при частичном участии автора (патент № 2585393). Для нового ледокола предложено такое взаимное расположение корпусов, которое

позволяет не только создавать широкий канал, но и уменьшить ледовое сопротивление, за счет чего происходит снижение потребляемой им мощности.

Для математического описания динамики движения ледокола автором разработан метод расчета ледового сопротивления. Она сводится к определению ледового сопротивления для каждого из корпусов в отдельности. Согласно методу скорость движения судна определяется из решения следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} (1+k)D_{к.с.}\ddot{x} = T(x) - R_1(\dot{x}, h) - R_{IC_{2,3}}(\dot{x}, h, y) - R_{2,3}(\dot{x}, h) - P_w(\dot{x}^2) \\ M_I\ddot{y} = \eta_2(y)R_{lc}(y) - P_w - P_I \end{cases} \quad (6)$$

где R_1 – ледовое сопротивление головного корпуса в сплошном ровном льду; $R_{IC_{2,3}}$ – суммарное ледовое сопротивление боковых корпусов ледокола, зависящее от раздвигания обломков крупнобитого льда в канал; $R_{2,3}$ – суммарное ледовое сопротивление боковых корпусов ледокола, зависящее от разрушения сплошного ровного ледяного покрова.

При выполнении расчетов для каждого отдельного корпуса аппроксимируются расчетные данные по ледовому сопротивлению. Для головного корпуса и внешних бортов боковых корпусов строится зависимость от скорости движения и толщины ледяного покрова, в то время как для внутренних бортов боковых корпусов аппроксимационное выражение учитывает еще и скалывание обломков льда, образующихся в пространстве между головным и боковыми корпусами, к центру ледового канала.

Расчеты позволяют определить время, которое проходит от момента внедрения ледокола с заданной начальной скоростью в ледовое поле до момента установления той постоянной скорости хода, которая обеспечивает его непрерывное движение при тяге на винтах, соответствующей максимальному уровню мощности (рис. 9).

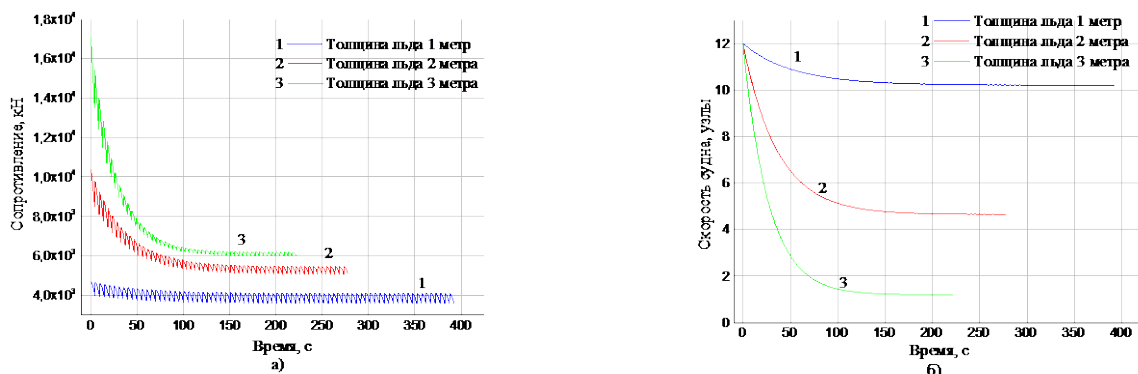


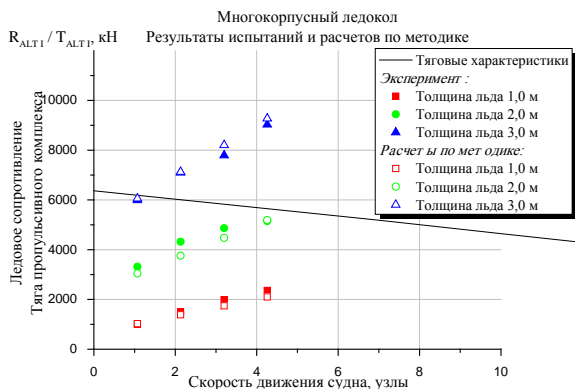
Рисунок 9 – Динамика движения многокорпусного ледокола в ровном ледяном покрове: а) изменение ледового сопротивления многокорпусного ледокола во времени; б) изменение скорости хода судна во времени

Верификация расчетного метода определения ледового сопротивления многокорпусного ледокола выполнена путем проведения модельного эксперимента опытного образца. Отмечается хорошее согласование расчетных и экспериментальных значений сопротивления (рис. 10), что подтверждает достоверность описания характера движения многокорпусного ледокола в ровном ледяном покрове в предложенном методе расчета.

Данный метод позволяет на ранних стадиях проектирования выполнить оптимизацию форм корпусов ледокола и расстояния между ними с целью получения наименьших значений ледового сопротивления. В результате чего данное техническое решение может найти широкое применение при обеспечении морских перевозок в Арктических морях за счет снижения мощности энергетической установки по сравнению с классическим ледоколом, способным создавать ледовый канал такой же ширины.

В работе предложены технические решения по созданию новых толкаемого и буксируемого устройств, которые позволяют существенно увеличить ширину канала, прокладываемого во льдах (рис. 11).

Разработанная толкаемая ледокольная приставка состоит из трех корпусов, имеющих наклонные форштевни и разваленные борта (рис. 11 а). Эти корпуса скомпонованы в виде одного головного и двух боковых, при этом все они жестко связаны между собой рамной конструкцией, которая снабжена устройством для плотного ее контактирования с буксиром-толкачом. Каждый из трех корпусов, на уровне действующей ватерлинии, имеет форму, которая близка к треугольной, и обрубленную плоскую корму. Такие обводы упрощают технологию производства корпусов, а также снижают их металлоемкость.



а)



б)

Рисунок 10 – Сравнение результатов расчетов ледового сопротивления многокорпусного ледокола и данных модельного эксперимента в ледовом бассейне (а) и фрагмент модельного эксперимента (б)

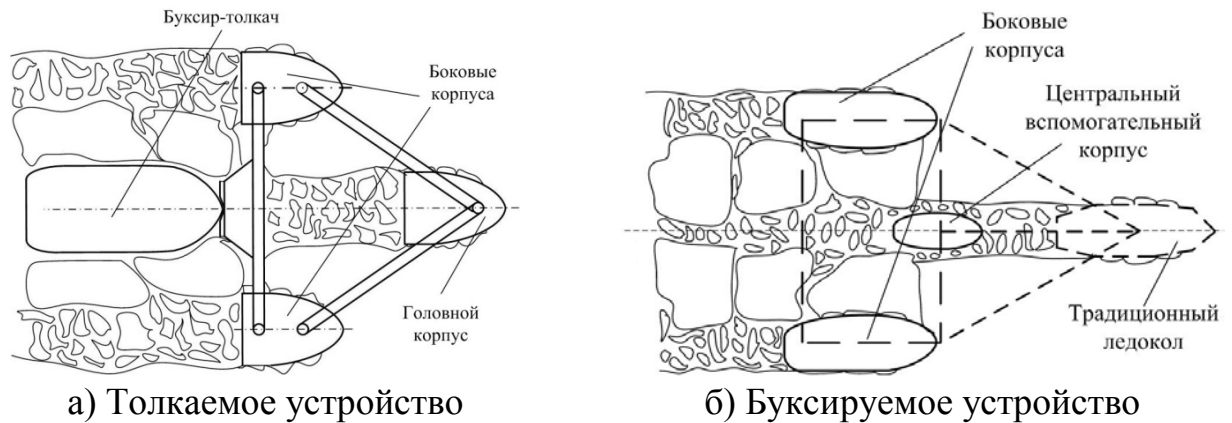


Рисунок 11 – Технические решения для создания широкого ледового канала

Положительный эффект от описанного расположения корпусов ледокольной приставки и буксира достигается за счет изменения характера разрушения ледяного покрова боковыми корпусами. Они будут разрушать лед, скалывая и направляя значительные его обломки в канал, прокладываемый головным корпусом. Это приводит к снижению ледового сопротивления состава «приставка-буксир» в целом.

Как результат, предлагаемая толкаемая ледокольная приставка для разрушения ледяного покрова обеспечивает создание широкого ледового канала, обеспечивающего безопасную проводку крупнотоннажных судов во льдах преимущественно на внутренних водных путях и при каботажном плавании, а также положительно влияет на снижение затрат мощности при движении во льдах и прокладке канала ледоколом.

Другой предлагаемой концепцией для создания широкого канала является буксируемое устройство (рис. 11 б). Буксируемое средство предполагается использовать в сочетании с традиционным ледоколом, в результате чего можно формировать достаточно широкий канал для движения в нем крупнотоннажных судов.

Корпус буксируемого устройства для разрушения ледяного покрова, как и у толкаемой приставки, состоит из трех корпусов. Такое расположение корпусов обеспечивает увеличение ширины прокладываемого судоходного канала во льдах не менее чем на 10 метров, по сравнению с шириной канала, проложенного однокорпусным ледоколом. Эффективность использования такой приставки обуславливается снижением ее ледового сопротивления по сравнению с ледоколом той же ширины.

С целью экспериментальной проверки работоспособности и эффективности предложенных технических решений для одного из вышеперечисленных изобретений – буксируемого устройства для разрушения ледяного покрова, изготовлена и испытана модель в ледовом бассейне (Рис. 12).

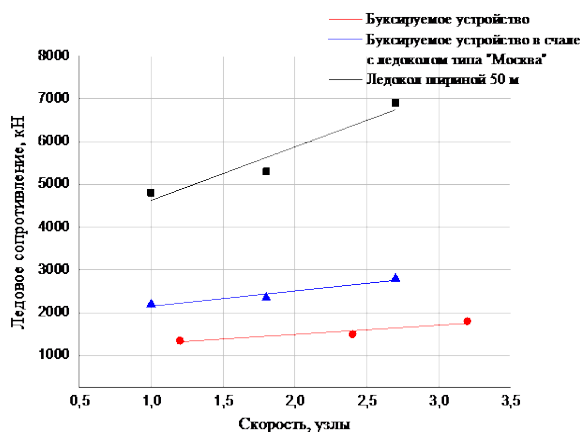


Рисунок 12 – Сравнение показателей ледового сопротивления во льду толщиной 1,5 м

могут обеспечить эффективность транспортной системы за счет малых энергетических затрат, по сравнению с традиционными методами выполнения проводки крупнотоннажных судов. Представленные результаты наглядно демонстрируют преимущества использования предложенных технических решений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации решена задача методического обеспечения создания современных морских транспортных систем, использующих в своем составе крупнотоннажные суда активного ледового плавания, и инновационных способов проводки крупнотоннажных судов во льдах. Решение этой задачи связано с обеспечением безопасности плавания судов во льдах.

Основные результаты диссертационной работы заключены в следующем:

1. Разработан метод расчета ледового сопротивления при движении судна в крупнобитых льдах и обломках ледяных полей, с помощью которого можно выполнить оценку предлагаемых и существующих способов проводки крупнотоннажных судов в сплошных льдах;

2. Разработан метод расчета ледового сопротивления при движении крупнотоннажного судна по извилистому каналу, позволяющий выполнить оценку эффективности предложенного способа проводки крупнотоннажного судна одним ледоколом. Создана математическая модель прокладки ледоколом извилистого канала;

3. Разработан метод оценки эффективности прокладки широкого канала во льдах.

Таким образом, предложенные новые перспективные средства для разрушения льда с целью создания широкого канала, обеспечивают безопасную проводку крупнотоннажных судов преимущественно на внутренних водных путях и при каботажном плавании. Толкаемая ледокольная приставка и буксируемое устройство положительно влияют на снижение затрат мощности при движении во льдах и способны создавать ледяной канал шириной более 50 метров. Эти средства

4. Разработан метод расчета ледового сопротивления многокорпусного ледокола в сплошных льдах, выполнено сравнение данных по расчетной схеме с результатами экспериментальных исследований;

5. Разработаны новые технические решения – несамоходные буксируемая и толкаемая системы для создания широкого канала в относительно легких ледовых условиях, экспериментально проверена их эффективность при работе во льдах. Новизна подтверждена патентами 2508224 и 2549738.

6. Выполнены расчеты энергоэффективности крупнотоннажного судна, позволяющие выбрать оптимальный способ проводки с точки зрения снижения выбросов парниковых газов.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

В журналах, рекомендованных перечнем ВАК РФ:

1. **Добродеев А.А.**, Натурные исследования разворота ледокола «Вайгач» методом «Звезда» // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, вып.63(347), 2011. С. 69-72.

2. **Сазонов К.Е. Добродеев А.А.**, Метод расчета ледового сопротивления судна при его движении в крупнобитых льдах и обломках ледяных полей // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, вып.63(347), 2011. С.73-80.

3. **Апполонов Е.М., Добродеев А.А., Клементьева Н.Ю., Сазонов К.Е., Тимофеев О.Я.**, Некоторые результаты экспериментальных исследований новых технических средств для создания широкого канала для безопасного прохода крупнотоннажных судов // Сибирский журнал чистой и прикладной математики, т.12, вып.4, 2012. С. 3-8

4. **Добродеев А.А., Сазонов К.Е.**, Механика движения судна в крупнобитых льдах и обломках ледяных полей // Сибирский журнал чистой и прикладной математики, т.12, вып.4, 2012. С.53-58.

5. **Дехтярук Ю.Д., Добродеев А.А., Сазонов К.Е.**, Некоторые вопросы создания морских транспортных систем для вывоза углеводородов из Арктики // Арктика: Экология и экономика, Выпуск №2(10), 2013. С. 84-91.

6. **Сазонов К.Е., Добродеев А.А.**, Исследование прочности льда на изгиб в северо-восточной части Каспийского моря // Проблемы Арктики и Антарктики, №3(101), 2014. С.62-68.

7. **Сазонов К.Е., Добродеев А.А.**, Средства прокладки судоходных каналов во льдах // Мир транспорта, №1(50), 2014. С.42-47.

8. **Добродеев А.А., Клементьева Н.Ю., Сазонов К.Е.**, Современные подходы к обеспечению навигации крупнотоннажных судов во льдах // Транспорт Российской Федерации, №4(59), 2015. С.29-32.

9. **Добродеев А.А.**, Объемы выбросов углекислого газа судами ледового класса при использовании различных типов их проводки во льдах. // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, вып.92(376), 2016. С 109-118.

Патенты:

1. **Пат.2508224 Российская Федерация, МПК В63В 35/12, 9/02 (2006.01)**. Буксируемое устройство для разрушения ледового покрова при формировании судоходного канала во льдах/**Добродеев А.А.**, Кильдеев Р.И., Клементьева Н.Ю., Сазонов К.Е., Тимофеев О.Я.; заявитель и патентообладатель Российская Федерация, от имени которой выступает Министерство промышленности и торговли Российской Федерации (Минпромторг России) (Ru). – №2012120875/11; заявлено 22.05.2012 г.; опубликовано 27.02.2014 г., Бюл. №6. – 7 с.

2. **Пат.2549738 Российская Федерация, МПК В63В 35/08 (2006.01), Е02В 15/02 (2006.01)**. Толкаемая буксиром-толкачом ледокольная приставка для создания судоходного канала во льдах/ Сазонов К.Е., **Добродеев А.А.**; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «Крыловский государственный научный центр» (ФГУП «Крыловский государственный научный центр») (Ru). – №2013150299/11; заявлено 13.11.2013 г.; опубликовано 27.04.2015 г., Бюл. №12. – 6 с.

3. **Пат.2585393 Российская Федерация, МПК В63В 35/08 (2006.01), В63В 1/10 (2006.01)**. Ледокольное судно/Сазонов К.Е, **Добродеев А.А.**, Клементьева Н.Ю.; заявитель и патентообладатель Российская Федерация, от имени которой выступает Министерство промышленности и торговли Российской Федерации (Минпромторг России) (Ru). – №2013150303/11; заявлено 13.11.2013 г.; опубликовано 27.05.2016 г., Бюл. №15. – 6 с.

Публикации в других изданиях:

1. **Добродеев А.А.**, Особенности танкерной проводки в ледовых условиях.// Сборник I-ой Межвузовской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов «Балтийский экватор», СПбГМТУ, 2010. С.186-189.

2. **Добродеев А.А.**, Оценка возможности проводки крупнотоннажных судов двумя ледоколами // Сборник материалов V студенческой научно-учебной конференции «Моделирование явлений в технических и гуманитарных науках», СПбГМТУ, 2010. 4 с.

3. **Добродеев А.А., Сазонов К.Е.**, Оценка возможности использования двух ледоколов для проводки крупнотоннажных судов // Мореходство и

морские науки, Избр. доклады III Сахалинской региональной НТК, 2011. С.109-113.

4. **Добродеев А.А.**, Влияние способа проводки крупнотоннажного судна во льдах на предъявляемые к нему требования // Доклады научно-технической конференции «XLIV Крыловские чтения» // ФГУП «ЦНИИ им.акад. А.Н. Крылова», 2011. С.123-125.

5. **Апполонов Е.М., Добродеев А.А., Клементьева Н.Ю., Сазонов К.Е., Тимофеев О.Я.**, Инновационные решения в области создания широких каналов для проводки крупнотоннажных судов во льдах // Тезисы докладов III Международ. конф. по развитию портов и судоходства ТРАНСТЕК, 2012. С.21-24.

6. **Добродеев А.А.**, Буксируемое устройство для создания широкого канала во льдах при проводке крупнотоннажных судов // Мореходство и морские науки 2013, Избр. доклады Сахалинской региональной НТК, 2013. С.203-216

7. **Sazonov K.E., Dobrodeev A.A.**, Making a channel in ice for large-size ships using a curvilinear icebreaker path // Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC Ser. "Proceedings of the 22nd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC 2013", 2013.

8. **Shaposhnikov V.M., Appolonov E.M., Sazonov K.E., Dobrodeev A.A., Klementieva N.Yu., Kudrin M.A., Maslich E.A., Petinov V.O.**, Studies for development of technologies to make a wide channel in ice // Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC Ser. "Proceedings of the 22nd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC 2013", 2013.

9. **Сазонов К.Е., Добродеев А.А., Клементьева Н.Ю., Дмитриев Д.С.**, Исследование управляемости 4-х корпусного ледокола // Доклады научно-технической конференции «XLV Крыловские чтения», СПб, ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2013. С. 104-108.

10. **Sazonov K.E., Dobrodeev A.A.**, Different technologies for making a wider channel in ice for large-size ships.// Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference Ser. "Proceedings of the 24th International Ocean and Polar Engineering Conference, ISOPE Busan", 2014, pp. 1171-1176.

11. **Гребенюк С.Я., Добродеев А.А., Клубничкин А.М., Усачева А.В.**, Экспериментальные исследования формы «ледового бульба» // Тезисы докладов Всероссийской конференции «Полярная механика», СПб, ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2014. С.20-21.

12. **Сазонов К.Е., Апполонов Е.М., Тимофеев О.Я. Добродеев А.А., Клементьева Н.Ю., Дехтярук Ю.Д., Шапошников В.М., Кудрин М.А.,**

Маслич Е.А., Создание современных технологий безопасной проводки крупнотоннажных судов в ледовых условиях на основе разработки инновационных технических средств для разрушения льда // Сборник работ лауреатов международного конкурса научных, научно-технических и инновационных разработок, направленных на развитие и освоение Арктики и континентального шельфа, ООО «Технологии развития», Москва, 2014, С.64-69.

13. **Добродеев А.А., Клементьева Н.Ю., Сазонов К.Е., Тимофеев О.Я.**, Новые технические средства для проводки крупнотоннажных судов во льдах // Труды 12-й Международной конференции и выставки по освоению ресурсов нефти и газа Российской Арктики и континентального шельфа стран СНГ RAO/CIS OFFSHORE, 2015.

14. **Добродеев А.А., Сазонов К.Е., Тимофеев О.Я.**, Анализ различных типов проводки крупнотоннажных судов, основанных на создании широких ледовых каналов // Сборник трудов Третьей международной научно-практической конференции «Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем», ИКМ МТМТС 2015, 2015. С.65-69.

15. **Сазонов К.Е., Добродеев А.А.**, Взаимосвязь развития судостроения и освоения Арктики // Труды международной научной конференции «Арктика: история и современность», 2016. С.241-250.

16. **Добродеев А.А.**, Новые методы оценки различных способов проводки крупнотоннажных судов во льдах // Сборник докладов международной научной конференции «Полярная механика», Владивосток, 2016. 12 с.

17. **Dobrodeev A.A., Sazonov K.E.**, The estimation of carbonic gas emission by ice-class large-size ships moving in ice using different escorting methods // Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering – OMAE, Sep. "ASME 2016 35nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE 2016", 2016.