

Развитие морской ледотехники в России: история и современность

К. Е. Саонов¹, доктор технических наук
ФГУП «Нрыловский государственный научный центр»

Рассмотрены основные этапы развития морской ледотехники в России. Показана ведущая роль модельного эксперимента в развитии знаний о взаимодействии ледяного покрова с судами и морскими инженерными сооружениями. На современном этапе развития морской ледотехники все большую роль начинают играть методы математического моделирования, которые совместно с физическим моделированием в ледовых бассейнах позволяют решать сложные задачи.

Ключевые слова: морская ледотехника, натурный эксперимент, модельный эксперимент, ледовый опытовый бассейн, математическое моделирование.

Введение

В соответствии с определением, данным в «Гляциологическом словаре» [1], ледотехника является отраслью технических наук, «занимающейся разработкой методов и оборудования для использования льда и борьбы с его вредным влиянием; расчетами инженерных сооружений, находящихся под влиянием гляциальных процессов». Определение «морская» указывает, что все это применяется к различным инженерным сооружениям, эксплуатируемым в морской среде. В настоящее время основными объектами изучения в морской ледотехнике являются:

- разведочные и добычные комплексы, обеспечивающие поиск и добычу полезных ископаемых на шельфе замерзающих морей;
 - морские транспортные системы, обеспечивающие снабжение районов Крайнего Севера России, вывоз произведенной в этих районах продукции включая углеводородное сырье, транзитные перевозки по трассе Северного морского пути;
 - различные гидротехнические сооружения, эксплуатирующиеся в ледовых условиях;
 - управление ледовой обстановкой с помощью активного использования различных технических средств.
- К задачам морской ледотехники относятся:
- определение глобальной и локальной ледовой нагрузки на инженерные сооружения, морские трубопроводы и суда включая их движительно-рулевые комплексы;

- оптимизация формы корпуса инженерных сооружений и судов с целью снижения уровня действующей на них ледовой нагрузки;
- разработка и обоснование организационных мер, обеспечивающих повышение безопасности и эффективности функционирования сложных технических систем в ледовых условиях.

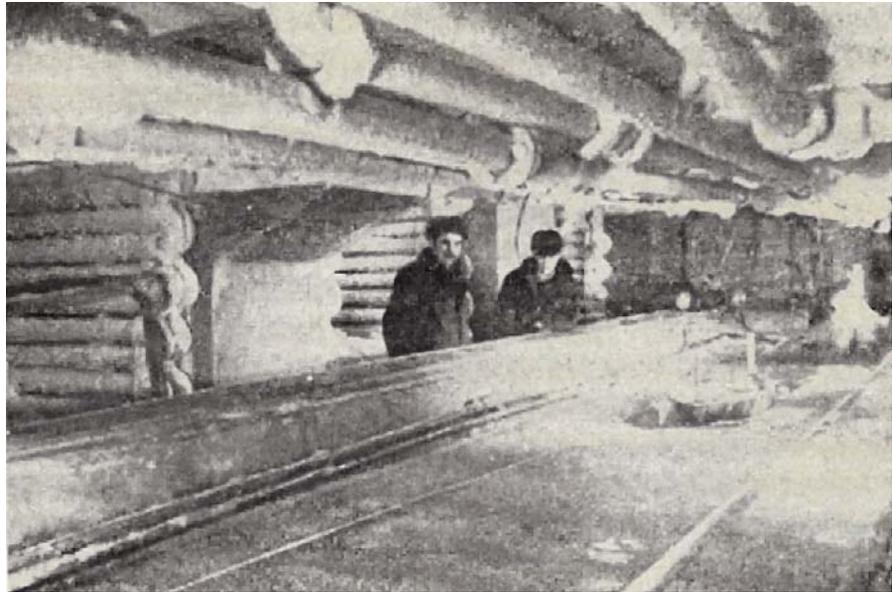
Исторический экскурс

Развитие морской ледотехники началось одновременно с появлением первых ледоколов во второй половине XIX в. Создание нового типа судов поставило перед судовладельцами и кораблями ряд вопросов: Какая форма корпуса ледокола обеспечивает наиболее эффективное его использование? Каким образом обеспечить взаимодействие ледокола с проводимыми судами? Как обеспечить безопасность движения во льдах ледоколов и судов? Для поиска ответов на эти и многие другие вопросы актуализировался опыт эксплуатации первых ледоколов, вырабатывались рекомендации по тактике ледового плавания, эволюционным путем осуществлялся поиск наиболее рациональных технических решений, в том числе и по форме корпуса.

В конце XIX — начале XX в. российские инженеры и ученые предприняли первые попытки научного обобщения данных о работе ледокольного флота. В. И. Афанасьев и Р. И. Рунеберг предложили первые расчетные зависимости для определения ледового сопротивления ледокола и его индикаторной мощности при движении в сплошных льдах [2]. Результаты теоретических исследований использовал адмирал С. О. Макаров при проектировании первого

¹ e-mail: 54lab@krylov.sp.ru.

Рис. 1. Первый в мире ледовый опытовый бассейн [5]



арктического ледокола «Ермак». Интересно, что с моделью «Ермака» были проведены первые модельные испытания ледокольной способности, которые выполнил А. Н. Крылов, в то время возглавлявший опытовый бассейн [3].

Долгое время, вплоть до середины 1950-х годов, развитие морской ледотехники осуществлялось в двух слабо взаимодействовавших друг с другом направлениях. Одно из них было связано с накоплением и анализом эмпирической информации, получаемой при эксплуатации ледоколов и судов ледового плавания и при проведении натурных испытаний. Надо иметь в виду, что в ходе натурных испытаний можно было получить информацию в формате «мощность — скорость». Выбор именно этого формата определялся непреодолимыми в то время трудностями, связанными с измерением ледового сопротивления.

Второе направление заключалось в теоретическом изучении различных аспектов взаимодействия судов со льдом. При этом в основном использовался силовой подход при решении соответствующих задач механики. Результаты теоретических исследований не оказывали существенного влияния на развитие ледокольной техники. Единственным исключением может считаться работа академика Ю. А. Шиманского [4], который на основании рассмотрения простых теоретических соотношений ввел условные измерители ледовых качеств судов, позволяющие эффективно осуществлять проектирование новой техники по прототипу.

Качественные изменения в развитии морской ледотехники произошли в 1955 г., когда в Ленинграде в Арктическом институте был создан первый в мире ледовый бассейн (рис. 1).

В конце 1930-х годов были предприняты первые попытки проведения модельных исследований ледоколов. Они оказались неудачными. В поставленных

опытах модели ледоколов пытались буксировать сквозь тонкий слой пресного льда. Опыт показали, что прочность естественного пресного льда даже уменьшенной толщины слишком велика для проведения модельных испытаний. Из этого следовало, что необходима разработка технологии создания моделированного льда с уменьшенной прочностью.

После войны эта задача была успешно решена. Для создания моделированного льда было использовано наблюдаемое в природе различие в прочностных характеристиках морского и пресного льда. К тому времени наука объяснила это различие влиянием рассола (концентрированного раствора содержащихся в морской воде солей) на прочность морского льда. Было предложено намораживать моделированный лед из раствора поваренной соли NaCl.

Для эффективной работы ледового бассейна необходимо было создать теорию моделирования взаимодействия инженерных объектов со льдом и методику пересчета полученных экспериментальных результатов на натурные условия. Такая теория была разработана академиком Ю. А. Шиманским и профессором Л. М. Ногидом [5].

Благодаря модельному эксперименту стало наконец возможно непосредственное изучение ледового сопротивления. Одним из важнейших результатов, полученных в первые годы работы бассейна, стал вывод о возможности разделения ледового сопротивления на различные составляющие. Это положение было обосновано экспериментальными данными. Разделение полного ледового сопротивления на составляющие открыло путь к построению различных расчетных методов. Модельный эксперимент позволил проводить оптимизацию корпуса проектируемого судна по критерию минимизации ледового сопротивления, т. е. без учета особенностей работы пульсированной установки. Такой подход существенно



Рис. 2. Ледовый бассейн ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

упростил задачу поиска оптимальной для данного проекта формы корпуса.

Натурные исследования

Долгое время натурные исследования были единственным источником информации о взаимодействии судов и инженерных сооружений со льдом. Их первым объектом стали ледоколы и суда ледового плавания. При испытаниях измерялись скорость судна и потребляемая им мощность. Измерению упора гребного винта препятствовали существенные технические трудности, которые были преодолены только в конце XX в. Невозможность измерения силовых параметров взаимодействия корпуса со льдом не позволяла развивать теоретические исследования. С начала 1930-х годов при натурных испытаниях стали выполнять инструментальные измерения деформаций корпусных конструкций при воздействии льда [6]. Эти данные стали основой для разработки

теории ледовой прочности судов. В результате были разработаны методы и приемы проведения натуральных испытаний судов во льдах, представляющие собой уникальную технологию, которая подробно описана в монографии [7]. В настоящее время практически все ледоколы и суда ледового плавания, построенные в России и для России, проходят ледовые испытания, в ходе которых подтверждаются их спецификационные ледовые качества.

Новым направлением в натурных исследованиях является наблюдение за взаимодействием со льдом инженерных шельфовых сооружений. В этой области еще не выработана единая общепринятая методика наблюдений. Собственники таких сооружений самостоятельно проводят исследования, результаты которых обычно представляют собой ноу-хау. Некоторое исключение составляет монография [8], в которой приведены отрывочные натурные данные об эксплуатации платформы «Витязь» во льдах. Такая

Таблица 1. Ледовые бассейны России

Организация — владелец бассейна	Год постройки	Длина, м	Ширина, м	Глубина, м
ААНИИ	1955	13,4	1,85	1,95
	1990	30,0	5,0	1,8
ФГУП «Крыловский государственный научный центр»	1985	45,0/35,0	6,0	1,7/3,5



Рис. 3. Отгрузочный терминал на Варандеев: а – модельные испытания; б – работа в натуральных условиях

политика существенно затрудняет разработку новой перспективной техники, так как у разработчиков часто нет информации о поведении созданной ими конструкции в реальных ледовых условиях.

Модельные технологии

Эксплуатация первого в мире ледового бассейна показала большую перспективность применения модельных исследований при изучении различных проблем, возникающих в морской ледотехнике. Необходимость модельных исследований процессов взаимодействия судов и инженерных сооружений со льдом была осознана во всем мире. В Германии и Финляндии, а затем и в других странах стали появляться ледовые бассейны. В настоящее время в мире их насчитывается около двадцати [9]. Для координации проводимых в них исследований создан специальный ледовый комитет Международной конференции опытовых бассейнов (МКОБ)*, в котором с самого начала его существования активно работают представители России. Благодаря деятельности ледового комитета МКОБ результаты, полученные в различных бассейнах, сопоставимы между собой, так как их получают одними и теми же способами.

Технологии модельных испытаний развиваются уже более пятидесяти лет. В России эти работы сначала были сконцентрированы в Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте (АНИИ), а затем, после создания нового ледового бассейна, перешли в ФГУП «Крыловский государственный научный центр» (ранее ФГУП «ЦНИИ им. академика А. Н. Крылова»). Развитие технологий осуществляется в нескольких взаимосвязанных направлениях:

- разработка новой экспериментальной техники включая проектирование новых ледовых бассейнов;

- разработка методик приготовления моделированного льда, наилучшим образом воспроизводящего физические свойства натурального ледяного покрова;
- разработка методов моделирования и имитации в ледовом бассейне разнообразных естественных ледовых условий;
- разработка новых методик проведения модельных экспериментов с перспективными образцами морской техники включая эксперименты, направленные на апробацию и тестирование компьютерных программ.

Рассмотрим указанные направления более подробно.

До настоящего времени в России существовало три ледовых бассейна: два в АНИИ и один в ФГУП «Крыловский государственный научный центр» (табл. 1). В течение тридцати лет малый ледовый бассейн АНИИ оставался единственным в СССР. По техническим возможностям он перестал удовлетворять требованиям, предъявляемым организациями судостроительной промышленности и морского флота, Ледовый бассейн АНИИ в последние годы в большей степени специализируется на выполнении опытов по изучению различных физических процессов, протекающих в естественном ледяном покрове. Работы в области морской ледотехники выполняются в нем эпизодически. В последние десятилетия наибольший объем экспериментальных работ по морской ледотехнике был выполнен в ледовом бассейне ФГУП «Крыловский государственный научный центр».

Ледовый бассейн в этой организации был введен в эксплуатацию в 1985 г. На момент ввода он удовлетворял всем требованиям, предъявляемым к подобным лабораториям. На рис. 2 представлен его внешний вид.

* Неправительственная международная организация, координирующая деятельность лабораторий, в которых исследуются ходовые и мореходные качества судов.



Рис. 4. Внешний вид нового ледового бассейна

По оснащению этот бассейн был предназначен для проведения работ в обеспечение проектирования перспективных ледоколов и судов ледового плавания. Однако к концу XX в. наиболее актуальными вопросами морской ледотехники стали исследования особенностей воздействия льда на морские инженерные сооружения. Для выполнения этих работ потребовалась масштабная модернизация бассейна, в ходе которой он был оснащен дополнительным оборудованием, позволяющим буксировать модели морских инженерных сооружений сквозь лед при очень низких скоростях движения, соответствующих в модельном масштабе скорости дрейфа льда. Кроме того, бассейн приобрел лицензию финской фирмы «Квернер Маса Ярдс» на приготовление моделированного гранулированного льда. Внедрение этой технологии позволило заметно интенсифицировать процесс приготовления моделированных ледяных полей для разнообразных исследований. Все годы работы ледовый бассейн являлся объектом инновационной деятельности его сотрудников. За это время они разработали и внедрили более двадцати изобретений, направленных на совершенствование экспериментальных исследований. В их числе — разработка и внедрение универсального винтового привода, обеспечивающего возможность испытаний моделей ледостойких платформ при малых скоростях дрейфа льда, установка, имитирующая свойства грунта, на котором установлена платформа, и многое другое.

Все эти нововведения позволили ледовому бассейну ФГУП «Крыловский государственный научный центр» активно включиться в работы по освоению шельфа замерзающих морей России. Так, в нем были выполнены модельные испытания платформы «Витязь», установленной на шельфе острова Сахалин, платформы для месторождения Приразломное, расположенного в Печерском море, отгрузочного терминала компании ЛУКОЙЛ (рис. 3) на Варандее и др.

После более чем 25-летней эксплуатации характеристики ледового бассейна ФГУП «Крыловский государственный научный центр» не в полной мере удовлетворяют ученых и инженеров. Практически все активно эксплуатируемые в мире ледовые бассейны существенно моложе бассейна ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Это обстоятельство, а также необходимость в ближайшем будущем выполнения разнообразных исследований, направленных на решение задач промышленного освоения российской Арктики, поставили вопрос о создании нового ледового бассейна. Были выполнены соответствующие расчеты и обоснования [10], в результате чего в федеральной целевой программе «Развитие гражданской морской техники на 2009—2016 годы» предусмотрено строительство нового ледового бассейна. В соответствии с этой программой во ФГУП «Крыловский государственный научный центр» приступили к выполнению работ, связанных с созданием нового бассейна.

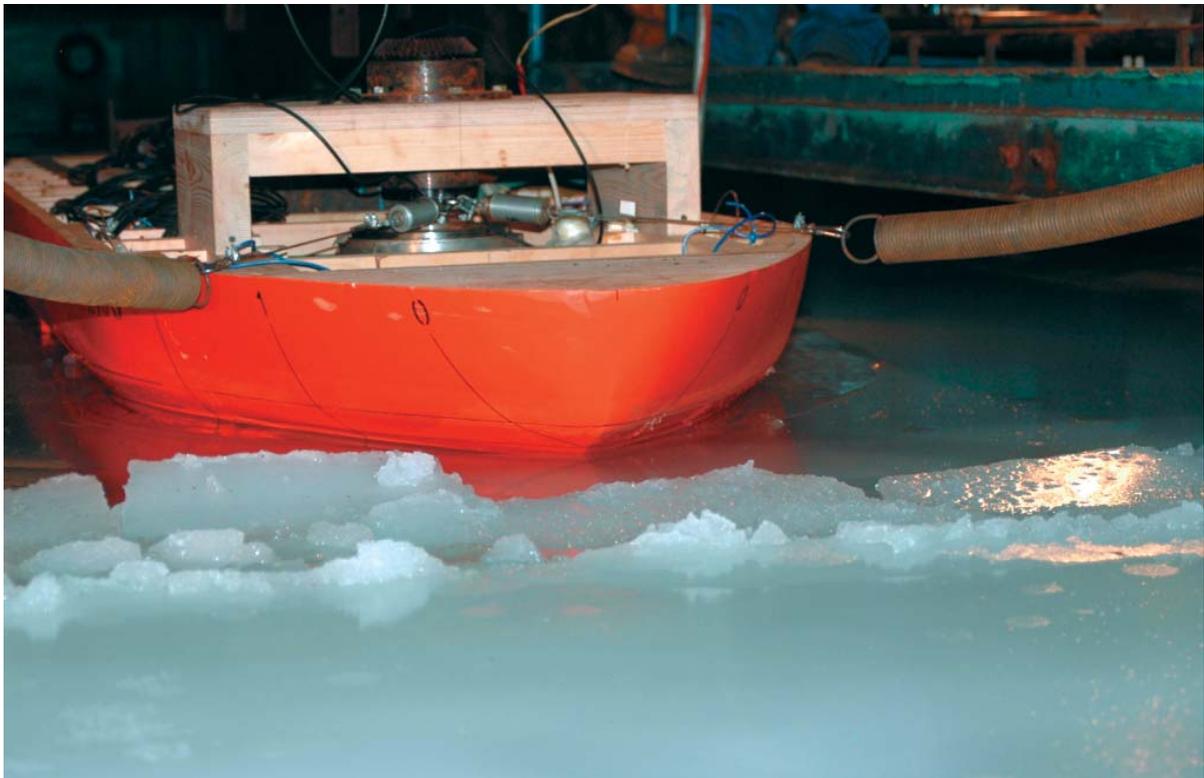


Рис. 5. Испытания турельного судна в торосистой гряде

Основной целью является существенное увеличение его экспериментальных возможностей при сохранении ранее накопленного опыта в области проведения модельных исследований. В настоящее время проработана концепция создания нового ледового бассейна [11], в соответствии с которой его длина будет составлять 80 м, а ширина — 10 м (рис. 4). Бассейн будет оборудован двумя многофункциональными тележками и другим новейшим экспериментальным оборудованием, которое позволит выполнять разнообразные сложные эксперименты с перспективными образцами морской техники.

Первая методика приготовления моделированного столбчатого льда была предложена специалистами ААНИИ [5]. Именно благодаря этой методике удалось создать первый ледовый бассейн. Затем все ледовые бассейны мира в той или иной степени занимались разработкой методик приготовления моделированного льда. Наиболее интересные результаты в этом направлении были достигнуты зарубежными специалистами, в первую очередь канадцем Г. Тимко, который предложил моделированный лед на карбамидной основе и трехкомпонентный лед [9]. В настоящее время такой лед используется в ледовом бассейне Института морской динамики в Канаде.

Финские специалисты разработали технологию получения моделированного гранулированного льда. Они попытались создать моделированный лед, на приготовление которого требуются минимальные

затраты времени. Для этого было предложено распылять соленую воду в атмосфере бассейна при температуре минус 25—30°С. При этом рост моделированного льда происходит, как рост снежного покрова, — снизу вверх. Фактически эта методика является реализацией способа гидравлического дальноструйного факела, применяющегося для производства гранулированного льда в промышленных масштабах. Требуемая толщина ледяного покрова достигается заданием нужного количества циклов намораживания. Сразу после окончания «засева» образуется слой, состоящий из отдельных гранул льда. Для придания этому слою заданных свойств используется специальный температурный режим, включающий фазы сохранения, упрочнения и термообработки. Применение такой технологии позволяет в два-три раза повысить производительность ледовых бассейнов.

Эта технология наряду с традиционной российской используется в настоящее время в ледовом бассейне ФГУП «Крыловский государственный научный центр». В 1994 г. бассейн приобрел лицензию на ее использование. С тех пор гранулированный лед широко применяется в нем для различных исследований. За годы использования лицензии она была доработана специалистами бассейна. Дополнения касались расширения диапазона моделируемых параметров. Так, по рекомендациям финских специалистов минимально возможные толщина моделированного льда и его прочность на изгиб



Рис. 6. Тертый лед на акватории порта

составляют соответственно всего 20 мм и 20 кПа, чего явно недостаточно при испытании новых образцов технических средств освоения арктического шельфа. Достигнутое в бассейне ФГУП «Крыловский государственный научный центр» расширение в два раза диапазонов минимальных характеристик существенно увеличивает его экспериментальные возможности.

В завершение рассмотрения технологий приготовления ледяного покрова необходимо упомянуть об оригинальных разработках, выполненных в Нижегородском государственном техническом университете им. Р. Е. Алексеева. Его ученые предложили композитную модель льда, которая позволяет проводить испытания в открытом ледовом бассейне с естественным намораживанием льда [12].

Последние два из указанных направлений развития модельных технологий тесно связаны между собой. На начальных этапах использования ледовых бассейнов испытания в них проводились в так называемых эталонных ледовых условиях, к которым относились сплошной ровный и битый лед. В этих условиях испытывались модели ледоколов и судов ледового плавания. Очевидно, что эталонные условия не исчерпывают всего разнообразия реальных ледовых условий, поэтому в ледовых бассейнах все время проводится работа по расширению номенклатуры моделируемых и имитируемых ледовых условий.

В бассейне ФГУП «Крыловский государственный научный центр» моделируются и имитируются различные ледяные образования. Это в первую очередь торосы, являющиеся наиболее серьезным препятствием для движения судов и вызывающие наибольшие глобальные нагрузки при взаимодействии с морскими инженерными сооружениями (рис. 5). Современные модельные технологии позволяют создавать в бассейне торосистые образования с заданной толщиной консолидированного слоя и ориентированные под любым углом к направлению движения модели или дрейфа льда. В некоторых экспериментах в ледовом бассейне создается не отдельная гряда торосов, а равномерно восторщенное ледяное поле.

Для оценки возможности эффективного функционирования морских транспортных систем большое значение имеет моделирование физических процессов, происходящих в ледяных каналах при периодическом движении по ним ледоколов и судов. В ходе эксплуатации ледяного судоходного канала происходит его трансформация от «свежего» канала к «старому», набитому тертым льдом (характерный размер льдин — до 2 м). Такой же тертый лед может образовываться на акватории портов (рис. 6), у морских инженерных сооружений, расположенных в районах с малыми скоростями дрейфа льда, и т. п. Натурные наблюдения и модельные эксперименты показали, что скорость нарастания льда в канале превышает скорость



Рис. 7. Пассивный разворот турельного судна под действием дрейфующего льда

нарастания ровного льда [13], поэтому с какого-то момента движение по такому каналу может быть затруднено или вообще невозможно. Модельные испытания в таких условиях позволяют правильно планировать транспортные операции.

Необходимо упомянуть, что в бассейне проводятся исследования по изучению влияния изменения направления дрейфа льда на усилия, удерживающие пришвартованное судно к отгрузочному терминалу, есть возможность имитировать воздействие ледовых сжатий и т. п.

Основной задачей первых ледовых бассейнов было изучение сопротивления льда движению судов [5]. С течением времени круг задач расширялся. В современных условиях, когда необходимо проводить исследования, направленные на обеспечение проектирования, создания и использования новой сложной техники, которая должна надежно работать в Арктике, все время возникают новые проблемы. Для их решения требуется разрабатывать новые методики проведения модельных экспериментов.

За последнее десятилетие в ледовом бассейне ФГУП «Крыловский государственный научный центр» было разработано много таких методик. Кратко опишем лишь две из них. Первая связана с исследованием поведения заякоренных объектов под воздействием льда. Во многом разработка этой тематики связана с необходимостью освоения Штокмановского газоконденсатного месторождения

в Баренцевом море. Для обустройства этого месторождения предлагались различные варианты технологической платформы: типа SPAR, типа BUOY и турельное судно [14]. Выбор между ними мог быть сделан только с учетом данных модельного эксперимента по определению уровня ледовой нагрузки на систему удержания. Такие эксперименты были проведены и позволили ответить на все поставленные вопросы. В первой серии экспериментов испытывались платформы типа SPAR и BUOY, их результаты подробно описаны в [15]. Позже исследовались процессы взаимодействия со льдом турельного судна. На рис. 7 показан фрагмент этих испытаний.

В результате экспериментально доказана возможность пассивного позиционирования турельного судна в любых ледовых условиях включая торосистые образования. Это свидетельствует о том, что ледостойкие платформы такого типа всегда самопроизвольно занимают положение, соответствующее минимальному воздействию внешней среды на сооружение. Выявлены наиболее опасные сценарии взаимодействия турельного судна с дрейфующим льдом, приводящие к возникновению наибольшей глобальной нагрузки. Эта информация позволит в дальнейшем разработать тактику эксплуатации турельных судов в ледовых условиях, включающую эффективный мониторинг гидрометеорологической и ледовой обстановки, которая сделает практически невозможной реализацию указанных сценариев.

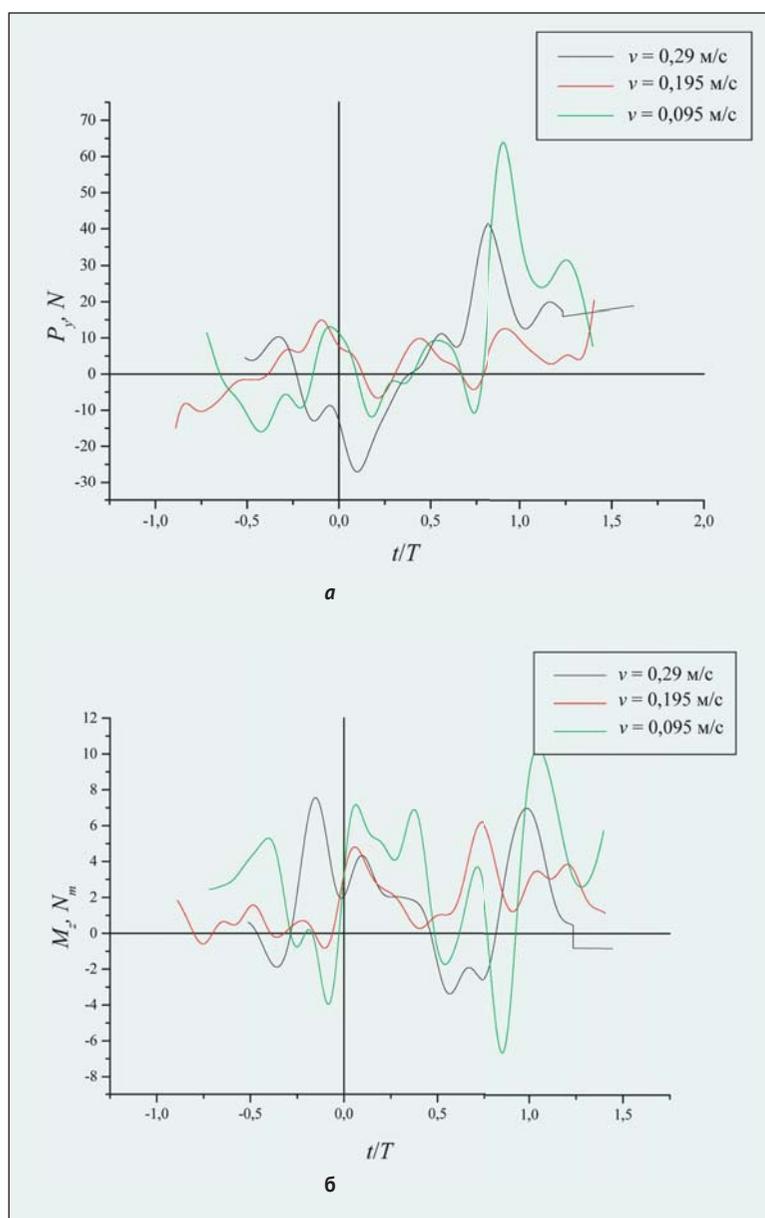


Рис. 8. Боковая сила (а) и момент рыскания (б), действующие на обгоняющее судно

Другой новейшей технологией является изучение взаимодействия двигающихся по ледяным каналам судов при встречах и обгонах [16, 17]. Эта тематика до недавнего времени была актуальна только для условий плавания на чистой воде. Однако по мере возрастания объемов вывоза нефти и газа из приполярных областей движение по ледяным каналам будет становиться все более интенсивным (такая картина уже наблюдается на Балтике). Поэтому неизбежным станет взаимодействие судов при движении по относительно широким ледяным каналам. При этом на корпуса судов будут действовать весьма существенные ледовые силы, неучет которых может привести к аварийным ситуациям. На рис. 8 приведены экспериментальные результаты, полученные

при обгоне в ледяном канале стоящего судна.

Математическое моделирование

Модельный эксперимент в ледовом бассейне имеет ограничения. Одни связаны с геометрическими размерами и формой чаши бассейна, другие — с невозможностью смоделировать в нем все интересующие практику процессы. Прямоугольная форма чаши практически всех современных ледовых бассейнов, а также их размеры не позволяют в полном объеме проводить испытания по изучению ледовой управляемости и маневрирования судна во льдах. В мире существуют лишь два квадратных бассейна (в Финляндии и Корее), где возможно циркуляционное движение модели.

Моделирование в ледовом бассейне невозможно, например, при изучении локальной ледовой нагрузки, ответственной за возникновение ледовых поврежденных корпусов судов и инженерных сооружений. В соответствии с критериями моделирования геометрические размеры тел должны быть уменьшены в определенном масштабе. Это требование относится и к размеру кристаллов, составляющих моделируемый лед. Вот уже более пятидесяти лет ни в одном ледовом бассейне мира не удается создать такой моделируемый лед, размер кристалла которого удовлетворял бы требованиям теории подобия. Поэтому в модельном эксперименте достаточно хорошо моделируются

глобальные (суммарные) ледовые нагрузки на суда и инженерные сооружения и не моделируются локальные.

Для исследования проблем морской ледотехники, которые не могут быть изучены в модельном эксперименте, применяются компьютерные технологии. Исторически первыми были разработаны математические модели, предназначенные для расчета ледового сопротивления судов. В течение ряда десятилетий эти методы совершенствовались, достигнув к настоящему времени хорошей достоверности прогноза для вновь проектируемых судов. Они широко используются для предбассейновой оптимизации перспективных ледоколов и судов активного ледового плавания. Подробное описание современных

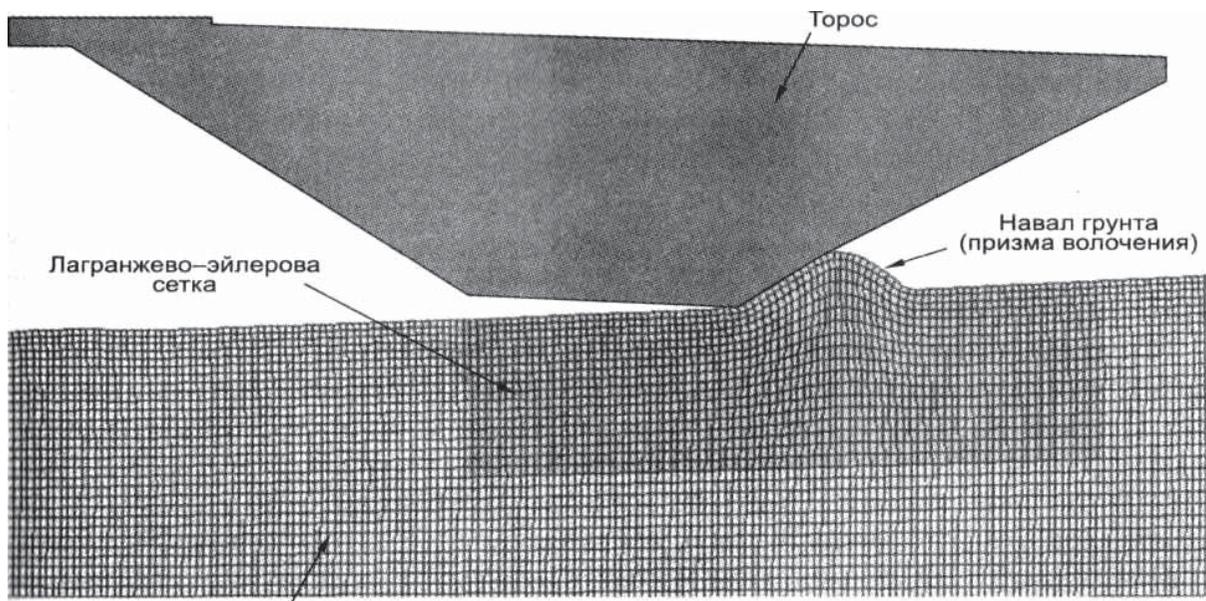


Рис. 9. Расчетная схема для определения воздействий тороса на дно водоема [26, 27]

методов расчета сопротивления льда движению судов содержится в [18, 19].

Разработка эффективных методов расчета ледового сопротивления судов позволила обобщить полученные результаты на случай несимметричного взаимодействия корпуса судна со льдом, который возникает при маневрировании. Это было сделано на основе гипотезы об идентичности физических процессов, протекающих при прямолинейном и криволинейном движении судна. По аналогии с методиками расчетного определения ледового сопротивления были разработаны математические модели, позволяющие эффективно определять все основные характеристики ледовой управляемости [20]. Предложенные математические модели позволили широко применить метод численного эксперимента при анализе влияния различных факторов на показатели ледовой управляемости. Так, при исследованиях воздействия ветра и течения на маневренность судов во льдах были установлены новые формы потери судном управляемости, не имеющие аналогов на чистой воде. Новая форма потери управляемости во льдах обусловлена не тем, что судно перестает реагировать на работу органов управления, а потерей скорости хода и остановкой. Потеря скорости хода и остановка вызываются резким возрастанием ледового сопротивления при движении судна с углом дрейфа и угловой скоростью в ледовых условиях. Математический эксперимент позволил также обосновать размеры зон безопасности при маневрировании судна во льдах в непосредственной близости от морского инженерного сооружения.

Современное развитие учения о ледовой прочности судов и инженерных сооружений невозможно без развития компьютерных технологий. Основу методов расчета ледовой нагрузки, применяемых

в России, составляет гидродинамическая модель внедрения твердого тела в лед, разработанная В. А. Курдюмовым и Д. Е. Хейсиным [21] и существенно усовершенствованная Е. М. Апполоновым [22]. Эта модель позволяет рассчитывать ледовые давления по пятну контакта корпуса судна или сооружения со льдом. Далее с помощью современных компьютерных пакетов, предназначенных для решения задач теории упругости, пластичности и т. д., выполняется поверочный или проектировочный расчеты конструкций корпуса.

Выполнение массовых расчетов по указанным математическим моделям стало основой создания новых правил Российского морского регистра судоходства применительно к судам ледового плавания и морским ледостойким сооружениям [23]. Дальнейшее их совершенствование также осуществлялось с помощью численных методов. Примером может служить проект правил регистра по определению ледовой нагрузки на винторулевые колонки ледоколов и судов активного ледового плавания [24, 25].

Отдельным направлением математического моделирования является разработка методов расчета ледовой нагрузки на инженерные сооружения. Расчеты и модельные эксперименты — практически единственная возможность получить информацию о глобальной ледовой нагрузке, действующей на подобные сооружения. Количество модельных экспериментов ограничивается производительностью существующих ледовых бассейнов, поэтому столь большое значение имеет численный эксперимент, выполняемый на основании разработанных математических моделей. Современные способы построения математических моделей описаны, например, в [26]. Более конкретно применительно к ледовым условиям Охотского моря на шельфе Сахалина

математические модели описаны в [8]. В этой монографии особое внимание уделено взаимодействию ледостойких платформ с торосами и стамухами.

Отдельным направлением морской ледотехники, в котором крайне сложны исследования с помощью модельных экспериментов, является изучение пропахивания дна водоема ледяными образованиями [27]. Глубина борозд, оставленных на дне движущимися торосами, может варьироваться от нескольких сантиметров до нескольких метров, а длина — вплоть до километра. Пропахивающие дно торосы могут повреждать:

- подводные трубопроводы и линии связи;
- устьевое оборудование подводного заканчивания;
- системы каменной наброски и притыкания трубопроводов к ледостойким инженерным сооружениям.

Математическое моделирование — практически единственный инструмент, позволяющий проводить исследования этих сложных процессов. На рис. 9 представлена расчетная схема взаимодействия тороса с дном водоема [26, 28]. Расчеты, выполняемые по такого рода математическим моделям, позволяют в зависимости от типа грунта и гидрологических особенностей района определять оптимальное заглубление трассы трубопроводов, обеспечивающее их безопасную эксплуатацию.

Отдельным направлением в морской ледотехнике стала разработка экспериментально-теоретических методов, позволяющих проводить исследования сложных процессов при взаимодействии инженерных сооружений с ледяными образованиями. Примером подобного процесса может служить загрузка в ледовых условиях танкера у отгрузочного терминала при изменении направления дрейфа ледяных полей. Такая ситуация очень вероятна при отгрузке готовой продукции с платформы «Приразломное», которая должна быть установлена в Печерском море. Этот район Баренцева моря является очень динамичным. На формирование дрейфа льда в нем существенное влияние оказывают приливные течения. Во время загрузки танкера у платформы «Приразломная» дрейф льда может изменять направление. При этом танкер также должен изменять положение относительно платформы, по возможности не прекращая процесс загрузки. Смоделировать плавный процесс изменения направления дрейфа льда в современных ледовых бассейнах невозможно. В ледовом бассейне ФГУП «Крыловский государственный научный центр» изучались только последствия резкого изменения направления дрейфа на 90°. Поэтому для полного изучения процесса разрабатывается его математическая модель, результаты расчетов по которой тестируются путем сопоставления с результатами модельного эксперимента для резкого изменения направления дрейфа. После этого можно считать, что проверенная таким образом расчетная схема удовлетворительно описывает и другие случаи поворота танкера у платформы [29].

Современные проблемы морской ледотехники

На нынешнем этапе развития перед морской ледотехникой в России стоят следующие проблемы.

1. Обеспечение эффективности и безопасности функционирования морских транспортных систем в Арктике, включающих системы вывоза добытой на шельфе и в прибрежных районах продукции, а также транзитные и снабженческие перевозки по Северному морскому пути и высокоширотным трассам. Для решения этой задачи необходимы комплексный подход к созданию новой техники [30] и разработка и обоснование новых тактических приемов плавания во льдах крупнотоннажных судов [19].

2. Создание новых эффективных технологий определения ледовой нагрузки на стационарные и снабженные системой удержания ледостойкие инженерные сооружения, учитывающих динамические и кинематические эффекты, возникающие в процессе взаимодействия. Решение этой проблемы должно быть получено в рамках дальнейшего развития модельных экспериментальных методов и разработки более совершенных математических моделей изучаемых процессов.

3. Создание эффективных методик снижения уровня ледовой нагрузки на различные объекты. Эта проблема может быть решена путем разработки специальных защитных сооружений, совершенствования систем мониторинга, в том числе и мониторинга корпусов судов и ледостойких платформ [31], дальнейшего совершенствования тактики использования ледового менеджмента [19] и т. п.

Некоторые из перечисленных проблем уже решаются в рамках выполнения Федеральной государственной программы «Развитие гражданской морской техники».

Литература

1. Гляциологический словарь / Под ред. чл.-кор. АН СССР В. М. Котлякова. — Л.: Гидрометеоздат, 1984. — 528 с.
2. Сазонов К. Е. История развития методов расчета ледового сопротивления судна // Мор. вестн. — 2009. — № 3. — С. 83—89.
3. Сазонов К. Е. Изучение А. Н. Крыловым ледовых качеств ледокола «Ермак» // Проблемы практического прогнозирования сопротивления воды движению судна: Сб. статей к 100-летию со дня рождения И. В. Гирса. — СПб., 2002. — С. 86—98.
4. Шиманский Ю. А. Условные измерители ледовых качеств судов. — Л.: Изд-во Главсевморпути, 1938. — 125 с.
5. Каштелян В. И., Позняк И. И., Рывлин А. Я. Сопротивление льда движению судна. — Л.: Судостроение, 1968. — 238 с.
6. Сазонов К. Е. Начальный этап становления ледовой прочности судов // Мор. вестн. — 2012. — № 2 (42). — С. 91—94.

7. Рывлин А. Я., Хейсин Д. Е. Испытания судов во льдах. — Л.: Судостроение, 1980. — 208 с.
8. Вершинин С. А., Трусков П. А., Кузмичев К. В. Воздействие льда на сооружения Сахалинского шельфа. — М.: Ин-т Гипростроймост, 2005.
9. Сазонов К. Е. Ледовые бассейны // *Борусевич В. О., Русецкий А. А., Соловьев И. А.* Современные гидродинамические лаборатории. — СПб., 2008. — С. 178—208.
10. Апполонов Е. М., Лебедев И. Ю., Сазонов К. Е., Тумашик А. П. Оценка размеров чаши современного ледового бассейна // *Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова.* — 2010. — Вып. 51 (335). — С. 19—28.
11. Сазонов К. Е., Апполонов Е. М., Денисов В. И., Симонов Ю. А. Концепция создания нового ледового бассейна ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова // *Труды третьей Всероссийской научно-технической конференции «Измерения и испытания в судостроении и смежных отраслях» (СУДОМЕТРИКА-2010).* — СПб., 2010. — С. 45—48.
12. Зуев В. А. Средства продления навигации на внутренних водных путях. — Л.: Судостроение, 1986. — 207 с.
13. Сазонов К. Е., Шахов Е. Г. Изучение консолидации ледовых консолидации ледовых каналов, проложенных в припайных льдах // *Тезисы докладов Всероссийской НТК «Крыловские чтения-2006».* — СПб., 2006. — С. 104—105.
14. Сазонов К. Е., Кайтанов Ю. С., Клементьева Н. Ю. Сравнительный анализ характеристик различных вариантов морской технологической платформы для ШГКМ на основе результатов модельных экспериментов // *Труды 9 Межд. конф. и выставки по освоению ресурсов нефти и газа Российской Арктики и континентального шельфа стран СНГ.* — Т. 1. — СПб., 2009. — С. 160—164.
15. Карулин Е. Б., Карулина М. М., Клементьева Н. Ю. и др. Модельные исследования взаимодействия со льдом платформ, предназначенных для Штокмановского ГКМ // *Газ. промышленность.* — 2007. — № 10. — С. 70—73.
16. Гончаров В. К., Клементьева Н. Ю., Сазонов К. Е. Научные исследования проблемы обеспечения безопасности зимней навигации в Финском заливе (проект MS GOF) // *Мор. вестн.* — 2009. — № 1 (29). — С. 69—70.
17. Goncharov V. K., Klementieva N. Yu., Sazonov K. E. Ice makes a difference // *The Naval Architect.* — 2009. — Febr. — P. 16—20.
18. Ионов Б. П., Грамузов Е. М. Ледовая ходкость судов. — СПб.: Судостроение, 2001. — 512 с.
19. Сазонов К. Е. Теоретические основы плавания судов во льдах. — СПб.: ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, 2010. — 274 с.
20. Сазонов К. Е. Ледовая управляемость судов. — СПб.: ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, 2006. — 252 с.
21. Курдюмов В. А., Хейсин Д. Е. Гидродинамическая модель удара твердого тела о лед // *Приклад. механика.* — 1976. — Т. 12, № 10. — С. 103—109.
22. Апполонов Е. М., Дидковский А. В., Кутейников М. А., Нестеров А. Б. Совершенствование методологии определения ледовых нагрузок // *Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства.* — Вып. 25. — СПб., 2002. — С. 83—100.
23. Апполонов Е. М., Нестеров А. Б., Копилец Н. Ф., Дидковский А. В. О проекте новой редакции требований правил Российского морского регистра судоходства к ледовой прочности судов и ледоколов // *Судостроение.* — 1997. — № 5.
24. Апполонов Е. М., Нестеров А. Б., Сазонов К. Е. Регламентация ледовых нагрузок на корпуса азимутальных пропульсивных систем судов двойного действия // *Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова.* — 2006. — Вып. 28 (312).
25. Апполонов Е. М., Нестеров А. Б., Сазонов К. Е. Регламентация экстремальных ледовых нагрузок на корпуса азимутальных пропульсивных систем судов ледового плавания // *Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова.* — 2008. — Вып. 39 (323). — С. 45—68.
26. Лосет С., Шхинек К. Н., Гудместад О., Хойланд К. Воздействие льда на морские и береговые сооружения. — СПб.: Лань, 2010. — 272 с.
27. Вершинин С. А., Трусков П. А., Лиферов П. А. Воздействие ледовых образований на подводные объекты. — М.: ИПК «Русская книга», 2007. — 196 с.
28. Жиленков А. Г., Капустянский С. М., Лиферов П. А., Шхинек К. Н. Взаимодействие торосов с морским льдом // *Гидротехнич. строительство.* — [Б. м.], 2007. — С. 28—30.
29. Карулин Е. Б., Карулина М. М. Численное и физическое моделирование движения танкера, ошвартованного у отгрузочного причала, при изменении направления дрейфа льда // *Мор. вестн.* — 2007. — № 3 (23). — С. 106—111.
30. Апполонов Е. М., Сазонов К. Е., Тимофеев О. Я. Безопасность эксплуатации крупнотоннажных судов в арктической транспортной системе // *Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева.* — 2010. — № 1 (80). — С. 149—153.
31. Апполонов Е. М., Нестеров А. Б., Тимофеев О. Я. Обеспечение ледовой прочности и безопасности эксплуатации судов в российских арктических и замерзающих морях на основе комплексной системы формирования принципиальных инженерных решений // *Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова.* — 2008. — Вып. 39 (323). — С. 69—89.