К.Е. Сазонов
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

РАЗВИТИЕ ЛЕДОВОЙ ХОДКОСТИ СУДОВ В XXI ВЕКЕ

Объект и цель научной работы. Объектом исследования являются российские и зарубежные литературные источники, посвященные изучению ледовой ходкости судов. Целью работы является обзор современных тенденций в развитии исследований в области ледовой ходкости судов.

Материалы и методы. Анализ опубликованных литературных источников с 2000 по 2017 гг.

Основные результаты. Выявлены основные направления развития ледовой ходкости судов в новом тысячелетии. Выполнен обзор 153 литературных источников, посвященных проблеме ходкости судов во льдах.

Заключение. Данные обзора подтверждают, что это направление научных исследований остается актуальным, в первую очередь, в связи с появлением новых типов судов активного ледового плавания и/или расширением номенклатуры ледовых условий, в которых эксплуатируются суда. Все это стимулирует развитие как традиционных направлений исследований в ледовой ходкости судов, так и формирование новых.

Ключевые слова: ледовая ходкость, ледовый бассейн, моделированный лед, метод расчета, ледовое сопротивление, движитель, винто-рулевая колонка, натурные ледовые испытания, коррекция данных, снежный покров.

Автор заявляет об отсутствии возможных конфликтов интересов.

Для цитирования: Сазонов К.Е. Развитие ледовой ходкости судов в XXI веке. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; 2(384): 9–28.

УДК 629.5.016 DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-384-9-28

K. Sazonov
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

SHIP ICE PROPULSION PERFORMANCE DEVELOPMENTS IN THE XXIST CENTURY

Object and purpose of research. This paper studies Russian and foreign literature on ice propulsion performance of ships. The purpose of this work is to review current trends in ship ice propulsion performance developments.

Materials and methods. Analysis of literature published between 2000 and 2017.

Main results. This study identifies main development trends in ice propulsion performance of ships of the new millennium. It reviews 153 publications dedicated to propulsion performance of ships in ice.

Conclusion. This review confirms that ice propulsion performance of ships remains an important field of studies, first of all, due to introduction of new types of ships intended for frequent navigation in ice, and/or to the extension of the scope of operational ice conditions for ships. All this fosters both development of conventional fields of ice propulsion performance studies for ships, and formation of the new ones.

Key words: ice propulsion performance, ice basin, model ice, calculation method, ice resistance, propulsor, pod unit, full-scale ice trials, data correction, snow cover.

Author declares lack of the possible conflicts of interests.

For citations: Sazonov K. Ship ice propulsion performance developments in the XXIst century. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; 2(384): 9–28 (in Russian).

УДК 629.5.016 DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-384-9-28

Введение

Introduction

Способность судна успешно эксплуатироваться в ледовых условиях определяется его ледовыми качествами [27]: ледовой ходкостью, управляемостью, прочностью и остойчивостью. Ледовая ходкость является одним из важнейших ледовых качеств, она определяет возможность судна двигаться в тех или иных ледовых условиях. Ледовую ходкость характеризуют зависимостью скорости движения судна V от толщины преодолеваемого им льда h (ровного, битого, наслоенного, тертого и т.п.) $V = f(h)$. Эту зависимость также называют кривой ледопроходимости судна. Предельная ледопроходимость судна в сплошных ровных льдах определяется как предельная толщина льда $h_{\lim}$, которую судно может преодолеть при использовании полной мощности энергетической установки, двигаясь прямолинейно с минимальной устойчивой скоростью 1,5–2 уз.

Из приведенных выше определений следует, что ледовая ходкость судна определяется двумя факторами: сопротивлением льда его движению и тяговыми характеристиками движительного комплекса. В соответствии с этим научные исследования по ледовой ходкости разделяются на два больших направления: изучение ледового сопротивления и разработка способов его снижения и исследование особенностей работы движителей в ледовых условиях, включая анализ процессов их взаимодействия со льдом.

Основные итоги XX века

Main results of the XXth century

Изучение ледовой ходкости судов началось с появлением первых ледоколов во второй половине XIX в., однако основной прорыв в этом научном направлении стал возможен только после 1955 г., когда в ААНИИ был создан первый в мире ледовый бассейн [62, 69]. Эксперименты в ледовом бассейне позволили получать информацию о ледовом сопротивлении, что было невозможно сделать при натурных испытаниях судов. Эта информация позволила впервые поставить вопрос об экспериментальной оптимизации формы корпуса ледоколов и судов ледового плавания. Непосредственное измерение величины ледового сопротивления дало возможность анализа факторов, влияющих на него, позволило приступить к разработке сначала эмпирических и полуэмпирических методов расчета сопротивления, а затем перейти к более сложным математическим моделям, описывающим физические процессы, происходящие при движении судна во льдах. Были выпущены первые монографии по ледовой ходкости судов, подводящие итог первоначальным исследованиям [20, 27].

Опыт работы первого в мире ледового бассейна оказался удачным, и подобные бассейны стали создаваться в зарубежных странах, заинтересованных в развитии мореплавания во льдах (Германия, Финляндия, Канада, США и др.) [58]. Это стимулировало развитие исследований, направленных на совершенствование методологии создания моделированного льда в ледовых бассейнах, а также развитие методов пересчета модельных результатов на натурные условия и их коррекции для приведения данных различных экспериментов к единым значениям прочности льда на изгиб и толщины льда. Для координации этой работы в рамках Международной конференции опытовых бассейнов (МКОБ) был создан специальный ледовый комитет, который с небольшим перерывом функционирует по настоящее время.

Полвека развития ледовой ходкости судов в XX в. дало впечатляющие результаты. Разработана и стала общепризнанной технология проведения модельных испытаний судов в ледовых опытовых бассейнах. Причем постоянно совершенствовалась как методика приготовления моделированного льда в бассейнах, так и технологии воспроизводства в них различных ледовых условий, необходимых для более полного изучения ледовой ходкости судов. При этом не только проводились исследования для изучения ледового сопротивления судна, но и активно изучались особенности взаимодействия движительных комплексов со льдом. Практически все новые разработки, прежде чем быть воплощенными в металл, были исследованы в ледовых бассейнах.

К концу прошлого века в области разработки и использования расчетных методов определения ледового сопротивления практически повсеместно произошел переход к сложным математическим моделям, в которых ледовое сопротивление представляется как суммарное воздействие ряда физических процессов, таких как разрушения ледяного покрова корпусом, поворот и притапливание обломков льда, движение притопленных обломков по подводной части корпуса и т.д. Такие модели обладают хорошей предсказательной способностью и позволяют проводить предбассейновую оптимизацию формы корпуса ледоколов и судов ледового плавания.

Совместное использование экспериментальных и теоретических возможностей позволило во вто-

рой половине XX в. разработать ряд новых оригинальных предложений по форме корпуса ледоколов, многие из которых были реализованы в построенных судах и исследованы в натурных условиях. Некоторые из этих решений были отвергнуты практикой, другие же используются в современном арктическом судостроении.

Одним из важнейших усовершенствований XX в., повлиявших на дальнейшее развитие ледоколостроения, стало применение на ледоколах винторулевых колонок (ВРК) вместо традиционного движительно-рулевого комплекса [60]. Идея применения ВРК на судах ледового плавания возникла в Финляндии в конце 80-х гг. XX в. Тогда фирмы «Квэрнер Маса-Ярдс» и «АББ Индустри» поставили целью разработку пропульсивного комплекса для нового ледокола, предназначенного для Балтийского моря. Была разработана концепция новой ВРК, получившей название «Азипод» (Azimuthing Podded Drive). Суть концепции заключалась в создании электроприводной ВРК, у которой электромотор размещается в гондоле (рис. 1, см. вклейку). Электроэнергия привода подводится с помощью эластичных кабелей, вследствие чего «Азипод» может разворачиваться на 360°. Система разворота «Азипода» гидравлическая. Успешное применение ВРК типа «Азипод» на ледоколах и судах ледового плавания привело к разработке мощных ВРК механического типа, в которых вращение гребного винта осуществляется с помощью Z-образной механической передачи.

Внедрение ВРК позволило заметно повысить тяговые характеристики ледокола. Это связано с тем, что для ледокола крайне важно иметь высокую тягу при движении задним ходом, например, для освобождения от заклинивания во льдах. Требование по тяге заднего хода накладывало очень жесткие ограничения на конструкцию гребного винта, т.к. ранее задний ход обеспечивался только реверсом движителя. ВРК позволяет перейти к режиму заднего хода за счет поворота колонки на 180° без изменения направления вращения гребного винта. Это дает возможность использовать гребные винты с улучшенными тяговыми показателями за счет соответствующей профилировки лопастей и сечения лопасти. Применение ВРК значительно повысило маневренность ледокола во льдах за счет создания большей боковой силы, чем традиционный руль.

Основные результаты, полученные при изучении ледовой ходкости судов в XX веке, просуммированы в монографиях [21, 22, 60, 73].

Основные направления развития ледовой ходкости в XXI веке

Main fields of ice propulsion performance developments in the XXIst century

В новом веке развитие ледовой ходкости происходило как в традиционных, так и в новых направлениях. Новые, ранее не изучавшиеся направления в первую очередь связаны с появлением в Арктике новых типов судов – крупнотоннажных танкеров и газовозов, главной особенностью которых является существенное возрастание их главных размерений [70]. Современные задачи развития ледовой ходкости лежат в русле общих задач, стоящих перед судостроительной наукой в решении важной государственной проблемы освоения Арктики [53]. Основные направления этого развития можно сформулировать следующим образом.

1. Дальнейшее развитие методологии модельного эксперимента в ледовых бассейнах, направленное на совершенствование технологий приготовления моделированного льда, проведения испытаний с буксируемыми и самоходными моделями в различных ледовых условиях, прогнозирования характеристик ледовой ходкости на натурные условия, оптимизации формы корпуса и создания новых технических средств.
2. Разработка современных методов расчета характеристик ледовой ходкости судов, включающих полное описание всех физических процессов, происходящих при движении судна в различных ледовых условиях с учетом динамики и гидродинамики отдельных льдин, а также особенностей разрушения ледяного покрова корпусом и работы движительно-рулевого комплекса во льдах.
3. Разработка физических и численных технологий описания различных ледяных образований и ледовых условий для использования в модельном эксперименте и расчетных моделях.
4. Разработка современных методов исследования и расчета параметров воздействия льда на движительно-рулевые комплексы судов в целом и гребные винты в отдельности, поиск способов повышения тяговых характеристик движительных комплексов в широком диапазоне изменения скорости движения судна во льдах.
5. Развитие методов проведения натурных испытаний судов в различных ледовых условиях.
6. Уточнение возможностей и границ использования судов, спроектированных с использованием

идеологии двойного действия (DAS), экспериментальное исследование и разработка математических моделей движения судна во льдах кормой вперед.

7. Изучение особенностей взаимодействия со льдом и проводящими ледоколами крупнотоннажных судов ледового плавания, оценка возможности выполнения различных приемов их ледовой проводки, разработка оптимальных форм корпуса, позволяющих двигаться во льдах с относительно высокими скоростями движения для обеспечения эффективности функционирования арктических морских транспортных систем.
8. Разработка новых технических средств, обеспечивающих безопасную проводку крупнотоннажных судов в ледовых условиях.

Ниже приводится анализ работ по указанным направлениям, выполненных с начала века.

Дальнейшее развитие методологии модельного эксперимента в ледовых бассейнах

В начале нового тысячелетия модельный эксперимент развивался в нескольких направлениях. Во-первых, был создан ряд новых ледовых бассейнов, во-вторых, совершенствовались методики проведения экспериментов в ледовых бассейнах, были освоены некоторые новые виды экспериментальных исследований.

В 2006 г. фирмой Aker Arctic был создана новая ледовая лаборатория с ледовым бассейном [8, 151]. Коммерческие работы стали выполняться в бассейне начиная с марта 2007 г. В проектировании и создании бассейна приняли участие финские специалисты, имеющие многолетний опыт работы в ледовых бассейнах фирм Wartsila и Kaeverner Masa Yards в 1983–2006 гг.

Чаша ледового бассейна изготовлена из нержавеющей стали. В борта бассейна вмонтированы большие прямоугольные иллюминаторы, а центральная часть дна по всей длине бассейна выполнена прозрачной. Длина чаши составляет 60 м. На потолке холодильной камеры расположены теплообменники холодильной системы. Бассейн оснащен двумя тележками: одна из них предназначена для проведения модельных экспериментов и измерения физико-механических свойств льда, а другая – технологическая, для приготовления моделированного льда и очистки поверхности бассейна после окончания экспериментов (рис. 2, см. вклейку).

При поддержке правительства Кореи в исследовательском институте MOERI в 2009 г. был построен ледовый бассейн [117], в проектировании которого принимали участие специалисты из Сент-Джонса (Канада) [116]. Ледовый бассейн имеет почти квадратную форму в плане, его длина составляет 42 м, ширина – 32 м, глубина воды – 3 м. Бассейн оснащен буксировочной тележкой, которая представляет собой рельсовый мост и передвигающуюся по нему каретку (рис. 3, см. вклейку). Общая масса конструкции 100 т, ее собственные частоты лежат в пределах 6,5 Гц. Тяговое усилие – до 50 кН.

Холодильный комплекс бассейна, состоящий из 2 компрессоров и 16 теплообменных устройств, работает на фреоне, обеспечивая намораживание ледяного покрова со скоростью до 3,5 мм/ч, максимальная толщина льда – 100 мм. Как и в канадских бассейнах, в Корее применяется трехкомпонентный столбчатый моделированный лед.

Таблица. Основные характеристики старого и нового ледовых бассейнов Крыловского государственного научного центра

Table. Main parameters of KSRC's old and new Ice Basin

Ледовый бассейн	Старый	Новый
Длина ледового бассейна с доковой частью, м	50	100
Длина ледяного поля, м	35	80
Ширина бассейна, м	6	10
Глубина, м (в скобках указана глубина последних 20 % длины бассейна)	2(3)	2(4)
Диапазон толщины намораживаемого льда, мм	10–100	10–130
Скорость буксировочной тележки, м/с	0,005–1	0,005–1,5
Среднее время, затрачиваемое на приготовление одного поля, сут.	2	1–2

В декабре 2014 г. в Крыловском государственном научном центре (КГНЦ) был введен в эксплуатацию новый ледовый бассейн (рис. 4, см. вклейку), который заменил ранее существовавший. Основные характеристики нового ледового бассейна представлены в таблице, в ней же для сравнения приведены характеристики старого бассейна.

Бассейн оснащен двумя тележками – буксировочной и вспомогательной. В бассейне можно приготовлять два типа моделированного льда: столбчатый и гранулированный. Подробное описание ледового бассейна и его экспериментальных возможностей содержится в работах [13, 84–85]. В настоящее время ледовый бассейн КГНЦ является самым современным в мире.

В России продолжают использоваться и развиваться малые ледовые бассейны, работающие на естественном холоде. Они эксплуатируются в Нижнем Новгороде [21] и на Дальнем Востоке [32]. Новая лаборатория такого типа была создана в г. Биробиджан в Приамурском государственном университете имени Шолом-Алейхема [16].

Развитие методологии модельного эксперимента в рассматриваемый период обуславливалось, с одной стороны, запросами практики, а с другой – возобновлением деятельности Ледового комитета МКОБ, которое произошло в 2011 г. [128].

Запросы практики определялись появлением в начале нового тысячелетия новых типов судов ледового плавания, основными из которых стали суда обеспечения эксплуатации во льдах морских инженерных сооружений (разведочные и добычные ледостойкие платформы, отгрузочные терминалы и т.п.) и крупнотоннажные суда ледового плавания. Появление судов снабжения в большей степени стимулировало развитие экспериментальных методов определения ледовой управляемости таких судов [60, 115]. С точки зрения ледовой ходкости впервые стали возникать требования обеспечения заданной скорости движения судна во льдах определенной толщины [80], что потребовало проведения модельных буксировочных испытаний при высоких скоростях движения модели, которые ранее не исследовались. Подавляющее большинство ледокольных судов снабжения оснащено ВРК, изучение особенностей взаимодействия ВРК со льдом потребовало создания новых экспериментальных методик, о чем будет сказано в соответствующем разделе обзора.

Другим новым типом судов, которые последнее время все больше используются в арктическом мореплавании, являются крупнотоннажные суда – танкеры и газовозы. Главной особенностью этих судов являются их размеры, в первую очередь ширина, которая превышает ширину любого из существующих или строящихся ледоколов. Особенности исследований проблем, связанных с появлением крупнотоннажных судов, подробнее будут изложены ниже в соответствующем месте обзора. Здесь же необходимо отметить, что появление таких судов внесло некоторые коррективы в методологию проведения модельных испытаний по определению ледового сопротивления. Эти изменения проявились в повсеместном переходе к буксировке моделей по схеме, при которой модель соединяется с буксировочной тележкой с помощью тяги, закрепленной на тележке и носу модели (рис. 5). В состав указанной тяги входит динамометр, измеряющий буксировочное усилие [95]. Увеличение размеров моделей, связанное с необходимостью исследования крупнотоннажных судов, приводило к возникновению значительных упругих колебаний при использовании традиционной схемы буксировки, при которой динамометр располагается в центре тяжести модели и соединяется с буксировочной тележкой консольной балкой. Новая схема буксировки моделей позволяет избежать возникновения колебаний в системе «модель – динамометр – буксировочная тележка».

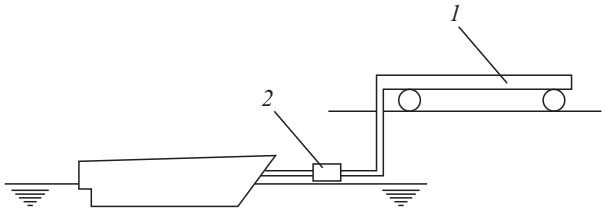


Рис. 5. Современная схема буксировки моделей в ледовых бассейнах [95]:
1 – буксировочная тележка; *2* – динамометр

Fig. 5. Modern layout of model towing in different ice basins [95]: *1* – towing carriage; *2* – dynamometer

Исследования, выполненные в работе [146], показывают существенное влияние на величину ледового сопротивления всплытия и дифферента, которые изменяются при буксировке модели в сплошных льдах. Это влияние является еще одной причиной, по которой необходим переход к новой схеме буксировки. Необходимо отметить, что в ледовом бассейне КГНЦ всегда применялась такая схема буксировки модели, при которой не ограничивались всплытие и дифферент. В указанной работе отмечается, что наличие всплытия и дифферента влияет на

формирование картины разрушения ледяного покрова корпусом модели. Таким образом, в этой работе получены экспериментальные подтверждения теоретическим расчетным схемам, в которых размер обломков льда зависит от величины локальной вертикальной скорости движения корпуса в рассматриваемой точке его контакта со льдом [60].

Другим методологическим новшеством является определение ледового сопротивления судна с помощью моделей, оборудованных работающими гребными винтами. При использовании таких моделей возможны две схемы проведения экспериментов: скорость движения модели задается буксировочной тележкой, при этом измеряется сила взаимодействия между моделью и тележкой, и движение модели в режиме чистого самохода, во время которого измеряется скорость движения модели. Первая схема реализуется в ледовых бассейнах КГНЦ и HSVA (Германия) [88], а вторая – в ледовом бассейне фирмы Aker Arctic (Финляндия). Основной особенностью всех применяемых методик является необходимость дополнительного проведения экспериментальных исследований модели на чистой воде. Кроме этого, указанные методики не учитывают возможность взаимодействия движителей модели со льдом. Подробное описание применяемых в указанных бассейнах методик содержится в работах [15, 108]. В работе [31] предложена методика учета взаимодействия движителей модели с обломками льда. Возможность определения ледового сопротивления по результатам испытаний моделей, оборудованных работающими движителями, была закреплена в рекомендациях Ледового комитета МКОБ [96].

Специалисты, работающие в области экспериментальных исследований ледовой ходкости судов, включая Ледовый комитет МКОБ, предпринимали попытки систематизации и обоснования методов коррекции данных модельного эксперимента. Коррекция этих данных необходима для приведения всех результатов экспериментов с одной и той же моделью к единым значениям толщины льда и его прочности, т.к. невозможно создать два моделированных ледяных поля с идентичными физико-механическими свойствами. Результаты систематизации подходов и методов изложены в работах [95, 99], теоретическое обоснование некоторых применяемых эмпирических формул содержится в работах [63, 65], а анализ влияния коэффициента трения – в работе [112].

В деятельности Ледового комитета МКОБ большое внимание уделялось методикам приготовления моделированного ледяного покрова и методам определения его физико-механических свойств. Хорошо известно, что в практике работы ледовых бассейнов применяются различные методики приготовления моделированного льда, а сам моделированный лед делится на столбчатый и гранулированный [97]. Кроме этого, в различных ледовых бассейнах используются разные химические соединения, которые добавляются в воду при намораживании льда [113]. В рассматриваемый период времени активных работ по созданию или существенному усовершенствованию существующих методик приготовления моделированного льда не велось. Можно указать лишь работу корейских специалистов [90], в которой описано создание гранулированного льда из воды, содержащей этиленгликоль и поверхностно-активные вещества. Авторы указывают, что гранулированный лед из указанных компонентов получился более однородным, чем столбчатый, а его прочность можно регулировать соответствующим выбором температурного режима. В России применительно к небольшим бассейнам, работающим на естественном холоде, происходило развитие методологии проведения модельного эксперимента. Полученные при этом результаты изложены в работах [17–19].

Усилиями Ледового комитета МКОБ были существенно обновлены рекомендации по определению физико-механических характеристик моделированного льда [94], которые способствовали улучшению работы ледовых бассейнов мира. Под влиянием Ледового комитета усилилось изучение физико-механических свойств моделированного льда, в первую очередь, его прочностных характеристик. Их изучению посвящены работы [30, 145, 147, 149], в которых установлено, что моделированный лед проявляет неупругие свойства при деформациях, приводящих к его разрушению. При этом действие упругости прекращается при относительно невысоком уровне действующих напряжений. Полученные результаты привели к обсуждению вопроса о применимости обычно используемых в ледовом модельном эксперименте критериев подобия (Фруд и Коши), которые получены для упругих тел (например, [27]). Специалисты в области механики разрушения предлагают отказаться от ныне применяемых критериев в пользу критериев, учитывающих особенности разрушения льда [124–125]. Мнение же специалистов [148], проводящих модельные испытания в ледовых бассейнах, заключается в том, что старая система критериев подобия безусловно применима при решении задач ледовой ходкости судов в сплошных льдах, однако ее примени-

мость в ряде случаев, например, таких, как самоходные испытания в тертых льдах, требует подтверждения. Таким образом, после более чем 60-летнего эксплуатирования ледовых бассейнов проблема критериев моделирования остается актуальной.

Разработка современных методов расчета характеристик ледовой ходкости судов

К концу XX в. в области ледовой ходкости судов было разработано достаточно большое количество расчетных методов, позволяющих определять ледовое сопротивление судна в основном в ровных льдах, а также выполнять численную оптимизацию формы корпуса. Помимо чисто полуэмпирических методов, были разработаны расчетные методы более высокого уровня, в которых довольно детально описывались различные физические процессы, происходящие при движении судов в сплошных льдах [21, 60, 120–121, 142].

В новом тысячелетии интенсивность работ по созданию новых расчетных методов несколько спала [99], что объясняется целым рядом причин. Во-первых, это отсутствие новых подходов к описанию основных физических процессов, сопутствующих движению судна в сплошных льдах, которые могли бы стимулировать доработку старых или создание новых математических моделей. Тем не менее, некоторые из авторов продолжали совершенствовать свои разработки, например, [143].

Во-вторых, все большее распространение стали получать специализированные пакеты программ, позволяющие автоматизировать выполнение расчетов в той или иной области инженерной деятельности (механика упругого и пластичного твердого тела, гидродинамика и т.п.). Непосредственное применение этих пакетов для решения задач ледовой ходкости, например, определения ледового сопротивления, оказалось весьма затруднительным, т.к. эти задачи требуют совместного использования различных пакетов. При изучении ледового сопротивления необходимо выполнение расчетов, связанных с механикой разрушения льда, динамики движения его обломков, а также достаточно точный учет гидродинамических эффектов.

Большое количество работ было посвящено рассмотрению отдельных задач, имеющих отношение к ледовой ходкости судов, которые можно решить в рамках существующих пакетов, реализующих метод конечных элементов (МКЭ) или решение уравнений Рейнольдса. Примером таких работ могут служить публикации [40, 47–49, 145]. Следует отметить, что использование пакетов, реализующих МКЭ, затруднено из-за отсутствия в составе этих пакетов модели разрушения льда. Использование имеющихся в составе пакетов средств часто приводит к неправдоподобным результатам [74]. Подбор подходящей модели разрушения требует проведения большого объема дополнительных исследований, которые ведутся вплоть до настоящего времени. В настоящее время активные работы по использованию пакетов прикладных программ для решения задач ледовой ходкости выполняются В.А. Лобановым [41–42, 46].

Новый метод расчета ледового сопротивления судна, движущегося в сплошных ровных льдах, был разработан корейскими специалистами под руководством К. Риски. Первые публикации по этому методу стали появляться в 2010 г. [134]. Метод базируется на разделении ледового сопротивления судна на три составляющие: сопротивление, связанное с разрушением льда корпусом, сопротивление, обусловленное поворотом и притапливанием обломанных льдин, и сопротивление воды. Каждая из составляющих сопротивления рассчитывается отдельно. Для расчета сил, разрушающих ледяной покров используется математическое описание картины разрушения льда, которая базируется на результатах Э. Энквиста [87] и П. Варста [144]. Принятая картина разрушения льда корпусом и соответствующие ей силы показаны на рис. 6 (см. вклейку). Сопротивление, связанное с поворотом и притапливанием в методе, рассчитывается по эмпирической формуле Линквиста [120]. По многим основным чертам описываемый метод очень похож на метод Алексеева – Сазонова, который был разработан в ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова в 1984 г. [60].

В первоначальном варианте этот метод использовался для расчета ледовой нагрузки на корпус судна, двигающегося во льдах [135]. Затем метод был обобщен для описания любого движения судна в сплошных льдах с 6 степенями свободы [141]. Довольно подробно метод описан в диссертации Тана [139]. В настоящее время авторы применяют разработанные численные технологии для решения различных задач морской ледотехники [136, 140].

После 2000 г. во всем мире при решении различных задач ледотехники стал применяться метод дискретных элементов (МДЭ) [102–103, 114]. В последнее время этот метод время включен в несколько программных пакетов как одна из их функциональных возможностей, например, STAR-CCM+ версия 9. Многие исследователи реализуют свои собственные разработки МДЭ для написания про-

грамм в области морской ледотехники, например, [98, 104, 122, 131–132]. Однако метод МДЭ с большим трудом может быть применим к изучению ледовой ходкости судов в сплошных льдах.

Последние годы для решения задач морской ледотехники стал применяться метод гидродинамики сглаженных частиц (Smoothed Particle Hydrodynamics). Он является бессеточным и лагранжевым. Метод был разработан для решения задач гидродинамики, но теперь распространяется и на механику твердого тела. Более широкому его применению способствовало включение этого метода в прикладной пакет LS-DYNA. В настоящее время опубликованы работы по применению метода гидродинамики сглаженных частиц в механике льда [82–83, 126], однако, по мнению автора, этот метод может быть применен для описания движения притопленного корпусом льда (ледовой рубашки) по его подводной поверхности.

Разработка физических и численных технологий описания различных ледяных образований и ледовых условий

В XX в. специалисты в области морской ледотехники оперировали в основном так называемыми эталонными ледовыми условиями, к которым относился сплошной ровный лед, мелкобитый лед и, очень редко, торосистые образования. В настоящее время номенклатура ледовых условий, в которых проводятся модельные испытания или для которых выполняются расчеты, существенно расширилась.

Обычно модельные испытания сейчас проводятся в [97]:

- сплошных ровных льдах;
- мелко- и крупнобитых льдах;
- торосистых образованиях;
- моделированном ледяном покрове, который подвергся операции управления ледовой обстановкой;
- тертых льдах (канал или поле).

Последние две позиции являются относительно новыми, поэтому они требуют комментариев.

Управление ледовой обстановкой с помощью ледоколов (ice management) является довольно новым направлением развития морской ледотехники. Основную задачу ледового менеджмента можно определить как локальное изменение ледовой обстановки в районе расположения защищаемого объекта (добычной или разведочной платформы, отгрузочного терминала и т.п.). Технологии выполнения ледоколами процедуры управления ледовой обстановкой описаны, например, в работах [34, 57]. Разрушенный при операциях ледового менеджмента ледяной покров имеет весьма специфическую структуру. Это смесь крупно- и мелкобитого льда с добавлением тертого льда. Для правильного моделирования воздействия такого льда на защищаемые объекты необходимо создать такой же лед в ледовом бассейне. Пример приготовления такого ледяного поля в Гамбургском ледовом бассейне показан на рис. 7 (см. вклейку).

Интерес к изучению ледяных каналов, заполненных тертым льдом, был стимулирован созданием Финско-Шведских правил для судов ледового класса и их дальнейшим развитием. В ледовых бассейнах ледяной канал моделируется путем накопления небольших кусочков льда в канале, оставшемся после прохождения модели. В природе набитые тертым льдом ледяные каналы имеют меньшую ширину в середине, которая утолщается к краям. Такой же характер распределения льда стараются воспроизвести в ледовых бассейнах.

К сложным ледовым условиям, которые пытаются воспроизводить в ледовых бассейнах, относятся ледовые сжатия. Попытки имитации ледовых сжатий предпринимались ранее неоднократно, но устоявшейся технологии так и не было разработано. Поиски такой технологии продолжаются до сих пор, о чем свидетельствует, например, работа [137], выполненная в ледовом бассейне университета Аалто (Финляндия). Ледовый бассейн

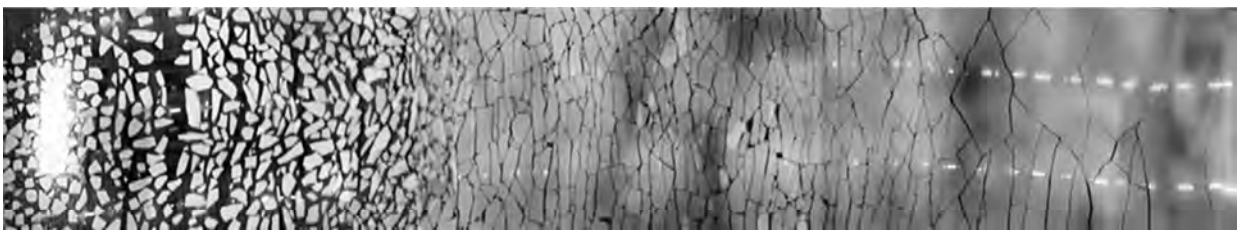


Рис. 8. Распределение битого льда по длине бассейна
Fig. 8. Distribution of broken ice along the test tank

этого университета имеет квадратную форму в плане, что существенно облегчает имитацию ледовых сжатий в нем.

Необходимо отметить новый способ создания битого льда с помощью генерации волнения в ледовом бассейне, который был осуществлен в Гамбурге [89]. Создаваемое при прохождении волны разрушение поля моделированного льда показано на рис. 8. Авторы работы утверждают, что использование такой технологии позволяет добиваться природного распределения размеров льдин.

Большое количество разрабатываемых в рассматриваемый промежуток времени расчетных методов было посвящено учету различных ледовых условий при определении параметров ледовой ходкости судов. Для расчета сопротивления в различных типах льда использовался в основном МДЭ, который позволяет достаточно просто задать геометрические характеристики битого и тертого льда [41, 43, 106, 107]. Разрабатывались методы расчета движения судов в торосистых льдах [62, 110], в том числе при работе набегами [11, 33] и движении задним ходом [55]. Также предпринимались попытки учета влияния ледовых сжатий на показатели ледовой ходкости судов [3, 6, 56].

Разработка современных методов исследования и расчета параметров воздействия льда на движительно-рулевые комплексы судов

Выше уже отмечалось, что в новом тысячелетии началось активное внедрение ВРК в качестве основных движителей ледоколов и судов ледового плавания. Применение таких движителей имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными гребными винтами, позволяющих повысить тяговые характеристики [52, 60]. Для успешного проектирования ВРК необходимо уметь определять ледовые нагрузки на колонку. Такие исследования проводились в различных ледовых бассейнах, однако их результаты обычно не публиковались. Можно указать лишь относительно небольшое количество публикаций, в которых приводятся результаты экспериментальных исследований [75, 86, 153]. В работе [14] описывается экспериментальная установка и приведены некоторые результаты взаимодействия со льдом соосной пары гребных винтов во льдах.

Интересный эксперимент по определению ледовой нагрузки на натурный корпус колонки типа «Азипод» в лабораторных условиях описан в работе [127]. Схема эксперимента показана на рис. 9.

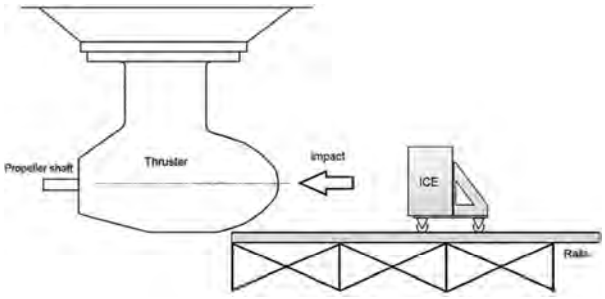


Рис. 9. Схема эксперимента по определению ударной нагрузки на корпус ВРК

Fig. 9. Layout of the tests intended to determine impact load on pod unit body

Экспериментальные результаты сопоставлялись с данными численного моделирования, сравнение показало достаточно хорошее совпадение. Однако использованная численная модель не учитывала всех физических эффектов, которые происходили при соударении, например, растрескивание блоков льда. Экспериментальные данные однозначно показали возможность снижения ледовой нагрузки на корпус колонки за счет оптимизации ее формы.

В рассматриваемый период был выполнен ряд работ по расчетному определению ледовой нагрузки на ВРК [76–77, 105], которые в настоящее время наравне с экспериментальными данными учитываются при проектировании ВРК.

Изучению ледовых нагрузок на гребные винты и анализу работы во льдах традиционных пропульсивных систем также уделялось значительное внимание. В работах А.В. Андрюшина обобщены результаты экспериментальных и теоретических исследований ледовой нагрузки на традиционные гребные винты, включая винты регулируемого шага [1–2]. Продолжались экспериментальные исследования по изучению ледовой нагрузки на лопасти гребного винта при фрезеровании ими льдин [29, 78, 130]. Выполнялись численные исследования пропульсивных качеств движителей [44–45] и особенностей работы всего комплекса [63, 92].

Развитие методов проведения натурных испытаний судов в различных ледовых условиях

Технологии исследования ледовых качеств судов в натурных условиях имеют длительную историю, сопоставимую с историей самих ледоколов и судов ледового плавания [69]. Когда-то эти технологии были единственным способом получения информации о возможностях и недостатках судов,

эксплуатируемых в ледовых условиях. После создания и повсеместного внедрения технологий модельного эксперимента в ледовых бассейнах основным назначением натурных испытаний является проверка и подтверждение спецификационных ледовых характеристик построенного судна. Отдельные исследовательские задачи при проведении натурных испытаний ставились достаточно редко. В XX в. в ряде монографий были описаны основные приемы проведения натурных испытаний судов во льдах [27, 54].

Выше уже отмечалось, что начало нового тысячелетия совпало с появлением на замерзающих акваториях новых типов судов, которые к тому же часто были оснащены новыми типами движителей. Эти обстоятельства сделали натурные сдаточные испытания таких судов не рутинным экспериментом, а важной составляющей в процессе изучения, создания и совершенствования новых типов судов и их движителей для арктических регионов. Такими крайне важными для дальнейшего развития дальнейших исследований можно считать натурные испытания крупнотоннажного танкера двойного действия «Мастера» в Балтийском море [150] и других судов двойного действия [152], испытания ледоколов, оборудованных ВРК при движении задним ходом в торосах [123], испытания судов-снабженцев [80, 129].

В это время проводились также многочисленные испытания ледоколов и судов ледового плавания, каждое из которых внесло свой вклад в развитие ледовой ходкости судов [4, 36, 39, 50, 79, 81, 118, 133, 138]. При проведении этих натурных испытаний помимо изучения традиционных вопросов, связанных с ледовой ходкостью судов в сплошных ровных льдах, изучались маневренные качества судов, их способность работать набегами [35, 133], преодолевать торосы, двигаться задним ходом, а также ледовая вибрация и условия обитания [79, 138].

Помимо проведения анализа результатов натурных экспериментов, большое внимание уделялось проведению различных исследований, направленных на повышение качества проведения и обработки данных натурных испытаний судов. В настоящее время при проведении испытаний широко используют систему JPS, которая позволяет точно определять координаты и скорости судна и отдельных его точек. Получили существенное развитие и стандартные судовые приборы, которые позволяют точно определять режимы работы движительно-рулевых комплексов. Разработаны методы автоматизированного определения толщины ледяного покрова и наличия ледовых сжатий в процессе движения судна во льдах, основанные на телевизионных измерениях [51, 72]. Применение системы JPS, а также современных аппаратных методов измерения ускорений позволило предложить и развивать методику определения глобальной ледовой нагрузки на судно методом решения второй задачи механики – определения силового воздействия на тело по заданным параметрам его движения [71]. Результаты таких исследований изложены в работах [38, 100, 109, 119].

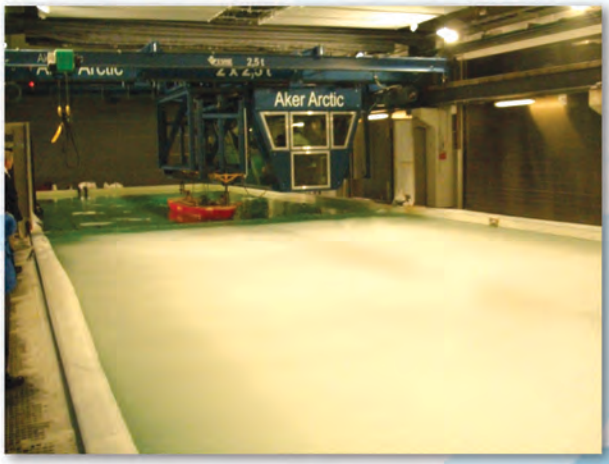
В течение всего рассматриваемого периода совершенствовались методы обработки данных натурного эксперимента. Они основываются на различных эмпирических обобщениях, скейлинговых соотношениях между основными величинами [59] и методах пересчета данных на другие значения прочности льда и его толщины [64–65]. Постоянно уточняются методики экспериментального определения прочностных свойств льда при проведении натурных испытаний [37, 68]. Проводится сопоставительный анализ данных натурных и модельных испытаний, который показывает довольно хорошее соответствие [5, 111].

Сейчас в КГНЦ ведется работа по совершенствованию гидродинамического расчета ходкости судна во льдах. Создаваемая методика базируется на альтернативной системе коэффициентов взаимодействия, которая наилучшим образом подходит для описания движения во льдах [23–25]. Использование этой методики позволяет рассчитать тягу движительного комплекса судна и другие его характеристики ходкости (скорость, частоту вращения движителей и т.п.) при движении в ледовых условиях [101]. Все это дает возможность (при принятии ряда допущений) определить ледовое сопротивление судна в натурных условиях. Знание же ледового сопротивления позволяет применить к нему хорошо апробированные в модельном эксперименте методы коррекции. Такая операция была осуществлена при анализе данных натурных испытаний ледокола «Владивосток» [26]. Результаты анализа данных традиционном методом и с использованием информации о ледовом сопротивлении достаточно хорошо совпали.

Одной из важных, до сих пор не решенных проблем является определение и обоснование процедуры корректного учета влияния снежного покрова на результаты натурных испытаний судов. В среде специалистов не существует единого мнения о том, каким образом необходимо учитывать влияние снежного покрова на результаты натурных испытаний. В рекомендациях Ледового комитета

Рис. 1. ВРК типа «Азипод»

Fig. 1. Azipod propulsion units



а) *б*)

Рис. 2. Ледовый бассейн фирмы Aker Arctic, Финляндия: *а*) буксировочная тележка; *б*) вспомогательная тележка

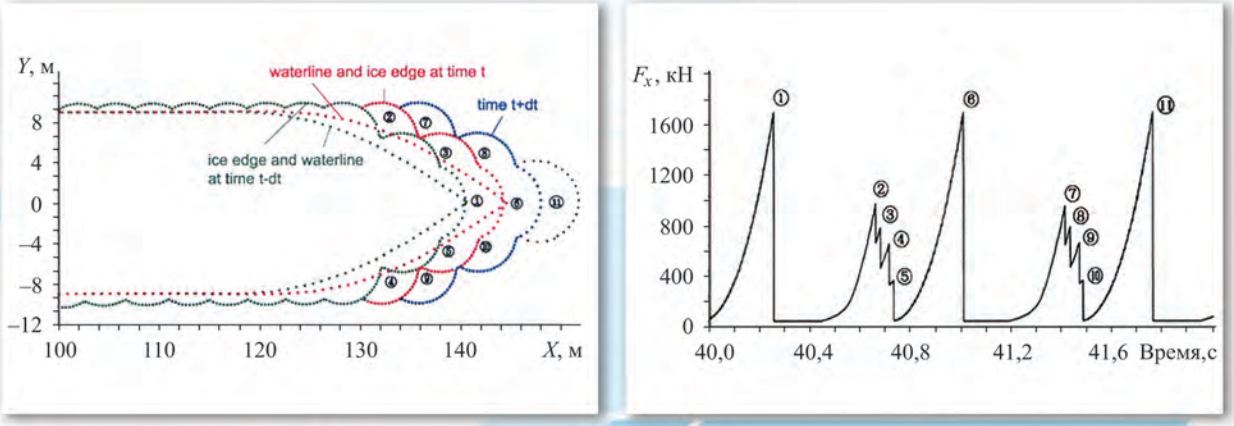
Fig. 2. Ice Basin of Aker Arctic, Finland: *a*) towing carriage; *b*) service carriage

Рис. 3. Измерительная рама и кабина корейского ледового бассейна

Fig. 3. Measurement frame and cabin of KRISO Ice Tank, Korea

Рис. 4. Буксировочная тележка ледового бассейна Крыловского государственного научного центра

Fig. 4. Towing carriage of KSRC Ice Basin, Russia



а) *б*)

Рис. 6. Формирование картины разрушения ледяного покрова (*а*) и возникающие при этом ледовые силы (*б*)

Fig. 6. Formation of ice sheet failure pattern (*a*) and ice-induced forces that arise during ice failure (*b*)

Рис. 7. Подготовленное к испытаниям поле, имитирующее выполнение операции ледового менеджмента

Fig. 7. Ice sheet prepared for ice management simulation tests

МКОБ указывается только, что в ходе проведения натурных испытаний должны быть проведены измерения толщины снежного покрова и его плотности, т.к. эти характеристики могут оказывать влияние на результаты испытаний [93]. Однако никаких конкретных рекомендаций по использованию этих значений при анализе данных натурного эксперимента не приводится. Обычно толщину слоя снега учитывают, вводя некоторую эквивалентную толщину льда таким образом, чтобы движение судна в сплошном льду эквивалентной толщины совпадало с его движением во льду, на поверхности которого имеется слой снега. При определении эквивалентной толщины льда толщину слоя снега, умноженную на некоторый поправочный коэффициент, прибавляют к реальной толщине льда. Различными исследователями на основании обработки единичных результатов натурных испытаний судов предлагались различные значения этого коэффициента. По данным А.Я. Бузуева [7], значения коэффициента лежат в пределах от 0,5 до 1,5, сам же А.Я. Бузуев считал, что следует принимать значение этого коэффициента равным 1. Некоторые зарубежные специалисты используют еще меньшее значение этой величины, равное 1/3 [123, 129].

Теоретический анализ влияния снега на результаты натурных испытаний судов выполнялся многими исследователями, например, [54]. Значительные результаты были получены в работах Е.М. Грамузова [9–10, 12], однако в них не было получено окончательного решения. Новый физический механизм, объясняющий многие особенности влияния снежного покрова на ледовое сопротивление, был предложен в работе [66]. Этот важный вопрос требует дальнейшего исследования, особенно актуально он стоит при анализе движения судна в заснеженных льдах задним ходом – очевидно, что эмпирическими соотношениями, полученными для переднего хода, в таком случае пользоваться нельзя.

Последние три пункта направления развития ледовой ходкости судов в данном обзоре рассматриваться не будут, т.к. в 2017 г. вышла монография [70], в которой эти вопросы довольно подробно рассмотрены, включая обзор соответствующей литературы.

Заключение

Conclusion

В обзоре рассмотрены основные направления развития ледовой ходкости в новом тысячелетии. Данные обзора подтверждают, что это направление научных исследований продолжает оставаться актуальным, в первую очередь, в связи с появлением новых типов судов активного ледового плавания и/или расширением номенклатуры ледовых условий, в которых эксплуатируются суда. Все это стимулирует развитие как традиционных направлений исследований в ледовой ходкости судов, так и формирование новых.

Библиографический список

References

1. *Андрюшин А.В.* Теория взаимодействия гребного винта со льдом. Обеспечение эксплуатационной прочности элементов пропульсивного комплекса судов ледового плавания и ледоколов. Дис. … канд. техн. наук. СПб., 2006. [*A. Andryushin*. Propeller-ice interaction theory. Ensuring operational strength of propulsion system elements for ice-going ships and icebreakers. Dissertation for the degree of the Candidate of Technical Sciences. St. Petersburg, 2006. (*in Russian*)].
2. *Андрюшин А.В., Беззубик О.Н., Бицуля А.В., Гаппоев М.А.* Ледовые нагрузки для расчета прочности ледокольных винтов // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. 2000. № 23. С. 162–179. [*A. Andryushin, O. Bezzubik, A. Bitsulya, M. Gappoev*. Ice-induced loads for strength calculations of icebreaker propellers // Compendium of papers, Russian Maritime Register of Shipping. 2000; 23:162–79. (*in Russian*)].
3. *Апполонов Е.М., Сазонов К.Е., Бокатова Е.А.* Оценка вероятности заклинивания крупнотоннажных судов при сжатии // Мир транспорта. 2012. № 4. С. 4–9. [*Ye. Appolonov, K. Sazonov, Ye. Bokatova*. Probability assessment of compression-induced jamming for large ships // Mir Transporta (World of Transport and Transportation). 2012; 4: 4–9. (*in Russian*)].
4. *Апполонов Е.М., Беляшов В.А., Сазонов К.Е., Скрябин Д.С., Игошин Е.В.* Исследование ледовой ходкости ледокола «Санкт-Петербург» в Карском море // Судостроение. 2011. № 4. С. 9–12. [*Ye. Appolonov, V. Belyashov, K. Sazonov, D. Skryabin, Ye. Igoshin*. Ice propulsion trials of *Sankt Peterburg* icebreaker in the Kara Sea // Sudostroyeniye (Shipbuilding). 2011; 4: 9–12. (*in Russian*)].
5. *Беляшов В.А., Сазонов К.Е.* Натурные исследования ледовой ходкости судов. Сопоставление с данными модельного эксперимента // Тезисы докладов на ВНК «Полярная механика – 2012». Новосибирск, ИГДиЛ СО РАН, 2012. С. 11 [*V. Belyashov, K. Sazonov*. Full-scale ice propulsion trials of ships. Com-

parison versus model test data // Theses of messages delivered at Polar Mechanics 2012 conference. Novosibirsk, Lavrentyev Institute of Hydrodynamics, Siberian branch of the Russian Academy of Sciences. 2012. P. 11. (*in Russian*)].

6. *Бокатова Е.А., Сазонов К.Е.* Расчет скорости движения судна по ледяному каналу в условиях сжатия при частичном взаимодействии бортов с его кромками // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2012. Вып. 66(350). С. 43–46. [*Ye. Bokatova, K. Sazonov*. Calculation of ship speed in an ice channel under ice compression and partial interaction of ship sides with channel edges // Transactions of the Krylov State Research Centre 2012; 66(350): 43–6. (*in Russian*)].
7. *Бузуев А.Я.* Влияние природных условий на судоходство в замерзающих морях. Л.: Гидрометеоиздат, 1981. [*A. Buzuev*. Effect of environmental conditions upon shipping in freezing seas. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1981. (*in Russian*)].
8. *G. Wilkman*. 40 years of ice model testing. Helsinki, Finland, Aker Arctic Technology Inc, 2009.
9. *Грамузов Е.М.* Сопротивление снега при движении ледокола // Межвузовский сб. науч. тр. «Проектирование средств продления навигации». Горький: Горьков. политехн. ин-т, 1986. С. 59–71. [*Ye. Gramuzov*. Snow resistance to icebreaker movement // Inter-University Compendium of Papers Design of navigation extension tools. Gorky: Gorky Polytechnical Institute, 1986. (*in Russian*)].
10. *Грамузов Е.М., Тихонова Н.Е.* Метод учета влияния снега на сопротивление ледокола за счет приведенной толщины сплошного ледяного покрова // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2011. № 4(91). С. 178–183. [*Ye. Gramuzov, N. Tikhonova*. Method of accounting for snow contribution to icebreaker resistance based on normalized thickness of continuous ice sheet // Transactions of Nizhny Novgorod State Technical University (NSTU) named after R.E. Alekseev. 2011; 4(91): 178–83. (*in Russian*)].
11. *Грамузов Е.М., Калинина Н.В.* Использование натурных экспериментальных данных при прогнозировании ходкости ледокола набегами // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2013. Т. 1. № 4(16). С. 83–92. [*Ye. Gramuzov, N. Kalinina*. Using the data of full-scale trials in propulsion performance predictions for ramming icebreaker // Proceedings of Komsomolsk-na-Amure State Technical University. 2013. Vol. 1. No. 4(16). P. 83-92. (*in Russian*)].
12. *Грамузов Е.М., Ионов Б.П., Тихонова Н.Е.* Учет снега при определении приведенной толщины ледяного покрова // Морской вестник. 2017. № 2(62). С. 112–113. [*Ye. Gramuzov, B. Ionov, N. Tikhonova*. Accounting for the snow in calculation of normalized ice sheet thicknes // Morskoy Vestnik. 2017; 2(62): 112–3. (*in Russian*)].
13. *Денисов В.И., Сазонов К.Е., Тимофеев О.Я.* Новые экспериментальные возможности Крыловского государственного научного центра по изучению ледовых воздействий на объекты морской техники // Арктика: экология и экономика. 2015. № 3(19). С.76–81. [*V. Denisov, K. Sazonov, O. Timofeev*. New experimental capabilities of KSRC for studying ice effects upon marine structures // Arctic: Ecology and Economy. 2015; 3(19): 76-81. (*in Russian*)].
14. *Добродеев А.А., Сазонов К.Е.* Экспериментальное исследование взаимодействия сосной пары гребных винтов со льдом // Труды Крыловского государственного научного центра. 2013. Вып. 73(357). С. 99–104. [*A. Dobrodeev, K. Sazonov*. Experimental investigation of interaction between pair of co-axial propellers with ice // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2013; 73(357): 99–104. (*in Russian*)].
15. *Добродеев А.А., Клубничкин А.М., Сазонов К.Е.* Самоходные испытания моделей в ледовых бассейнах для определения ледового сопротивления // Труды Крыловского государственного научного центра. 2015. Вып. 90(374). С. 109–116. [*A. Dobrodeev, A. Klubnichkin, K. Sazonov*. Self-propulsion model tests in ice basins to determine ice resistance // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2015; 90(374): 109–16. (*in Russian*)].
16. *Земляк В.Л., Баурин Н.О., Курбацкий Д.А.* Лаборатория «Ледотехники» // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. 2013. № 1(12). С. 68–77. [*V. Zemlyak, N. Baurin, D. Kurbatsky*. Laboratory of Ledotekhnika // Bulletin of Amur State University named after Sholom Aleichem. 2013; 1(12): 68–77. (*in Russian*)].
17. *Зуев В.А., Грамузов Е.М.* Моделирование ледяного покрова при модельных испытаниях судов // Современные проблемы кораблестроения. Труды НГТУ. 2005. Т. 46. С. 26–30. [*V. Zuev, Ye. Gramuzov*. Simulation of ice sheet during model tests of ships // Modern challenges in shipbuilding. Transactions of Nizhny Novgorod Technical University. 2005; 46: 26–30. (*in Russian*)].
18. *Зуев В.А., Грамузов Е.М.* Новые подходы к моделированию ледовой среды при модельных испытаниях судов // Труды НГТУ им Р.Е. Алексеева. 2016. № 4(115). С. 107–114. [*V. Zuev, Ye. Gramuzov*. New approaches to ice modeling during model tests of ships // Transactions of Nizhny Novgorod Technical Univer-

sity named after R.E. Alexeev. 2016; 4(115): 107–14. (*in Russian*)].

19. *Зуев В.А., Грамузов Е.М., Семенов Д.А.* Моделирование взаимодействия судна со льдом // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2011. Вып. 63(347). С. 51–58. [*V. Zuev, Ye. Gramuzov, D. Semenov*. Modeling of ship interaction with ice. // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2011; 63(347): 51–8. (*in Russian*)].
20. *Игнатьев М.А.* Гребные винты судов ледового плавания. Л.: Судостроение, 1966. [*M. Ignatyev*. Propellers of ice-going ships. Leningrad: Sudostroeniye, 1966. (*in Russian*)].
21. *Ионов Б.П., Грамузов Е.М.* Ледовая ходкость судов. – СПб:, Судостроение, 2001. [*B. Ionov, Ye. Gramuzov*. Ice propulsion performance of ships. St. Petersburg: Sudostroeniye, 2001. (*in Russian*)].
22. *Ионов Б.П., Грамузов Е.М., Зуев В.А.* Проектирование ледоколов. СПб.: Судостроение, 2013. [*B. Ionov, Ye. Gramuzov, V. Zuev*. Design of icebreakers. St. Petersburg: Sudostroeniye, 2013. (*in Russian*)].
23. *Каневский Г.И., Пустошный А.В.* Исследование эффективности работы гребных винтов на швартовном режиме // Труды Крыловского государственного научного центра. 2016. Вып. 93(377). С. 37–42. [*G. Kanevsky, A. Pustoshny*. Efficiency of propellers at bollard pull // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2016; 93(377): 37–42. (*in Russian*)].
24. *Каневский Г.И., Клубничкин А.М., Щербаков И.В.* Швартовая система коэффициентов взаимодействия гребных винтов с корпусом // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2011. Вып. 59(343). С. 77–88. [*G. Kanevsky, A. Klubnichkin, I. Sherbakov*. The system of propeller/hull interaction coefficients based on bollard-pull point // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2011; 59(343): 77–88. (*in Russian*)].
25. *Каневский Г.И., Клубничкин А.М., Щербаков И.В.* Расчет тяговых характеристик многовального судна // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2011. Вып. 59(343). С. 89–100. [*G. Kanevsky, A. Klubnichkin*. Estimation of thrust characteristics for a multi-shaft ship. // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2011; 59(343): 89–100. (*in Russian*)].
26. *Каневский Г.И., Клубничкин А.М., Сазонов К.Е.* Применение гидродинамических расчетов ледовой ходкости для анализа данных ледовых натурных испытаний // Труды Крыловского государственного научного центра. 2017. Вып. 2(380). С. 17–23. [*G. Kanevsky, A. Klubnichkin, K. Sazonov*. Applying hydrodynamic calculations of ice propulsion performance in analysis of full-scale ice test data // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2017; 2(380): 17–23. (*in Russian*)].
27. *Каштелян В.И., Позняк И.И., Рывлин А.Я.* Сопротивление льда движению судна. Л.: Судостроение, 1968. [*V. Kashtelyan, I. Poznyak, A. Ryvlin*. Ice resistance of ships. Leningrad: Sudostroyeniye, 1968. (*in Russian*)].
28. *Каштелян В.И., Рывлин А.Я., Фаддеев О.В., Ягодкин В.Я.* Ледоколы. Л.: Судостроение, 1972. [*V. Kashtelyan, A. Ryvlin, O. Faddeev, V. Yagodkin*. Icebreakers. Leningrad: Sudostroyeniye, 1972. (*in Russian*)].
29. *Карулин Е.Б., Карулина М.М., Беляшов В.А., Белов И.М.* Оценка периодических нагрузок, действующих на гребной винт при взаимодействии со льдом // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. 2008. Вып. 31. С. 93–106. [*Ye. Karulin, M. Karulina, V. Belyashov, I. Belov*. Assessment of periodical loads acting on propeller during interaction with ice // Compendium of papers, Russian Maritime Register of Shipping. 2008; 31: 93–106. (*in Russian*)].
30. *Клементьева Н.Ю., Сазонов К.Е.* О разрушении консольных балок моделированного льда // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2011. Вып. 63(347). С. 18–26. [*N. Klementyeva, K. Sazonov*. On failure of model ice cantilever beams // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2011; 63(347): 18–26. (*in Russian*)].
31. *Клубничкин А.М., Рыжков А.В., Сазонов К.Е.* Метод оценки изменения тяги движительного комплекса при его взаимодействии со льдом по результатам самоходных испытаний // Труды Крыловского государственного научного центра. 2016. Вып. 91(375). С. 91–98. [*A. Klubnichkin, A. Ryzhkov, K. Sazonov*. Method for evaluation of ice-induced changes in thrust characteristics of ship propulsion systems using self-propulsion model test data // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2016; 91(375): 91–8. (*in Russian*)].
32. *Козин В.М., Жесткая В.Д., Погорелова А.В., Чижиумов С.Д., Джабраилов М.Р., Морозов В.С., Кустов А.Н.* Прикладные задачи динамики ледяного покрова. М.: Академия Естествознания, 2008. [*V. Kozyn, V. Zhestkaya, A. Pogorelova, S. Chizhiumov, M. Jabrailov, V. Morozov, A. Kustov*. Applied problems of ice sheet dynamics. Moscow: Akademiya Yestestvoznaniya, 2008. (*in Russian*)].
33. *Костылев А.И., Сазонов К.Е.* Метод расчета сопротивления судна при работе набегами // Судостроение. 2015. № 5. С. 24–27. [*A. Kostylev, K. Sazonov*. Calculation method for resistance of ships operating by rams // Sudostroyeniye. 2015; 5: 24–7. (*in Russian*)].

34. *Костылев А.И., Сазонов К.Е.* Мировой опыт изучения методов управления ледовой обстановкой // Арктика: Экология и экономика. 2016. № 3(23). С. 86–97. [*A. Kostylev, K. Sazonov*. Global experience in studies of ice management methods // Arctic: Ecology and Economy. 2016; 3(23): 86–97. (*in Russian*)].
35. *Костылев А.И., Сазонов К.Е.* Динамические характеристики ледокола «Владивосток» по данным натурного эксперимента // Труды Крыловского государственного научного центра. 2016. Вып. 93(377). С. 57–74. [*A. Kostylev, K. Sazonov*. Dynamic parameters of icebreaker Vladivostok: full-scale test data. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2016; 93(377): 57–74. (*in Russian*).
36. *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. 2016. № 6. С. 9–12. [*A. Kostylev, K. Sazonov, O. Timofeev, G. Yegiazarov, A. Solovyev, D. Yegorov, V. Shtrambrant*. Full-scale ice trials of Vladivostok icebreaker // Sudostroyeniye. 2016; 6: 9–12. (*in Russian*)].
37. *Крупина Н.А., Кубышкин Н.В.* Прочность при изгибе дрейфующего ровного однолетнего морского льда в Баренцевом море // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2007. № 34(318). С. 139–159. [*N. Krupina, N. Kubyshkin*. Bending strength of drifting level first-year sea ice in the Barents Sea // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2007; 34(318): 139–59. (*in Russian*)].
38. *Крупина Н.А., Чернов А.В.* Применение инерциальной измерительной системы для определения глобальной ледовой нагрузки на судно // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2010. Вып. 51(335). С. 55–68. [*N. Krupina, A. Chernov*. Application of inertial instrumentation system to determine global ice load on ship // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2010; 51(335): 55–68. (*in Russian*)].
39. *Крупина Н.А., Лихоманов В.А., Чернов А.В.* Оценка ледовой ходкости НЭС «Академик Трешников» // Проблемы Арктики и Антарктики. 2013. № 3(97). С. 57–64. [*N. Krupina, V. Likhomanov, A. Chernov*. Ice propulsion performance assessment of Akademik Tryoshnikov research ship. Problemy Arktiki i Antarktiki (Arctic and Antarctic Matters). 2013; 3(97): 57–64. (*in Russian*)].
40. *Лобанов В.А.* Моделирование льда в задачах с конечноэлементной постановкой // Дифференциальные уравнения и процессы управления. 2008. № 4. С. 19–29. [*V. Lobanov*. FEM-based ice simulation // Differential equations and control processes. 2008; 4: 19–29. (*in Russian*)].
41. *Лобанов В.А.* Оценка ледовой ходкости судов численными методами // Дифференциальные уравнения и процессы управления. 2011. № 1. С. 34–47. [*V. Lobanov*. Numerical assessment of ice propulsion performance for ships // Differential equations and control processes. 2011; 1: 34–47. (*in Russian*)].
42. *Лобанов В.А.* Применение CAE-систем для оценки ледовых качеств судна. Ходкость // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта.2011. № 29. С. 23–39. [*V. Lobanov*. Application of CAE-systems in ice performance assessment of ship. Propulsion // Bulletin of Volga State University of Water Transport. 2011; 29: 23–39. (*in Russian*)].
43. *Лобанов В.А.* Ледовая ходкость сухогруза смешанного плавания // Интернет-журнал «Науковедение». 2013. № 4(17). С. 71. [*V. Lobanov*. Ice propulsion performance of mixed-navigation cargo ship // Naukovedenie (Science of Science) Internet Journal. 2013; 4(17): 71. (*in Russian*)].
44. *Лобанов В.А.* Пропульсивные качества комплекса винт-насадка во льдах // Интернет-журнал «Науковедение». 2015. Т. 7. № 1(26). С. 75. [*V. Lobanov*. Ice propulsion performance of propeller-duct system. Naukovedenie (Science of Science) Internet Journal. 2015. Vol. 7. No. 1(26). P. 75. (*in Russian*).
45. *Лобанов В.А.* Пропульсивные качества винторулевой колонки во льдах // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. 2016. № 46. С. 171–182. [*V. Lobanov*. Ice propulsion performance of pod unit // Bulletin of Volga State University of Water Transport. 2016; 46: 171–82. (*in Russian*)].
46. *Лобанов В.А., Хвостов Р.С.* Общие сведения о CAE-системах. Особенности их использования в задачах ледотехники // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. 2016. № 48. С. 230–249. [*V. Lobanov, R. Khvostov*. General data on CAE systems. Peculiarities of their application in ice engineering // Bulletin of Volga State University of Water Transport. 2016; 48: 230–49. (*in Russian*)].
47. *Лобачев М.П., Сазонов К.Е.* Исследование некоторых аспектов гидромеханики судов двойного действия // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2005. Вып. 24(308). С. 89–98. [*M. Lobachev, K. Sazonov*. Some aspects of fluid mechanics for dual-action ships // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2005; 24(308): 89–98. (*in Russian*)].

48. *Лобачев М.П., Сазонов К.Е.* Гидродинамические аспекты взаимодействия движителей со льдом // Мир транспорта. 2009. № 1. С. 4–12. [*M. Lobachev, K. Sazonov*. Hydrodynamic aspects of propulsor-hull interaction // World of Transport and Transportation. 2009; 1: 4–12. (*in Russian*)].
49. *Лобачев М.П., Сазонов К.Е., Таранов А.Е.* Опыт применения методов численной гидродинамики при решении задач морской ледотехники // Сб. докладов конференции «Суперкомпьютерные технологии в промышленности», СКТП-2014. 2014. С. 71–73. [*M. Lobachev, K. Sazonov, A. Taranov*. Experience of applying CFD methods in ice engineering // Compendium of papers, Supercomputer technologies: industrial applications conference. St. Petersburg, 2014. P. 71–73. (*in Russian*).
50. *Лопашев К.А., Сазонов К.Е., Тимофеев О.Я.* Ледовые натурные испытания ледокола «Новоросийск» в Карском море // Труды Крыловского государственного научного центра. 2017. Вып. 3(381). С. 35–42. [*K. Lopashev, K. Sazonov, O. Timofeev*. Full-scale ice trials of *Novorossiysk* icebreaker in the Kara Sea // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2017; 3(381): 35–42. (*in Russian*)].
51. *Клейн А.Э., Третьяков В.Ю., Фролов С.В.* Устройство для измерения толщины льда с борта судна. Патент на полезную модель RUS 70983, 26.11.2007. [*A. Klein, V. Tretyakov, S. Frolov*. Device for ice thickness measurements from ship board. Patent for useful model RUS 70983, 26.11.2007. (*in Russian*)].
52. *Пустошный А.В.* Проблемы ходкости транспортных судов. СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2016. [*A. Pustoshny*. Propulsion performance of cargo ships. St. Petersburg: KSRC, 2016. (*in Russian*)].
53. *Пустошный А.В., Сазонов К.Е.* Задачи судостроительной науки на современном этапе освоения Арктики // Вестник РАН. 2015. Т. 85. № 7. С. 593–597. [*A. Pustoshny, K. Sazonov*. Tasks of shipbuilding science at the current stage of Arctic developments // Vestnik of Russian Academy of Sciences. 2015. Vol. 85. No. 7. P. 593–597. (*in Russian*)].
54. *Рывлин А.Я., Хейсин Д.Е.* Испытания судов во льдах. Л.: Судостроение, 1980. [*A. Ryvlin, D. Kheisin*. Ice tests of ships. Leningrad: Sudostroyeniye, 1980. (*in Russian*)].
55. *Сазонов К.Е.* Форсирование торосов ледоколами задним ходом // Морской вестник. 2005. № 1(13). С. 84–86. [*K. Sazonov*. Astern passage of icebreakers through ridges // Morskoy Vestnik. 2005; 1(13): 84–6. (*in Russian*).
56. *Сазонов К.Е.* Проводка крупнотоннажных судов ледоколами в условиях сжатия льда // Морской вестник. 2006. № 4(20). С. 83–85. [*K. Sazonov*. Icebreaker pilotage of large ships in closing channels // Morskoy Vestnik. 2006; 4(20): 83–5. (*in Russian*)].
57. *Сазонов К.Е.* О возможности использования ледоколов для снижения ледовой нагрузки на морские инженерные сооружения // Морской вестник. 2007. № 4. С. 71–74. [*K. Sazonov*. On possibility to use icebreakers for mitigation of ice load on marine facilities // Morskoy Vestnik. 2007; 4: 71–4. (*in Russian*)].
58. *Сазонов К.Е.* Ледовые бассейны / *Борусевич В.О., Русецкий А.А., Соловьев И.А.* Современные гидродинамические лаборатории. СПб.: 2008. С. 178–208. [*K. Sazonov*. Ice basins / *V. Borusevich, A. Rusetsky, I. Solovyev*. Modern hydrodynamic laboratories. St. Petersburg, 2008. P. 178–208. (*in Russian*)].
59. *Сазонов К.Е.* Скейлинговые соотношения в ледовой ходкости судов // Морской вестник. 2010. № 3(35). С. 104–105. [*K. Sazonov*. Scaling relationships in ice propulsion performance of ships // Morskoy Vestnik. 2010; 3(35): 104–5. (*in Russian*)].
60. *Сазонов К.Е.* Теоретические основы плавания судов во льдах. СПб.: ЦНИИ им. академика А.Н. Крылова, 2010. [*K. Sazonov*. Theoretical fundamentals of ice navigation. St. Petersburg: KSRC, 2010. (*in Russian*)].
61. *Сазонов К.Е.* Развитие морской ледотехники в России: история и современность // Арктика: экология и экономика. 2013. № 2(10). С. 92–103. [*K. Sazonov*. Development of marine ice engineering in Russia: history and state of the art // Arctic: Ecology and Economy. 2013; 2(10): 92–103. (*in Russian*)].
62. *Сазонов К.Е.* Расчет максимального усилия, действующего на судно при взаимодействии с торосами // Судостроение. 2013. № 5. С. 30–31. [*K. Sazonov*. Calculation of the maximum force exerted on the ship interacting with ridges // Sudostroyeniye (Shipbuilding). 2013; 5: 30–1. (*in Russian*)].
63. *Сазонов К.Е.* Оценка изменений тяговых характеристик движительного комплекса судна, двигающегося задним ходом во льдах // Науч.-тех. Сб. Российского морского регистра судоходства. 2015. № 38–39. С. 97–100. [*K. Sazonov*. Assessing the changes in thrust parameters of ship moving astern in ice // Compendium of papers, Russian Maritime Registry of Shipping. 2015; 38–39: 97–100. (*in Russian*)].
64. *Сазонов К.Е.* Обоснование методов коррекции результатов модельных экспериментов по опре-

делению ледового сопротивления судна // Труды Крыловского государственного научного центра. 2016. Вып. 92(376). С. 93–108. [*K. Sazonov*. Validation of methods for correction of ice resistance model test results // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2016; 92(376): 93–108. (*in Russian*)].

65. *Сазонов К.Е.* Методы коррекции экспериментальных данных по ледовой ходкости судна в модельных и натурных условиях // Полярная механика. 2016. № 3. С. 406–416. [*K. Sazonov*. Test data correction methods for model and full-scale ice propulsion performance of ships // Polyarnaya Mekhanika (Polar Mechanics). 2016; 3: 406–16. (*in Russian*)].
66. *Сазонов К.Е.* О возможном механизме влияния снежного покрова на ледовое сопротивление судов // Полярная механика. 2016. № 3. С. 417–427. [*K. Sazonov*. On possible mechanism of snow cover contribution to ice resistance of ships // Polyarnaya Mekhanika (Polar Mechanics). 2016; 3: 417–27. (*in Russian*)].
67. *Сазонов К.Е.* К вопросу о корректировке данных ходовых натурных испытаний судов в ледовых условиях // Проблемы Арктики и Антарктики. 2016. № 3(109). С. 94–99. [*K. Sazonov*. On correcting the results of full-scale ship trials in ice conditions // Problemy Arktiki i Antarktiki (Arctic and Antarctic Matters). 2016; 3(109): 94–9. (*in Russian*)].
68. *Сазонов К.Е., Добродеев А.А.* Исследование прочности льда на изгиб в северо-восточной части Каспийского моря // Проблемы Арктики и Антарктики. 2014. № 3(101). С. 62–68. [*K. Sazonov, A. Dobrodeev*. Ice bending strength studies in the North East Caspian // Problemy Arktiki i Antarktiki (Arctic and Antarctic Matters). 2014; 3(101): 62–8. (*in Russian*)].
69. *Сазонов К.Е., Добродеев А.А.* Взаимосвязь развития судостроения и освоения Арктики // Труды международной научной конференции «Арктика: история и современность». 2016. С. 241–250. [*K. Sazonov, A. Dobrodeev*. Synergy of shipbuilding progress and Arctic developments // Compendium of Papers, International Scientific Conference Arctic: History and Modernity. 2016. P. 241–50. (*in Russian*)].
70. *Сазонов К.Е., Добродеев А.А.* Ледовая ходкость крупнотоннажных судов. СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2017. [*K. Sazonov, A. Dobrodeev*. Ice propulsion performance of large ships. St. Petersburg: KSRC, 2017. (*in Russian*)].
71. *Сазонов К.Е., Чернов А.В.* Экспериментальные методы определения глобальной ледовой нагрузки на морские инженерные сооружения // Арктика: экология и экономика. 2016. № 2(22). С. 90–97. [*K. Sazonov, A. Chernov*. Experimental determination methods for global ice load on marine facilities // Arctic: Ecology and Economy. 2016; 2(22); 90–7. (*in Russian*)].
72. *Третьяков В.Ю., Фролов С.В., Клейн А.Э.* Методика расчета скорости сложения канала в ледяном покрове по данным телевизионных снимков // Метеорологический вестник. 2010. Т. 3. № 2. С. 12–29. [*V. Tretyakov, S. Frolov, A. Klein*. Calculation procedure for ice channel closing as per television imagery data // Meteorological Bulletin. 2010. Vol. 3. No. 2. P. 12–29. (*in Russian*)].
73. *Цой Л.Г.* Морские ледоколы. Особенности проектирования. СПб.: СПбГМТУ, 2003. [*L. Tsoy*. Seagoing icebreakers. Design specifics. St. Petersburg: St. Petersburg State Maritime Technical University, 2003. (*in Russian*)].
74. *Щербаков И.В., Гулиев М.А., Михайлов А.А., Шевченко Д.В.* Определение ледового сопротивления ледоколов на ранних стадиях проектирования // Морской вестник. 2009. № 3(31). С. 79–82. [*I. Sherbakov, M. Guliev, A. Mikhailov, D. Shevchenko*. Ice resistance determination for icebreakers at early design stages // Morskoy Vestnik. 2009; 3(31): 79–82. (*in Russian*)].
75. *Akinturk A., Lau M.* Manoeuvring performance of podded propulsors behind a ship // Ships and Offshores Structures. 2011; 6(3): 223–30.
76. *Andryushin A.V., Hänninen S.*, Heideman T. “Azipod” Azimuth Thruster for large capacity arctic transport ship with high ice category Arc7. Ensuring of operability and operating strength under severe ice conditions // Proc. of the 22nd Int. Conf. on Port Engineering under Arctic Conditions, POAC’13. Espoo, Finland. June 9–13, 2013.
77. *Appolonov E.M., Nesterov A.B., Sazonov K.E.* Regulation of extreme ice loads acting on hall of azimuth propulsion systems for ice ships // Ships and Offshores Structures. 2011; 6(3): 239–47.
78. *Bach C., Myland D.* An experimental method for model propeller-ice interaction in air: concept and first results // Proceedings of the ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2017. Trondheim, Norway. June 25–30, 2017.
79. *Bekker A.* et al. Full-scale measurements on a polar supply and research vessel during maneuver tests in an ice field in the Baltic Sea // Proceedings of the ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE 2014. San Francisco, California, USA. June 8–13, 2014. OMAE2014-24128.

80. *Belyashov V.A., Grozdov A.V., Sazonov K.E., Tumashik A.P.* “Yury Topchev” and “Vladislav Strizhov” multipurpose ice-breaking vessels for Prirazlomnaya platform maintenance: field and model tests // Proc. of the 8th Int. Conf. and Exhibition on Performance of Ship and Structures in Ice, ICETECH’08. Banff, Alberta, Canada. 2008.
81. *Cok L., Sazonov K.E., Beljashov V.A., Shaposhnikov V.M., Nesterov A.B., Putorti E.* Ice going capability of small unconventional vessel in the Kashagan field // Proceedings of the 21st International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC’11. Montréal, Canada. July 10–14, 2011. POAC11-052.
82. *Das J., Ehlers S.* Numerical simulation of crushing and bending failure of ice using SPH // Proceedings of the ASME 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2015. 2015. OMAE2015-41266.
83. *Das J., Polic D., Ehlers S., Amdahl J.* Numerical simulation of an ice beam in four point bending using SPH // Proceedings of the ASME 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2014. 2014. OMAE2014-23228.
84. *Dobrodeev A.A., Sazonov K.E., Timofeev O.Y.* Ice class! // The Naval Architect. 2015: 43–5.
85. *Dobrodeev A.A., Sazonov K.E., Timofeev O.Y.* New ice basin of Krylov state research centre // Proc. of the 23rd Int. Conf. on Port Engineering under Arctic Conditions, POAC’15. Norway, Trondheim. June 14–18, 2015: 81–2.
86. *Dobrodeev A., Sazonov K., Andryushin A., Fedoseev S., Gavrilov S.* Experimental Studies of Ice Loads on Pod Propulsors of Ice‑Going Support Ships. Proceedings of the 24th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC’17. Busan, Korea. June 11–16, 2017.
87. *Enkvist E.* On the Ice Resistance Encountered by Ships Operating in The Continuous Mode of Icebreaking. 1972. Report No. 24. The Swedish Academy of Engineering Science in Finland. Helsinki, Finland.
88. *Evers K.-U.* Model Tests with Ships and Offshore Structures in HSVA's Ice Tanks // Proc. of the 24th Int. Conf.on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC’’ 17. Busan, Korea. June 11–16, 2017.
89. *Evers K.-U., Reimer N.* Wave propagation in ice – a laboratory study // Proc. of the 23rd Int. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC’15. Trondheim, Norway. June 14–18, 2015.
90. *Ha J.S., Cho S.R., Jeong S.Y., Yeom J.G., Kang K.J.* An experimental study on a new method used to prepare granular EG/AD model ice // Proc. of the 23rd Int. Conf. on Port Engineering under Arctic Conditions, POAC’15. Norway, Trondheim. June 14–18, 2015.
91. Ice class regulations 2010. Finnish-Swedish ice rules 2010. 23/11/2010. TRAFI/31298/03.04.01.00/2010.
92. *Ikonen T., Peltokorpi O., Karhunen J.* Inverse ice-induced moment determination on the propeller of an ice-going vessel // Cold Regions Science and Technology. 2015; 112: 1–13.
93. ITTC – Recommended Procedures and Guidelines. Full Scale Measurements, Ice Testing Ship Trials in Ice. 7.5 – 04 – 03 – 01. 1999: 8.
94. ITTC – Recommended Procedures and Guidelines, Test Methods for Model Ice Properties. 7.5 – 02 – 04 – 02. 2014: 19.
95. ITTC – Recommended Procedures and Guidelines, Resistance Test in Ice. 7.5 – 02 – 04 – 02.1. 2017: 8.
96. ITTC – Recommended Procedures and Guidelines, Propulsions Test in Ice. 7.5 – 02 – 04 – 02.2. 2017: 8.
97. ITTC – Recommended Procedures and Guidelines, General Guidance and Introduction to Model Testing. 7.5 – 02 – 04 – 01. 2017: 10.
98. *Ji S., Kong S.,* Interaction between Level Ice and Ship Hull based on DEM simulations // Proceedings of the 23rd IAHR In. ternational Symposium on Ice. 2016.
99. *Jochmann P.* et al. The Specialist Committee on Ice. Proc. of the 27th ITTC Conference, Copenhagen. 2014; 2: 726–47.
100. *Johnston M., Timco G., Frederking R., Miles M.* Whole-ship motions of USCGC Healy as applied to global ice impact forces // Proc. of the 24th Int. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC' 01. Ottawa, Ontario, Canada. August 12–17, 2001. P. 955–64.
101. *Kanevsky G.I., Klubnichkin A.M., Ryzhkov A.V., Sazonov K.E.* Propulsion prediction of the Arctic combatant moving in the ice field // Proc. of the 24th Int. Conf. Navy and Shipbuilding Nowadays. St. Peterburg, Russia. June 29–30, 2017: 57–63.
102. *Karulin E., Karulina M.* Simulating of ridge keel behaviour in direct shear and punch tests by discrete element method // Proc. of 16th Int. Symposium on Ice. 2002; 3: 143–51.
103. *Karulin E.B., Karulina M.M.* Numerical and physical simulations of moored tanker behavior // Ships and Offshores Structures. 2011; 6(3): 179–84.
104. *Kim H., Im N., Sawamura J.* Experimental and Numerical Investigation of Ship‑Ice Interactions in Pack Ice // Proc. of the 24th Int. Conf. on Port and Ocean Engineer-

ing under Arctic Conditions, POAC' 17. Busan, Korea. June 11–16, 2017.

105. *Kinnunen A., Tikanmäki M., Heinonen J., Kurkela, Koskinen P., Jussila M.* Azimuthing thruster ice load calculation. VTT Research Report VTT-R-08842 08842-12. 2012.

106. *Konno A.* Resistance evaluation of ship navigation in brash ice channels with physically based modeling // Proc.of the 20th Int. Conf. on. Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC 2009. Luleå, Sweden.

107. *Konno A., Nakane A.* and *Kanamori S.* Validation of numerical estimation of brash ice channel resistance with model tests // Proc. of the 22nd Int. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC2013. Espoo, Finland.

108. *Konno A.* et al. The Specialist Committee on Ice. Proc. of the 28th ITTC Conference. 2017; 2: 639–60.

109. *Krupina N.A., Likhomanov V.A., Chernov A.V., Gudoshnikov Y.P.* Full-scale ice impact study of icebreaker Kapitan Nikolaev: general description // Proc. of 19th Int. Offshore (Ocean) and Polar Engineering Conference, ISOPE-2009. Osaka, Japan. June 21–26, 2009. Paper TPC-463.

110. *Kuulialaa L., Kujalaa P., Suominena M., Montewka J.* Estimating operability of ships in ridged ice fields // Cold Regions Science and Technology. 2017; 135: 51–61.

111. *Lau M.* Model-scale/full-scale correlation of NRC-OCRE's model resistance, propulsion and maneuvering test results // Proc.of the ASME 2015 34th Int. Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2015. OMAE2015-42114.

112. *Lau M.* Friction Correction for Model Ship Resistance and Propulsion Tests in Ice // Proc. of the 24th Int. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions Busan, Korea, June 11–16, 2017. POAC17–125.

113. *Lau M., Wang J., Lee C.* Review of ice modeling methodology // Proc. of the 19th Int. Conf. on Port Engineering under Arctic Conditions, POAC'07. China, Dalian. June 27–30, 2007. P. 350–362.

114. *Lau M., Lawrence K.P., Rothenburg L.* Discrete element analysis of ice loads on ships and structures // Ships and Offshores Structures. 2011; 6(3): 211–21.

115. *Lau M., Liu J.C., Derradji-Aouat A., Williams F.M.* Preliminary results of ship maneuvering in ice experiments using a planar motion mechanism // Proc. 17th Int. Symp. on Ice. 2004; 1: 479–87.

116. *Lee C.-J., Lau M., Wang J.-W., Ahn H.-S., Lee Y.-Y., Yoo J.-H., Choi H.-S.* A Conceptual Design of MOERI's Ice Model Basin // Proc. of the 16th Int. Offshore and Polar Engineering Conf. Lisbon, Portugal. July 1–6, 2007.

117. *Lee C.-J., Cho S.-R., Jeong S.-Y., Chun E.-J.* MOERI's Ice Model Test for Korean Icebreaking Research Vessel // Proc. of Int. Conf. and Exib. on Performance of ship and structures in ice. Anchorage, Alaska, USA. September 20–23, 2010.

118. *Lee C.-J., Jeong S.Y., Kim H.S.* The ice field tests of Korean icebreaker research vessel // Proc. of the 21st Int. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC2011. Montréal, Canada. 2011.

119. *Likhomanov V.A., Krupina N.A., Chernov A.V., Gudoshnikov Y.P.* Results of definition of the global ice load during in situ research on impact of the icebreaker Kapitan Nikolaev on various ice formations // Proc. of 19th Int. Offshore (Ocean) and Polar Engineering Conf., ISOPE-2009. Osaka, Japan. 21–26 June, 2009. Paper TPC-465.

120. *Lindqvist G.* A straightforward method for calculation of ice resistance of ships // Proc. of POAC. 1989: 722–35.

121. *Lindstrom C.-A.* Numerical simulation of ship manoeuvring motion in level ice // Proc. of Int. Conf. On Development and Commercial Utilization of Technologies in Polar Region, Polartech'90. Copenhagen, Denmark. 1990: 198–208.

122. *Liu L., Ji S.* Bond model of dilated polyhedral DEM and its applications in sea ice simulation // Proc. of the 24th Int. Conf.on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC' 17. Busan, Korea. June 11–16, 2017.

123. *Nyman T.* et al. The ice capability of the multipurpose icebreaker Botnica – Full scale results // Proc. of the 15th Int. Conf. On Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC'99. Espoo, Finland. August 23–27, 1999; 2: 631–43.

124. *Palmer A., Dempsey J.* Model tests in ice. / Proc. of the 20th Int. Conf. on Port Engineering under Arctic Conditions (POAC'09), Sweden, Luleå, June 9–12, 2009.

125. *Palmer A., Croasdale K.* Arctic Offshore Engineering. World Scientific Publ., 2013.

126. *Patil A., Sand B., Fransson L.* Smoothed particle hydrodynamics and continuous surface cap model to simulate ice rubble in punch through test // Proc. of the 23rd Int. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC' 15. Norway, Trondheim. June 14–18, 2015.

127. *Perälä I., Kinnunen A., Koskinen P., Heinonen J.* Full-scale ice impact to an azimuthing thruster in laboratory conditions // Proc. of the 24th Int. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC'17. Busan, Korea. June 11–16, 2017.

128. Proc. of the 26th ITTC Conf. Rio de Janairo. 2011; 2.

129. *Riska K., Leiviskä T., Nyman T., Fransson L., Lehtonen J., Eronen H., Backman A.* Ice performance of the swedish multi-purpose icebreaker Tor Viking II // Proc. of the 20th Int. Conf. on Port Engineering under Arctic Conditions, POAC'01. Ottawa, Ontario, Canada. August 12–17, 2001.
130. *Sampson R., Atlar M., Sasaki N.* Propeller ice interaction – effect of milling // Proc. of the 20th Int. Conf. on Port Engineering under Arctic Conditions, POAC'09. Sweden, Luleå. June 9–12, 2009.
131. *Sawamura J.* 2D numerical modeling of icebreaker advancing in ice-covered water // Proc. of the 24th Int. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC'17. Busan, Korea. June 11–16, 2017.
132. *Sawamura J., Kioka S., Konno A.* Experimental and numerical investigation on ice submerging for icebreaker with 2D model test using synthetic ice // Proc. of the 23rd Int. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC' 15. Norway, Trondheim. June 14–18, 2015.
133. *Sodhi D.S., Griggs D.B., Tucker W.B.* Ice performance tests of USCGC Healy // Proc. of the 24th Int. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC'01. Ottawa, Ontario, Canada. August 12–17, 2001.
134. *Su B., Riska K., Moan T.* A numerical method for the prediction of ship performance in level ice // Cold Reg. Sci. Technol. 2010; 60: 177–88.
135. *Su B., Riska K., Moan T.* Numerical simulation of local ice loads in uniform and randomly varying ice conditions. Cold Reg. Sci. Technol. 2011; 65: 145–59.
136. *Su B., Skjetne R., Berg T.E.* Numerical assessment of a double-acting offshore vessel's performance in level ice with experimental comparison. Cold Reg. Sci. Technol. 2014; 106–107: 96–109.
137. *Suominen M., Kujala P.* Ice model tests in compressive ice // 21st IAHR Int. Symp. on Ice, Ice Research for Sustainable Environment. Dalian, China. June 11–15, 2012: 1046–57.
138. *Suominen M., Karhunen J., Bekker A., Kujala P., Elo M., von Bock und Polach R., Enlund H., Saarinen S.* Full-scale measurements on board PRSV S.A. Agulhas II in the Baltic Sea // Proc. of the 22nd Int. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC2013. Espoo, Finland. 2013.
139. *Tan X.* Numerical investigation of ship's continuous-mode icebreaking in level ice (Doctoral thesis). Norway, Norwegian University of Science and Technology, Department of Marine Technology, 2014.
140. *Tan X., Riska K., Moan T.* Effect of dynamic bending of level ice on ship's continuous-mode icebreaking. Cold Reg. Sci. Technol. 2014. 106–107: 82–95.
141. *Tan X., Su B., Riska K., Moan T.* A six-degrees-of-freedom numerical model for level ice-ship interaction. Cold Reg. Sci. Technol. 2013; 92: 1–16.
142. *Valanto P.* Numerical prediction of ice loads and resistance of ships advancing in level ice // Proc. of 6th Int. Conf. on Ships and Marine Structures in Cold Regions, ICETECH'2000. 2000: 215–230.
143. *Valanto P.* On computed ice load distributions, magnitudes and lengths on ship hulls moving in level ice // Proc. of the 20th Int. Conf. on Port Engineering under Arctic Conditions, POAC'09. Sweden, Luleå. June 9–12, 2009.
144. *Varsta P.* On the mechanics of ice load on ships in level ice in the Baltic Sea. Publications 11. Finland, Espoo: Technical Research Centre of Finland. 1983.
145. *von Bock und Polach R.* Numerical analysis of the bending strength of model-scale ice // Cold Reg. Sci. Technol. 2015; 118: 91–104.
146. *von Bock und Polach R., Ehlers S.* Heave and pitch motions of a ship in model ice: An experimental study on ship resistance and ice breaking pattern // Cold Reg. Sci. Technol. 2011; 68: 49–59.
147. *von Bock und Polach R., Ehlers S.* Model scale ice – part b: numerical model // Cold Reg. Sci. Technol. 2013; 94: 53–60.
148. *von Bock und Polach R., Molyneux D.* Model ice: a review of its capacity and identification of knowledge gaps // Proc. of the ASME 2017 36th Int. Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2017. Trondheim, Norway. June 25–30, 2017.
149. *von Bock und Polach R., Ehlers S., Kujala P.* Model scale ice – part a: experiments. /Cold Reg. Sci. Technol. 2013; 94: 74–81.
150. *Wilkman G.* et al. Full scale experience of double acting tankers (DAT) Mastera and Tempera // Proc. of the 17th Int. Symp. on Ice. 2004; 1: 488–97.
151. *Wilkman G., Forsén A.-C., Mattsson T.* Latest development in ice model testing // Proc. of the 8th Int. Conf. and Exhibition on Performance of Ship and Structures in Ice, ICETECH'08. Banff, Alberta, Canada, 2008.
152. *Wilkman G., Elo M., Lönnberg L., Kunnari J.* Ice trials of MV Norilskiy Nickel in march 2006 // Proc. of the 19th Int. Conf. on Port Engineering under Arctic Conditions, POAC'07. China, Dalian. June 27–30, 2007. P. 405–17.
153. *Zabilansky L.J., Sodhi D.S., Stanley J.M., Courville Z.R., Haskins K.L., Story J.M.* Interaction between brash ice and boat propulsion systems // Cold Regions Research and Engineering. Laboratory US Army Engineer Research and Development Center. ERDC TR-14-1. 2014. P. 85.

Сведения об авторе

Сазонов Кирилл Евгеньевич, д.т.н., профессор, начальник лаборатории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: 8 (812) 415-45-23. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

About the author

Sazonov, Kirill Ye., D. Sc., Prof., Head of Laboratory, KSRC. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: 8 (812) 415-45-23. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Поступила / Received: 06.02.18
Принята в печать / Accepted: 04.06.18
© Сазонов К.Е., 2018