УДК 629.5.021.18+629.5.018.13
EDN: IDLSVF

А.А. Добродеев[1,2], К.Е.Сазонов[1,2]
[1] ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия
[2] ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», Санкт-Петербург, Россия

МОРСКАЯ ЛЕДОТЕХНИКА: НЕКОТОРЫЕ ИТОГИ

Объект и цель научной работы. Объектом исследования является развитие морской ледотехники за прошедшие 70 лет.
Материалы и методы. Материалами для работы являются основные публикации по морской ледотехнике за время ее развития и становления в современную техническую науку. Отдельно рассматривается развитие теоретического, экспериментального и прикладного направлений этой науки.
Основные результаты. Показано, что формирование морской ледотехники завершилось созданием специфического экспериментального метода исследований с помощью проведения модельных испытаний в ледовых бассейнах. Их появление служило мощным стимулом для развития как теоретических исследований, так и прикладного направления. Постепенно темп развития науки замедлялся, и на современном этапе ее можно охарактеризовать как «нормальную науку» (по Т. Куну), которая занимается решением «головоломок» в рамках сложившейся в ней парадигмы.
Заключение. Подведены некоторые итоги развития морской ледотехники как полноправного научного направления. Показано, что за последние 70 лет она оформилась в самостоятельную техническую науку со специфическими объектами исследования, которые функционируют в весьма сложной природной среде.
Ключевые слова: морская ледотехника, ледовый бассейн, теоретические и экспериментальные исследования, прикладное направление.
Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

УДК 629.5.021.18+629.5.018.13
EDN: IDLSVF

A.A. Dobrodeev[1,2], K.E. Sazonov[1,2]
[1] Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia
[2] St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

MARINE ICE ENGINEERING: CERTAIN MILESTONES

Object and purpose of research. This paper describes the progress in marine ice engineering over the last 70 years.
Materials and methods. This paper contemplates major publications in marine ice engineering over its formative years as it was maturing into a modern technical science in its own right. The evolution of its theoretical, experimental and applied studies is tackled separately.
Main results. It is shown that marine ice engineering eventually worked out its distinct method of experimental studies, i.e. model tests in ice basins. Their advent became a powerful stimulus for both fundamental and applied research. Marine ice engineering as a branch of scientific knowledge has now reached its adulthood, becoming a “normal science” in Thomas Kühn’s understanding of this expression, i.e. a puzzle-solving process following a certain paradigm.
Conclusion. This publication is an attempt to summarize certain milestones in the development of ice engineering as a scientific discipline in its own right. It is shown that over the last 70 years it has reached its full maturity as an independent science, with its peculiar objects of research functioning in a highly complex natural environment.
Keywords: marine ice engineering, ice basin, theoretical and experimental studies, applied research.
The authors declare no conflicts of interest.

Введение

Морская ледотехника – инженерная наука, формирование которой началось во второй половине XIX в. Она является частью более общей технической науки – ледотехники. Появление морской ледотехники можно связать с началом строительства и эксплуатации первых ледоколов. На начальных

Для цитирования: Добродеев А.А., Сазонов К.Е. Морская ледотехника: некоторые итоги. Труды Крыловского государственного научного центра. 2024; Специальный выпуск 1: 23–29.
For citations: Dobrodeev A.A., Sazonov K.E. Marine ice engineering: certain milestones. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2024; Special Issue 1: 23–29 (in Russian).

этапах большой вклад в ее развитие внесли российские ученые и инженеры Р.И. Рунеберг, В.И. Афанасьев, С.О. Макаров, А.Н. Крылов и др. [1–3].

Из истории науки хорошо известно, что важнейшими условиями возникновения новой науки является формирования в ней теоретического, прикладного и экспериментального направлений [4]. Вплоть до 1955 г. формирование морской ледотехники не было закончено, т.к. практически отсутствовали серьезные экспериментальные исследования, за исключением натурных испытаний ледовой прочности судов.

Ситуация резко изменилась после введения в эксплуатацию первого ледового бассейна в Арктическом институте [5]. Модельные испытания впервые позволили измерить величину ледовых сил, действующих на различные инженерные объекты. С тех пор, вот уже почти 70 лет, морская ледотехника развивается как полноправное научное направление. Поэтому представляется интересным подвести некоторые итоги ее развития.

Теоретическое направление

Появившаяся возможность непосредственного измерения ледовых сил, а именно сопротивление льда движению судна, позволила начать изучение ледовой ходкости судов и, прежде всего, сопротивления льда движению судна.

Первоначально усилия исследователей были направлены на создание полуэмпирических методов расчета сопротивления. Методологические основы таких исследований заложены академиком Ю.А. Шиманским [6]. Суть этой методологии заключалась в разбиении ледового сопротивления судна на сумму ряда составляющих (например, на составляющие, зависящие от разрушения льда или поворота и притапливания обломанных льдин). Для этих и других составляющих разрабатывались простейшие математические модели, как правило, в виде степенного одночлена, представляющего произведение различных физических параметров, характеризующих рассматриваемую составляющую сопротивления. При этом некоторые из параметров могли входить в выражение возведенными в известную или неизвестную степень. Перед каждым из таких одночленов вводится неизвестный коэффициент. Неизвестные коэффициенты и степени регрессионного анализа данных модельного эксперимента определялись таким образом, чтобы обеспечивалось наилучшее совпадение результатов расчетов с экспериментальными данными.

При создании этой методики Ю.А. Шиманский не преследовал цель создать метод расчета ледового сопротивления. Он хотел создать математический инструмент, который позволял бы корректировать данные модельного эксперимента в ледовом бассейне для приведения его к единым значениям характеристик ледовой среды [7]. Подбор эмпирических коэффициентов по результатам большой серии модельных испытаний был выполнен В.И. Каштеляном. В итоге он получил расчетную формулу [5], за которой закрепилось его имя. Эта формула стала использоваться для расчета ледового сопротивления натурных судов. В рамках созданной методологии А.Я. Рывлин разработал метод расчета сопротивления мелкобитого льда движению судна [5 и др.].

В России наиболее эффективный полуэмпирический метод расчета ледового сопротивления судна в сплошных ровных льдах был предложен Б.П. Ионовым [8]. Этот метод с успехом применяется и в настоящее время. За рубежом также было предложено множество полуэмпирических методов расчета ледового сопротивления, среди которых необходимо отметить метод Г. Линдквиста [9], который также используется до сих пор. Подробный обзор этих методов содержится в работе [8].

Дальнейшее развитие методов расчета ледового сопротивления судна, движущегося в сплошных ровных льдах, продолжалось в направлении усложнения используемых математических моделей и учета картины разрушения ледяного покрова корпусом судна. Первые попытки учета влияния этой картины были предприняты в работах М.К. Тарписа и З.Б. Сегала [10]. Основным затруднением для таких методов является теоретическое описание картины разрушения ледяного покрова, которое до сих пор не получено. В современных расчетных методах используются эмпирические данные, полученные Э. Энквистом, В.А. Зуевым с сотрудниками и др. [8, 10]. Одним из первых был метод расчета ледового сопротивления Ю.Н. Алексеева и К.Е. Сазонова, который базировался на решении дифференциальных уравнений движения судна во льдах и использовал геометрическую модель картины разрушения ледяного покрова [10]. За рубежом близкий по методологии метод был разработан корейскими специалистами под руководством К. Риски [11].

В настоящее время прогресс в разработке теоретических методов расчета ледового сопротивления судна несколько застопорился. По нашему мнению, это обстоятельство связано с активными попытками применения исследователями для решения задач ледового сопротивления различных

пакетов прикладных программ в области общей механики и механики сплошной среды [12]. Это перспективное и важное научное направление, бесспорно, необходимо развивать, однако на этом пути возникли существенные трудности, связанные с описанием ледяного покрова. В России наиболее интересными представляются исследования В. Лобанова [13, 14 и др.].

В наибольшей степени теоретические исследования применялись при изучении ледовой управляемости судов, т.к. непосредственное измерение ледовых сил, действующих на криволинейно двигающийся корпус, весьма затруднительно. При этих исследованиях используется общепринятая гипотеза о том, что характер разрушения корпусом ледяного покрова при прямолинейном и криволинейном движении судна одинаков. Первые исследования движения судна во льдах на циркуляции были предприняты В.А. Трониным [15] и С.-А. Линдстремом [16]. Дальнейшая разработка математических моделей была продолжена К.Е. Сазоновым [17] и коллективом авторов под руководством К. Риски [18]. В результате этих исследований в настоящее время появилась возможность расчета криволинейного движения судна в сплошных ровных и битых льдах. Сейчас ведутся теоретические исследования процесса выхода судна из канала, проложенного ледоколом [19].

В конце XX в. в сфере интересов морской ледотехники появился новый объект исследования – ледостойкие морские инженерные сооружения. В теоретическом плане для их изучения была использована та же методика, апробированная на ледоколах и судах ледового плавания, т.е. разбиение глобальной ледовой нагрузки на ряд составляющих с последующим созданием для них математических моделей. Таковы широко применяющиеся и включенные во многие нормативные документы методы Т. Ралстона [20] и К. Кроасдайла [21]. Указанные методы позволяют рассчитывать глобальную ледовую нагрузку на инженерные сооружения от дрейфующего ровного льда.

В начале века большое количество работ было посвящено теоретическому исследованию особенностей взаимодействия инженерных сооружений с торосистыми образованиями, например [22, 23]. Эти исследования базировались на результатах, полученных в механике сыпучей среды. Однако в дальнейшем такие исследования практически прекратились, по-видимому, из-за исчерпания потенциала используемой модели.

В настоящее время развитие математического моделирования в морской ледотехнике (так же, как и в ледовой ходкости) идет по пути внедрения современных пакетов прикладных программ. Это многочисленные исследования по применению методов конечных и дискретных элементов – МКЭ и МДЭ. МКЭ обычно используется для моделирования процессов разрушения ледяного покрова, иногда он применяется для исследования взаимодействия льда с инженерным объектом. Основная трудность в применении МКЭ заключается в затруднениях при описании движения обломков льда, образовавшихся после его разрушения. МДЭ после его модификации для описания процессов разрушения льда стал использоваться для анализа ледовой нагрузки на морские сооружения [24, 25].

По мнению авторов, МДЭ является более перспективным для решения задач морской ледотехники. Однако ему присущи и недостатки, к которым можно отнести отсутствие обоснованной методики выбора размера дискретного элемента в зависимости от решаемой задачи, трудности с заданием закона для описания сил взаимодействия между элементами. Кроме этого, применение МДЭ требует значительных вычислительных ресурсов для описания взаимодействия инженерного сооружения со льдом, поэтому в современных работах рассматриваются только начальные этапы этого взаимодействия. Более подробно эти вопросы рассмотрены в работе [12].

Необходимо отметить еще одну опасность, возникающую в связи с повсеместным использованием прикладных пакетов программ для решения задач морской ледотехники. Доступность различных прикладных пакетов иногда вызывает у неспециалистов ощущение возможности решить любую задачу. К сожалению, все чаще и чаще приходится сталкиваться с публикациями, в которых предлагается решение различных задач только на основании результатов вычислений без какой-либо связи с результатами натурных и модельных наблюдений.

Экспериментальное направление

За последние почти 70 лет модельный и натурный эксперимент в морской ледотехнике прошел большой путь развития, т.к. он до сих пор остается основным источником получения информации о характере протекания процессов взаимодействия различных инженерных сооружений со льдом. Вопросы развития и современного состояния натурного и модельного эксперимента подробно освещены в недавно вышедшей монографии [26], поэтому здесь будут

указаны лишь основные направления развития экспериментальных исследований.

До момента появления ледовых бассейнов натурный эксперимент был единственным источником информации о характере взаимодействия инженерных объектов с ледяным покровом, несмотря на то, что он обладает рядом весьма существенных ограничений. Важнейшим недостатком натурного эксперимента является практическая невозможность измерения ледового сопротивления или глобальной ледовой нагрузки без привлечения дополнительных, часто сомнительных, предположений. Тем не менее до сих пор натурный эксперимент играет важную роль в морской ледотехнике.

В области ледовой ходкости только данные, полученные в таком эксперименте, являются основанием для подтверждения соответствия спецификации построенных ледоколов и судов ледового плавания. Для технических средств освоения шельфа замерзающих морей данные по измерению с помощью специальных датчиков локальной ледовой нагрузки позволяют получать важную информацию для проектирования таких объектов. В некоторых случаях для таких объектов удается (хотя и достаточно грубо) измерить и глобальную нагрузку [26].

Развитие методики проведения натурного эксперимента было, прежде всего, направлено на совершенствование методов регистрации параметров внешней среды (например, на создание телевизионных систем определения толщины льда у борта судна и регистрации степени сжатия льдов по скорости закрытия канала за судном), а также методов фиксации параметров движения судна. Здесь определяющую роль сыграло появление систем спутниковой навигации, которая с высокой точностью определяет не только скорость движения во льдах, но и координаты различных точек на судне. Это позволяет точно описывать выполняемые судном маневры и определять такие параметры движения, как угловая скорость и угол дрейфа.

Прогресс в области прогнозирования тяговых характеристик судов во льдах, выразившийся в создании альтернативной системы коэффициентов взаимодействия движителей судна с его корпусом [27], позволил расчетным путем определять тяговые характеристики судна для любого уровня мощности, скорости движения и частоты вращения движителей. Результаты таких расчетов представимы в виде удобных для использования диаграмм [28]. Появление указанных диаграмм позволило доработать методику проведения натурных испытаний судов и открыло возможность выполнять оценки ледового сопротивления по результатам таких испытаний [29].

В области модельного эксперимента развитие осуществлялось в следующих направлениях.

1. Совершенствование физических моделей моделированного льда. В настоящее время во всех ледовых бассейнах мира применяется одна из трех общепризнанных моделей: российская модель столбчатого льда, финская модель гранулированного льда и канадская модель трехкомпонентного льда. Подробно эти модели описаны в работах [8, 26]. Указанные модели разработаны еще в прошлом веке. В настоящий момент исследования, направленные на создание новых моделей, не ведутся.
2. Разработка методов моделирования в ледовом бассейне различных ледяных образований. В первых ледовых бассейнах моделировались лишь два типа ледяных образований: сплошной ровный лед и мелкобитый лед. К настоящему моменту номенклатура ледяных образований существенно расширилась. Стандартными стали испытания моделей в торосистых образованиях, в крупнобитом и тертом льду. В бассейнах часто проводятся испытания, в которых имитируются ледовые сжатия, наличие дна водоема и др.
3. Расширение номенклатуры технических объектов для проведения испытаний в ледовых бассейнах. Первоначально ледовые бассейны предназначались только для проведения исследований ледового сопротивления судов. Постепенно число исследуемых объектов увеличилось. Это движители и органы управления судном, стационарные и заякоренные ледостойкие шельфовые платформы, инфраструктура морских портов, включая протяженные гидротехнические сооружения. Изменилась и методика проведения экспериментов в бассейне. Если раньше при изучении ледовых качеств судов применялись только буксировочные испытания, то сейчас исследования проводятся практически всегда с самоходными моделями. Часто используется режим свободного самохода.

В России и некоторых других странах получили развитие малые ледовые бассейны, которые, как правило, создаются при университетах. Для намораживания льда в них обычно используют естественные отрицательные температуры воздуха в зимнее время. Работа в таких бассейнах требует большого

мастерства и упорства, т.к. там зачастую неприменимы приемы и методы, используемые в «больших» бассейнах. Все это часто требует разработки оригинальных методик приготовления моделированного ледяного покрова (как, например, в Нижегородской ледотехнической школе), а также создания оригинальных методик пересчета полученных результатов на натурные условия.

Прикладное направление

Это направление также получило существенное развитие. Если до создания ледовых бассейнов единственным инструментом, позволяющим осуществлять проектирование судна «по прототипу», были условные измерители Шиманского, то в настоящее время существует много разнообразных подходов оптимизации формы корпуса судна с точки зрения улучшения показателей ледовой ходкости и управляемости. Простейшим из них является проведение модельных испытаний нескольких конкурирующих друг с другом вариантов судна. Этот способ требует больших временных и финансовых затрат, поэтому используется крайне редко. Основная методика заключается в численной оптимизации проектируемого объекта с последующей проверкой при испытаниях в ледовом бассейне.

Теоретические и экспериментальные методы постоянно используются для решения насущных задач мореплавания во льдах. Примером решения такой задачи является экспериментальное исследование в ледовом бассейне Крыловского центра возможности буксировки «на усах» атомным ледоколом проекта 22220 крупнотоннажного балкера [30]. Эти исследования убедительно показали, что указанный прием, который часто применяется к обычным судам, не может быть использован для буксировки крупнотоннажных судов. Также были установлены условия, при которых такая буксировка возможна непродолжительное время.

Одним из важных направлений практического применения результатов теоретических и экспериментальных исследований стало использование полученных в них результатов в различных имитационных моделях, предназначенных для обоснования создания и расчетов параметров функционирования различных морских транспортных систем [31].

Также к развитию прикладного направления можно отнести появление в ряде высших учебных заведений учебной дисциплины «Морская ледотехника» [32] и издание учебных пособий по теме [33, 34].

Выводы

Выполненное рассмотрение развития морской ледотехники по указанным направлениям позволяет сделать следующие выводы.

1. Теоретическое направление исследований активно развивалось во второй половине XX в. и на рубеже веков. В это время постоянно совершенствовались методы расчета ледового сопротивления судна в сплошных ровных льдах, а также в мелкобитых льдах и торосистых образованиях. Разработанная для определения ледового сопротивления судна методология успешно применена при создании расчетных методов определения глобальной ледовой нагрузки на морские инженерные сооружения.

Затем процесс развития несколько замедлился. Основными причинами можно считать принципиальную разработку основ математического моделирования процессов движения судна во льдах и взаимодействия инженерных сооружений с ним. Фактически исследователям в этой области оставалось лишь уточнять модели и расширять сферу их применения. Появление нового объекта исследований, например, тертого льда, вызывало всплеск исследований с последующим снижением интереса [35]. Наиболее развивающимися в настоящее время являются исследования в области математического моделирования процессов взаимодействия инженерных объектов со льдом. Эти исследования, как правило, базируются на использовании современных пакетов прикладных программ. Это важное и интересное научное направление, однако пока существенных прорывов в нем не наблюдается.

В области теоретических исследований остается ряд нерешенных задач, к которым можно отнести изучение влияния снежного покрова на сопротивление судна, теоретическое объяснение известного эффекта снижения ледового сопротивления при движении судна во льдах кормой вперед и др.

2. Примерно та же картина наблюдается в экспериментальном направлении исследований. Активный поиск наиболее подходящей модели моделированного льда застопорился. Похоже, что наличие трех различных моделей вполне удовлетворяют исследователей.

Развитие модельного эксперимента в области имитации в бассейне новых типов ледовых условий практически подошло к концу, т.к. все значимые для изучения процессов взаимодействия льда с инженерными объектами в основном уже воспроизводятся в экспериментах. Стимулом для развития остаются новые необычные технические

объекты, для которых необходимо создавать новые методики выполнения модельного эксперимента в ледовом бассейне. Указанный стимул тесно связан с развитием прикладного направления исследований.

3. Развитие прикладного направления во многом определяется запросами практики. В XXI в. в арктическом судоходстве произошли значительные перемены, связанные с появлением новых для полярных регионов технических средств. Это подробно описано в работе [36]. Появление новых технических средств стимулировало постановку многих новых задач, которые решаются в рамках сложившихся в морской ледотехнике методов и подходов.

Подводя общий итог рассмотрения развития морской ледотехники за последние 70 лет, можно констатировать, что она оформилась в самостоятельную техническую науку со специфическими объектами исследования, которые функционируют в весьма сложной природной среде. Современное ее состояние можно охарактеризовать как «нормальную науку» (по Т. Куну [37]), которая занимается решением «головоломок» в рамках сложившейся парадигмы.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00039 «Теоретические основы и прикладные инструменты для создания системы интеллектуального планирования работы флота и поддержки принятия решений в арктическом судоходстве» (rscf.ru/project/23-19-00039/).

Список использованной литературы

1. *Сазонов К.Е.* Зарождение теории ледоколов: Роберт Руneберг // Судостроение. 2022. № 6 (865). С. 65–72.
2. *Сазонов К.Е.* Зарождение теории ледоколов: Василий Иванович Афанасьев // Судостроение. 2023. № 1 (866). С. 67–71.
3. *Сазонов К.Е.* Первые исследования прочностных свойств льда в России для нужд ледоколостроения // Вопросы истории естествознания и техники. 2023. Т. 44, № 1. С. 20–36.
4. *Мандрыка А.П.* Очерки развития технических наук. Ленинград : Наука, 1984. 108 с.
5. *Каштелян В.И., Позняк И.И., Рывлин А.Я.* Сопротивление льда движению судна. Ленинград : Судостроение, 1968. 238 с.
6. *Шиманский Ю.А.* Теория моделирования движения судна в сплошном ледяном поле // Современные вопросы ледоколостроения. Ленинград : Морской транспорт, 1960. С. 9–29. (Труды ААНИИ ; т. 237).
7. *Сазонов К.Е.* Вклад академика Ю.А. Шиманского в развитие арктического судостроения // Вопросы истории естествознания и техники. 2021. Т. 42, № 3. С. 501–521.
8. *Ионов Б.П., Грамузов Е.М.* Ледовая ходкость судов. 2-е изд., исправленное. Санкт-Петербург, 2013. 504 с.
9. *Lindqvist G.* A straightforward method for calculation of ice resistance of ships // Proceedings of the 10th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC'89). Luleå : University of Technology, 1989. Vol. 2. P. 722–735.
10. *Сазонов К.Е.* Теоретические основы плавания судов во льдах. Санкт-Петербург : ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2010. 274 с.
11. *Сазонов К.Е.* Развитие ледовой ходкости судов в XXI веке // Труды Крыловского государственного научного центра. 2018. Вып. 2(384). С. 9–28.
12. *Добродеев А.А., Сазонов К.Е.* Моделирование в морской ледотехнике // Арктика: экология и экономика. 2021. Т. 11, № 4. С. 557–567.
13. *Лобанов В.А.* Ледовая ходкость судов с нетрадиционным формообразованием // Научные проблемы водного транспорта. 2020. № 65. С. 143–156.
14. *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.
15. *Тронин В.А.* К расчету элементов поворотливости судна при движении в ровных льдах // Труды ГИИВТ. 1969. Вып. 102. С. 14–19.
16. *Lindstrom C.-A.* Numerical simulation of ship manoeuvring motion in level ice // Polartech'90 : International Conference on Development and Commercial Utilization of Technologies in Polar Regions : Proceedings. Copenhagen, 1990. P. 198–208.
17. *Сазонов К.Е.* Ледовая управляемость судов. Санкт-Петербург : ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2006. 252 с.
18. *Su B., Riska K., Moan T.* A numerical method for the prediction of ship performance in level ice // Cold Regions Science and Technology. 2010. Vol. 60. P. 177–188.
19. *Добродеев А.А., Сазонов К.Е., Саперштейн И.А.* Выход судна из ледяного канала // Труды Крыловского государственного научного центра. 2020. Вып. 2(392). С. 59–65.

20. *Ралстон Т.* Анализ ледовых нагрузок на конические конструкции в рамках теории предельного равновесия // Физика и механика льда : пер. с англ. / Под ред. П. Трюде. Москва : Мир, 1983. С. 282–297.
21. *Croasdale K., Cammaert A., Metge M.* A Method for the calculation of sheet ice loads on sloping structures // // Proceedings of 12th IAHR International Symposium on Ice. Trondheim : Norwegian Institute of Technology, 1994. Vol. 2. P. 874–881.
22. Ледотехнические аспекты освоения морских месторождений нефти и газа / *Ю.Н. Алексеев, В.П. Афанасьев, О.Е. Литонов* [и др.]. Санкт-Петербург : Гидрометеоиздат, 2001. 360 с.
23. *Вершинин С.А., Трусков П.А., Кузмичев К.В.* Воздействие льда на сооружения Сахалинского шельфа. Москва : Гипростроймост, 2005. 208 с.
24. *Rantaa J., Polojärvia A.* Limit mechanisms for ice loads on inclined structures: Local crushing // Marine Structures. 2019. Vol. 67. P. 102633 (16 p.).
25. Discrete element analysis of high-pressure zones of sea ice on vertical structures / *X. Long, L. Liu, S. Liu, S. Ji* // Journal of Marine Science and Engineering. 2021. Vol. 9(3). P. 348.
26. *Сазонов К.Е.* Модельный и натурный эксперименты в морской ледотехнике. Санкт-Петербург : Крыловский государственный научный центр, 2021. 306 с.
27. *Каневский Г.И., Клубничкин А.М., Сазонов К.Е.* Прогнозирование характеристик ходкости многовальных судов. Санкт-Петербург, 2019. 160 с.
28. *Каневский Г.И., Клубничкин А.М., Сазонов К.Е.* Диаграммы ледовой ходкости судна // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2022. Т. 14, № 6. С. 805–814. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-805-814.
29. *Добродеев А.А., Сазонов К.Е.* Применение диаграмм ледовой ходкости судов для анализа натурных испытаний // Труды Крыловского государственного научного центра. 2023. № 3(405). С. 81–88. DOI: 10.24937/2542-2324-2023-3-405-81-88.
30. *Добродеев А.А., Сазонов К.Е.* Экспериментальные исследования возможности проводки ледоколом крупнотоннажных судов при буксировке вплотную // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2022. Т. 14, № 5. С. 645–655. DOI:10.21821/2309-5180-2022-14-5-645-655.
31. Повышение эффективности работы систем водного транспорта с помощью динамического имитационного моделирования / *А.А. Бахарев, А.В. Косоротов, А.Б. Крестьянцев, О.В. Таровик, А.Г. Топаж* // Транспорт Российской Федерации. 2015. № 4(59). С. 33–36.
32. *Добродеев А.А., Сазонов К.Е.* Роль изучения основ морской ледотехники в подготовке студентов судостроительных специальностей // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2022. № 4(4). С. 72–84.
33. Воздействие льда на морские и береговые сооружения / *С. Лосет, К.Н. Шхинек, О. Гудместад, К. Хойланд.* Санкт-Петербург : Лань, 2010. 272 с.
34. *Сазонов К.Е.* Морская ледотехника : учеб. пособие. Санкт-Петербург : СПбГМТУ, 2019. 311 с.
35. *Сазонов К.Е.* Движение судов в тертых льдах: результаты исследований // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 67, № 4. С. 406–424. DOI: 10.30758/0555-2648-2021-67-4-406-424.
36. *Добродеев А.А., Сазонов К.Е.* Как изменилось судоходство в Арктике в XXI веке // Природа. 2022. № 11(1287). С. 10–21. DOI: 10.7868/S0032874X22110023.
37. *Кун Т.* Структура научных революций / Пер. с англ. И.З. Налетова ; Общ. ред. и послесл. С.Р. Микулинского и Л.А. Марковой. Москва : Прогресс, 1975. 288 с.

Сведения об авторах

Добродеев Алексей Алексеевич, к.т.н., заместитель начальника лаборатории – начальник сектора ФГУП «Крыловский государственный научный центр»; доцент ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 386-69-78. E-mail: A_Dobrodeev@ksrc.ru. https://orcid.org/0000-0001-6305-5090.

Сазонов Кирилл Евгеньевич, д.т.н., начальник лаборатории ФГУП «Крыловский государственный научный центр»; профессор кафедры океанотехники и морских технологий ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. E-mail: kirsaz@rambler.ru. https://orcid.org/0000-0003-3364-1309.

Поступила / Received: 14.05.24
Принята в печать / Accepted: 27.06.24
© Добродеев А.А., Сазонов К.Е., 2024