

МОДЕЛИРОВАНИЕ В МОРСКОЙ ЛЕДОТЕХНИКЕ

А. А. Добродеев, К. Е. Сазонов

Крыловский государственный научный центр, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 16 июля 2021 г.

В современном мире сложно представить создание значимого инженерного сооружения без моделирования его внешнего и внутреннего вида, работы основных механизмов, условий эксплуатации и многих других особенностей конструкции и возникающих явлений на стадии проектирования. В настоящей работе моделирование трактуется как один из вычислительных методов, позволяющих получать количественные результаты при изучении ледового воздействия на морские сооружения, к которым в первую очередь относятся ледоколы и транспортные суда, опорные основания платформ, объекты гидротехнического строительства. Рассмотрены физический и математический методы. Приведены сравнительные достоинства обоих методов при применении в задачах морской ледотехники, а также перспективы их развития для решения широкого круга научных задач, направленных на развитие арктического судостроения.

Ключевые слова: физическое моделирование, ледовый бассейн, математическое моделирование, свойства льда.

Введение

Моделирование — общенаучный метод изучения разнообразных объектов окружающего нас мира с помощью моделей этих объектов. Построение и исследование моделей существующих или разрабатываемых (предполагаемых) объектов, процессов или явлений осуществляется для детального изучения их характеристик, объяснения наблюдаемых свойств, а также для выполнения прогноза их функционирования в тех или иных условиях. Из приведенного определения следует, что основным объектом изучения при моделировании является модель. Модель в науке и технике — многозначное понятие, что не позволяет разработать ее общую классификацию. В соответствии с многозначностью понятия «модель» существует много различных видов моделирования. В данной работе применительно к морской ледотехнике рассмотрены два вида моделирования: физическое и математическое.

Под физическим моделированием будем понимать метод исследования, при котором изучаемый природный и/или технический объект заменяется

его уменьшенной (увеличенной) копией — моделью (рис. 1). Этот метод состоит из трех основных этапов: создания физической модели изучаемого объекта, проведения комплекса экспериментальных исследований с моделью, переноса полученных результатов на реальный (натурный) объект. Для метода физического моделирования основой является фундаментальная теория подобия и размерности [1; 2].

Основное понятие математического моделирования — математическая модель, которая представляет собой математическое описание реальности, выраженное математическими символами. В этом смысле все физические законы, включая законы механики [3], записанные в виде математических соотношений, являются математическими моделями. В общем случае любое теоретическое решение задачи математическими методами является математическим моделированием.

В настоящее время под математическим моделированием обычно понимают изучение свойств моделируемого объекта с применением методов вычислительной математики. При этом математическая модель часто представляет собой определенную совокупность теоретических моделей и эмпирических



а



б

Рис. 1. Взаимодействие льда с натурным объектом (а) и экспериментальные исследования его модели, изготовленной в масштабе 1:70 (б)

Fig. 1. Ice interaction with a full-scale marine structure (а) and its ice model tests on a scale of 1:70 (б)

соотношений, которые, по мнению исследователя, наилучшим образом описывают существенные для выполняемого анализа свойства и взаимосвязи компонентов изучаемого объекта.

Физическое моделирование

Физические модели изучаемых (проектируемых) объектов применяются в практической деятельности человека с давних пор [4]. Однако массовое использование моделей при создании образцов новой техники, особенно в судостроении и авиации, началось во второй половине XIX в. Всеобщее использование метода физического моделирования связано с деятельностью выдающегося английского ученого и инженера Вильяма Фруда (1810—1879). Важнейшим его достижением является создание первого в мире опытового бассейна для изучения сопротивления воды движению судов с помощью их моделей, а также разработка методики проведения таких испытаний и способа

пересчета полученного результата на натурное судно [5; 6]. На многие годы метод физического моделирования стал основным инструментом исследования процессов взаимодействия сложных технических объектов с внешней средой. Лидирующее положение этого метода объясняется невозможностью до недавнего времени получения необходимых для практического использования данных с помощью аналитических расчетов из-за сложной геометрии изучаемых объектов.

К середине прошлого века метод физического моделирования стал общепризнанным приемом исследования. И когда возникла необходимость проектирования мощных ледоколов для освоения Северного морского пути, стали предприниматься попытки его применения для изучения ледовых качеств судов. По-видимому, впервые такое предложение прозвучало в 1935 г. на заседании экспертного совета Главного управления Северного морского пути по обсуждению проекта мощного ледокола в 18—24 тыс. л. с. [7]. Работы, направленные на применение метода физического моделирования для изучения движения судов во льдах, продолжались в течение двадцати лет и увенчались созданием в 1955 г. первого в мире ледового бассейна в Арктическом институте в Ленинграде. В ходе этих работ было выявлено существенное отличие в применении физического моделирования для ледовых условий и для чистой воды. Оно заключается в том, что для успешной работы ледового бассейна потребовалось разработать физическую модель льда — моделированный лед, обладающий определенным набором свойств, отличающихся от натурального морского льда. Кроме того, нужно было создать теорию моделирования для ледового бассейна и обосновать методику переноса полученных результатов на натурные условия. Ледовый бассейн позволил выполнять измерения силового воздействия льда на изучаемый

инженерный объект. Это обеспечило предпосылки для дальнейшего развития сначала теоретических исследований, а затем, после появления ЭВМ, математического моделирования.

В настоящее время метод физического моделирования при изучении процессов взаимодействия различных инженерных объектов получил широкое распространение. Ледовые бассейны функционируют в России, Финляндии, Канаде, США, Германии, Японии и других странах [8]. Для координации и стандартизации методов исследований в ледовых бассейнах разных стран в рамках Международной конференции опытовых бассейнов создан специальный ледовый комитет, разрабатывающий рекомендации по процедуре испытаний [9]. По мере расширения номенклатуры объектов исследования и моделируемых ледовых условий эти рекомендации пересматриваются, уточняются и корректируются. В случае необходимости разрабатываются новые документы, отражающие появление новых типов экспериментов, которые проводятся в ледовых бассейнах.

Как и любое экспериментальное исследование, модельный эксперимент имеет достоинства и недостатки. Важнейшим преимуществом физического эксперимента в морской ледотехнике является возможность измерения глобальной ледовой нагрузки, действующей на модель в целом, а также измерения воздействия ледовой среды на различные элементы модели. В натурном эксперименте непосредственное измерение глобальной ледовой нагрузки невозможно. Так, при натурных испытаниях судов можно измерить суммарный упор движителей, хотя такое измерение является достаточно сложным [10]. Однако измеренный суммарный упор не равен общему ледовому сопротивлению судна $R_{\text{ТОТ}}$. Их связь описывается соотношением

$$R_{\text{ТОТ}} = (1-t) \sum_i T_i,$$

где $\sum_i T_i$ — суммарный упор движителей судна;

i — число движителей; t — коэффициент засасывания, характеризующий дополнительную силу сопротивления движению судна, возникающую из-за работы движителей.

При движении судна в ледовых условиях величина t неизвестна. До недавнего времени невозможно было получить даже приближенные оценки полного ледового сопротивления, так как традиционные методы расчета тяговых характеристик не позволяли определить тягу судна при его движении в ледовых условиях. Только разработка альтернативной (швартовой) системы коэффициентов взаимодействия движителя с корпусом позволила точно определять тягу судна на чистой воде при любых режимах движения, а также, в предположении равенства коэффициентов взаимодействия на чистой воде и в ледовых условиях, оценивать тягу и соот-

ветственно полное ледовое сопротивление во льдах [11]. Однако в этом направлении в настоящее время делаются только первые шаги [12].

При натурных исследованиях воздействия льда на морские инженерные сооружения принципиально отсутствует возможность измерения глобальной ледовой нагрузки. В очень редких случаях такую нагрузку можно определить на основании косвенных измерений. Обычно на морских инженерных сооружениях применяется система мониторинга ледовой нагрузки, включающая ряд измерительных панелей, расположенных в районе действующей ватерлинии [13]. Такие панели могут измерять только локальную действующую на них ледовую нагрузку. Попытки восстановления глобальной ледовой нагрузки на основании данных локальных измерений ледовых сил, действующих на расположенные на поверхности сооружения измерительные элементы, обречены на неудачу. С математической точки зрения такое восстановление является некорректной задачей. Ее решение возможно только с привлечением довольно сильных и зачастую малообоснованных допущений. Определенные исследования в этой области сейчас ведутся в ледовом опытовом бассейне Крыловского центра. Они направлены на изучение зависимости локальной и глобальной ледовых нагрузок применительно к объектам с различной формой корпуса (рис. 2).

К достоинствам физического моделирования относится возможность воспроизведения характера протекания физического процесса при полном соответствии геометрии модели натурному объекту. Это следует из практически обязательного соблюдения геометрического подобия при физическом моделировании. Некоторые отклонения от абсолютного геометрического подобия могут наблюдаться, например, при модельных испытаниях протяженных гидротехнических сооружений [14; 15]. В этом случае на результаты измерения нагрузки могут оказывать влияние краевые эффекты. В указанных выше работах описаны методы выбора параметров моделей, позволяющие снизить влияние краевых эффектов. В любом случае физическое моделирование позволяет изучать взаимодействие инженерного объекта со льдом в процессе его развития, при этом в отличие от натурных наблюдений имеется возможность измерения различных параметров процесса (но далеко не всех), а также его визуализации, в том числе и из-под воды.

Еще одно важнейшее достоинство физического моделирования — возможность сознательного выбора режимов проведения экспериментов. Причем эта возможность касается не только параметров движения исследуемой модели, но и ледовых условий. В практике работы ледовых бассейнов накоплен опыт воспроизведения таких ледовых условий, как ровный и битый ледяной покров, наложенный и тертый лед, торосистые образования, имитация ледовых сжатий. В ледовых бассейнах также можно

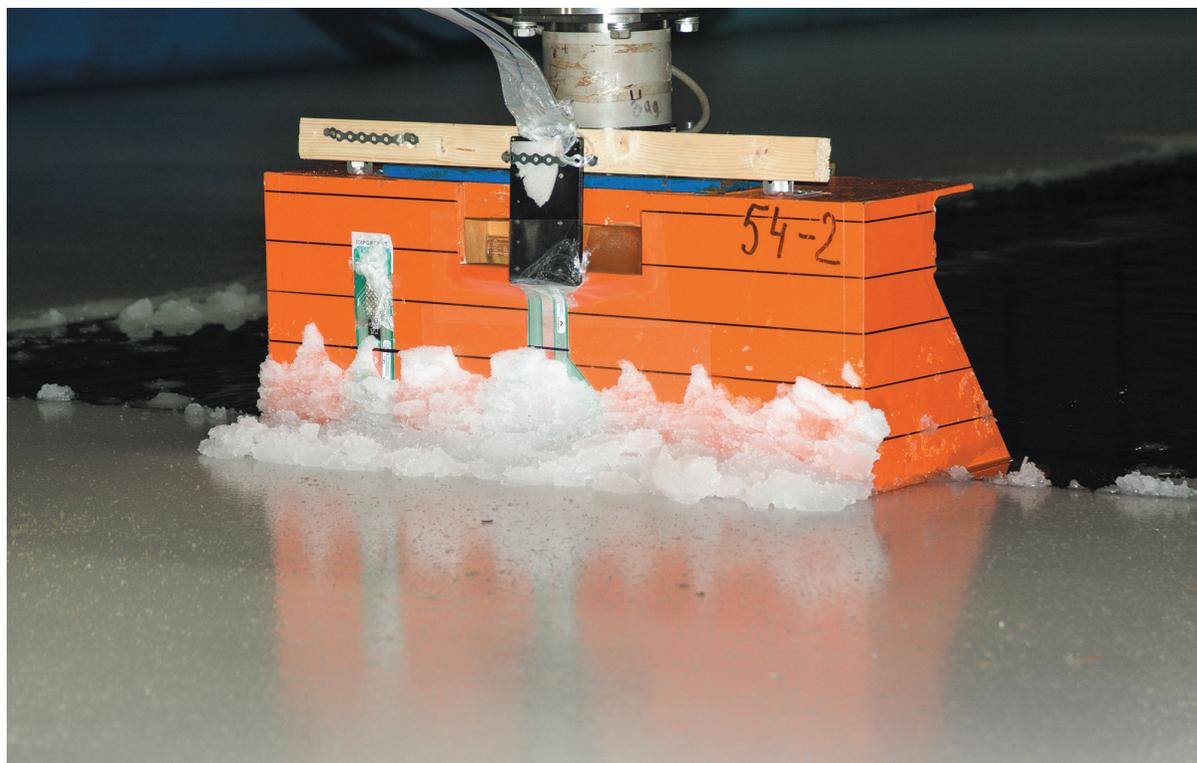


Рис. 2. Сопоставление локальной и глобальной ледовых нагрузок путем экспериментов в ледовом опытовом бассейне
Fig. 2. Comparison of local and global ice loads via experiments in an ice test tank

воспроизводить различные комбинации указанных ледовых условий.

К недостаткам физического моделирования ледовой нагрузки можно отнести, во-первых, сложность эксперимента. Для его осуществления необходимо создать специализированную лабораторию — ледовый бассейн. Современный ледовый бассейн — это высокотехнологичное производство, предназначенное для воспроизведения различных ледовых условий и проведения экспериментов. Он включает в себя большой набор обеспечивающих его функционирование разнообразных систем, основной из которых является холодильный комплекс. Из сказанного следует, что лаборатории такого типа могут создаваться только весьма крупными научными или производственными центрами, получающим достаточно солидную государственную поддержку. Поэтому по сравнению с традиционными гидродинамическими лабораториями ледовых бассейнов во всем мире относительно мало.

Второй недостаток ледовых бассейнов — относительно высокая стоимость проводимых в них экспериментов, а также большая продолжительность испытаний. Высокая стоимость объясняется большими затратами на приготовление льда, обслуживание технологического оборудования, обеспечивающего функционирование бассейна, на ремонт оборудования и помещений, находящихся под постоянным воздействием изменяющейся температуры (колебания температуры в летние месяцы могут достигать 50°C), и др.

Ледовые испытания характеризуются большими временными затратами по отношению к объему получаемой в них информации. Такое положение определяется двумя основными факторами: необходимостью выполнения продолжительных технологических операций для приготовления моделированного ледяного покрова и конечностью моделированного ледяного покрова. В ледовых бассейнах для приготовления одного ледяного поля требуется порядка суток. В зависимости от применяемой в бассейне технологии эта величина может варьироваться, но вряд ли можно достигнуть удовлетворительного результата менее чем за 12—14 ч. Из этого следует, что в среднем в ледовом бассейне при работе в нормальном режиме можно намораживать по два моделированных поля в неделю. В экстренных случаях в принципе возможно увеличить число полей, приготавливаемых за неделю. Однако после интенсивного намораживания нескольких полей подряд необходимо «растепление» бассейна, так как в нем замерзает большое количество паразитного льда, который мешает работе. Поэтому в среднем число полей, производимых в бассейне, остается примерно постоянным.

Специфика работы ледового бассейна заключается в том, что после испытания модели ледяной покров в нем становится разрушенным. Поэтому повторные испытания в неразрушенном ледяном покрове можно провести только после приготовления следующего поля моделированного льда. Это обстоятельство, а также конечные размеры ледяно-

го покрова, определяют объем информации, который можно получить в эксперименте. Все ледовые бассейны стараются повысить эффективность работы, составляя план экспериментов в одном ледяном покрове таким образом, чтобы получить максимум информации из одного поля. Так, после испытаний в неразрушенном ледяном покрове могут проводиться испытания в битых и/или тертых льдах, испытания по исследованию возможности выхода модели из собственного канала, могут приготавливаться торосистые образования и т. д.

Как любая экспериментальная установка, каждый ледовый бассейн имеет ряд ограничений. Они обычно связаны с размерами бассейна, а также с невозможностью приготовления моделированного льда, толщина которого меньше некоторого предела (обычно это 10—15 мм). Указанные обстоятельства накладывают ограничения на масштаб моделей, с которыми можно проводить исследования. Кроме того, на масштаб моделей накладываются ограничения, связанные с пределами измерения измерительных средств. На возможность выполнения того или иного типа испытаний в бассейне влияют скоростные и тяговые характеристики буксировочной тележки, возможности холодильного комплекса, наличие в бассейне специальных устройств, например буксируемого имитатора дна водоема для испытаний морских сооружений на мелководье, и т. п.

Метод физического моделирования в морской ледотехнике обладает рядом важных достоинств, но имеет ряд недостатков и ограничений. Несмотря на постоянно увеличивающиеся экспериментальные возможности ледовых бассейнов, они не безграничны.

Математическое моделирование

В качестве основной альтернативы физическому моделированию рассматривается моделирование математическое. Часто можно слышать, что с помощью математического моделирования поддаются решению любые инженерные задачи, причем эти решения обладают большей точностью, позволяют получить большой объем разнообразной информации и, главное, они дешевле, чем экспериментальные исследования.

Активное использование метода математического моделирования в морской ледотехнике началось в последней четверти прошлого века в связи с повсеместным внедрением ЭВМ в практику научных исследований. Возможность представления процессов взаимодействия льда с различными инженерными сооружениями в виде некоторого алгоритма, реализуемого как компьютерная программа, позволила, используя ряд упрощений и идеализаций, получить численные прогнозы ледового сопротивления судов и глобальной ледовой нагрузки на морские инженерные сооружения. В области определения ледового сопротивления это были программы Ю. Н. Алексеева и К. Е. Сазонова [16], П. Валанто [17] и др., в области расчета глобальной ледовой

нагрузки — методы Т. Ралстона [18] и К. Кросдейла [19]. Указанные расчетные методы практически сразу были использованы при создании новых инженерных объектов, так как позволяли быстро решить целый ряд проектных задач. Они давали возможность проводить предварительную оптимизацию конструкций, отбрасывая самые плохие решения перед проведением исследований в ледовых бассейнах, что позволило снизить объем модельных испытаний. Методы расчета совершенствовались, появлялись новые программы, например довольно распространенная сейчас программа расчета ледового сопротивления, созданная под руководством К. Риски [20].

В настоящее время, по мнению авторов, можно условно выделить три основных направления, по которым происходит развитие метода математического моделирования в морской ледотехнике. Первое направление — классическое, основанное на использовании для описания льда тех или иных известных моделей сплошных сред. При этом для решения поставленных задач применяются различные современные методы вычислительной математики. Примером такого подхода может служить работа [21], в которой модель упругопластического тела была использована для расчета ледовой нагрузки на вертикальное препятствие и влияния физико-механических свойств льда на величину возникающих нагрузок. Довольно подробный обзор публикаций по этому направлению содержится в [22].

Ко второму направлению можно отнести многочисленные исследования по применению методов конечных (МКЭ) и дискретных (МДЭ) элементов для решения различных задач морской ледотехники [23]. МКЭ обычно используется для моделирования процессов разрушения ледяного покрова [24], иногда он применяется для исследования взаимодействия льда с инженерным объектом [25]. Этим методом трудно описывать движение обломков льда, образовавшихся после его разрушения.

Известно, что МДЭ эффективен для анализа достаточно быстрых процессов, связанных с переносом вещества. Поэтому первоначально он применялся в морской ледотехнике для описания такого рода процессов, например формирования торосистого образования [26] и взаимодействия сооружения с битым льдом [27]. Впоследствии МДЭ стал применяться и для анализа процессов разрушения льда. Это потребовало модификации метода путем внесения в него моделей связи между дискретными элементами в виде балок, ограничивающих смещение элементов друг относительно друга. Нарушение связей происходит при выполнении соответствующих условий. После этого элементы рассматриваются как независимые твердые тела. Такие модели в настоящее время используются для анализа ледовой нагрузки на морские сооружения [28; 29].

Рассмотрение МКЭ и МДЭ применительно к задачам морской ледотехники показывает, что ни тот ни другой не могут полностью решить актуальные

технические задачи. При наличии хороших результатов при расчетах разрушения льда МКЭ не позволяет рассчитать дальнейшие траектории движения обломков, формирующих ледяное нагромождение перед сооружением или скопления льда на подводной части корпуса судна. МДЭ, по мнению авторов работы [23], является более перспективным. Однако его широкому применению препятствует ряд трудностей, основными из которых являются выбор и обоснование размера дискретного элемента в зависимости от решаемой задачи, а также задание адекватного закона для описания сил взаимодействия между элементами.

Третьим направлением является создание относительно простых инженерных программ расчета, предназначенных для решения определенных задач. Такие программы обычно создаются исследовательскими группами и нацелены на решение стоящих перед ними проблем. Как правило, такие разработки не направлены на всеобщее использование. При их создании широко используются эмпирическая информация и различные приближенные формулы. Примером таких программ могут служить работы [20] для определения сопротивления судна и [30] для расчета глобальной ледовой нагрузки на морские сооружения.

Наличие столь разных подходов к математическому моделированию процессов разрушения льда и его взаимодействия с различными техническими объектами указывает на существование серьезных фундаментальных причин, препятствующих бурному развитию численного моделирования. По мнению авторов, одной из таких причин является отсутствие общепризнанного математического описания льда и ледяного покрова как физического объекта. Трудности при этом связаны с уникальностью льда как природного материала. Во всех технических приложениях его гомологическая температура не превышает нескольких градусов. Вещество в таких условиях может проявлять различные свойства при воздействии на него достаточно малых возмущений. В качестве примера можно привести сводку различных типов разрушения моделированного ледяного покрова при взаимодействии с вертикальной стенкой препятствия, приведенную в [31]. Как указано в этой работе, реализация того или иного типа разрушения носит вероятностный характер. Так, в экспериментах по изучению воздействия льда на двухопорные сооружения часто наблюдаются не совпадающие типы разрушения перед различными опорами.

Перспективы применения методов физического и математического моделирования

Из приведенного анализа следует, что ни метод физического моделирования, ни метод математического моделирования не обладают достаточной общностью для решения любых задач морской ледотехники. Оба метода имеют как существенные достоинства, так и значительные недостатки и ограни-

чения. По мнению авторов, наиболее эффективной стратегией дальнейшего развития исследований в области морской ледотехники является совместное применение физического и математического методов. Этот вывод подтверждается публикациями в научной периодике [24; 32 и др.]. Необходимо отметить, что такая практика все чаще встречается в работе ледовых бассейнов. При этом для математического моделирования, как правило, используется программный продукт, который относится к третьему из рассмотренных выше типов. Это позволяет констатировать, что специалисты в области физического моделирования в настоящее время активно используют в работе математическое моделирование, расширяя возможности и результативность своих исследований.

Несколько другой подход все чаще декларируется специалистами в области математического моделирования. Среди них начинает преобладать мнение о возможности с помощью численного моделирования решить практически все возникающие задачи. Методу физического моделирования отводится вспомогательная роль, фактически сводящаяся к участию в валидации разработанных методов. С такой позицией трудно согласиться по целому ряду причин. Основные из них приводятся ниже.

Как уже указывалось, в качестве основной трудности развития метода математического моделирования можно рассматривать отсутствие адекватной математической модели льда. В данном случае речь не идет о необходимости создания универсальной модели льда, описывающей все его физико-механические свойства. Для эффективного развития численных методов было бы достаточно разработать ряд моделей льда с указанием приблизительного диапазона их использования. Важно при этом достигнуть некоторого консенсуса между разработчиками программного продукта и конечными пользователями. Пока такие модели не разработаны и не достигнут консенсус, расчеты ледовых воздействий на инженерные объекты не могут обладать необходимой общностью. Строго говоря, имеющиеся программные продукты часто невозможно сравнивать и соответственно определять наиболее эффективные и перспективные.

Еще одна проблема заключается в отсутствии учета малоизученных эффектов при разработке математических моделей. В качестве примера можно привести нарушение симметрии движения крупнотоннажного судна по проложенному ледоколом узкому каналу, ширина которого меньше ширины проводимого судна. При рассмотрении такой задачи обычно предполагается, что диаметральной плоскостью судна совпадает с осью канала, а взаимодействие его бортов с кромками канала является симметричным. Такое положение крупнотоннажного судна в канале является устойчивым. Тем не менее в экспериментах в ледовом бассейне с моделями крупнотоннажных судов, движущихся в режиме свободного самохода, было зафиксировано наруше-



Рис. 3. Самоходные испытания судна в узком ледовом канале. Движение судна со смещением от центральной оси ледового канала

Fig. 3. Self-propelled vessel tests in a narrow ice channel. Vessel movement with an offset from the central axis of the ice channel

ние симметрии движения [33; 34]: диаметральной плоскость судна не совпадает с осью проложенного канала (рис. 3). При несимметричном движении один из бортов судна разрушает кромку канала, а другой трется о противоположную кромку. Позже выяснилось, что такой тип движения крупнотоннажных судов капитаны ледоколов часто наблюдают при проводках.

На процесс нарушения симметрии движения оказывает влияние целый ряд факторов, основными из которых являются форма носовой оконечности судна, наличие цилиндрической вставки с отвесным бортом, скорость движения, толщина льда и отношение ширины проложенного ледоколом канала к ширине проводимого судна. Нарушение симметрии происходит из-за реально существующей асимметрии взаимодействия правого и левого бортов судна с кромками канала. Если ледовое воздействие со стороны одного из бортов превысит некоторый порог, то устойчивость симметричного движения нарушается, и судно переходит к другому устойчивому положению.

По нашему мнению, возможность обнаружения описанного эффекта методами математического моделирования маловероятна. Дело в том, что из-за сложности задач морской ледотехники при разработке математических моделей неизбежно используются допущения, иногда довольно значительные. Среди таких допущений соображения о симметрии протекающих процессов занимают одну из лидирующих позиций. Если бы существовала математическая модель ледяного покрова, учитывающая практически все его свойства, то с помощью вычислительного эксперимента, вероятно, можно было бы натолкнуться на указанный эффект. Но такая модель в настоящее время отсутствует и еще не скоро может быть создана.

Еще одним эффектом, который, по-видимому, достаточно трудно обнаружить при численном моделировании, является периодичность прочностных свойств, по крайней мере моделированного льда, обнаруженная в ледовом бассейне [35].

Общей как для физического, так и для математического моделирования является проблема получения достоверной информации о состоянии ледяного покрова и его физико-механических свойствах. Хорошо известно, что основные физико-механические свойства льда подвержены довольно большой изменчивости, о чем можно судить по работам [36; 37 и др.]. Поэтому при проведении физического эксперимента с морскими инженерными сооружениями обычно ориентируются на результаты полевых исследований в месте их предполагаемого размещения. Такие изыскания проводят специализированные организации (например, Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт), которые в соответствии с требованиями заказчиков на основании выполненных исследований дают обобщенные характеристики ледяного покрова, так называемые расчетные случаи ледового воздействия. Часто в результате обработки полевых данных получают оценочные значения для экстремальных значений исследованных величин [38]. Как правило, именно эти значения используются при физическом моделировании. При исследованиях ледовой ходкости судов часто принимается единая прочность льда на изгиб, равная 500 кПа, толщины льда подбираются на основании предполагаемой заказчиком предельной ледопроеходимости судна.

При математическом моделировании принципиально возможен такой же подход, но в этом случае одно из основных достоинств метода — возможность выполнения расчетов при широком варьиро-

вании параметров внешней среды — теряется. Для широкого же варьирования параметров ледовой среды обычно не хватает данных. Дело в том, что параметры ледяного покрова не являются независимыми друг от друга величинами, между ними существует связь, которая в некоторых случаях очевидна, а в некоторых может быть установлена только путем соответствующего статистического анализа. Произвольное назначение параметров ледяной среды при расчетах по математическим моделям может привести к некорректным результатам.

Выводы

В работе рассмотрены наиболее часто применяемые в морской ледотехнике физический и математический методы моделирования. Выполненное сравнение показывает, что при наличии несомненных достоинств у каждого из рассмотренных методов они имеют существенные недостатки и ограничения, которые не позволяют сделать выбор в пользу того или иного подхода к моделированию. Оптимальным вариантом, обеспечивающим дальнейшее развитие морской ледотехники, по мнению авторов, является совместное применение указанных методов при решении различных прикладных задач. Такой подход начал формироваться в последние годы, при этом инициатива в основном исходит от специалистов, в первую очередь занятых физическими экспериментами. Это связано с тем, что ледовые бассейны в практике работы сталкиваются с необходимостью решения сложных практических задач, моделирование которых в полном объеме либо невозможно, либо требует очень больших затрат труда и времени. Эффективное решение подобных задач возможно лишь при содружестве «экспериментаторов» и «математиков».

Из изложенного следует еще один вывод, который в большей степени относится не к исследователям, а к заказчикам работы. Создание физических и математических моделей сложных технических объектов само по себе является довольно сложной научной проблемой, на решение которой требуются время и ресурсы, иногда весьма значительные. При планировании проектов эту стадию необходимо прогнозировать и учитывать, что в последние годы, к сожалению, не делается. Времени на научно-исследовательские работы в ходе реализации крупных проектов выделяется крайне мало. В таких условиях качественное выполнение как физического, так и математического моделирования становится затруднительной, а порой и нереализуемой задачей.

Работа выполнена как часть проекта «Исследование статистических закономерностей ледовых нагрузок на инженерные сооружения и разработка нового метода их вероятностного моделирования» № 0784-2020-0021 при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Литература

1. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. — М.: Наука, 1977. — 440 с.
2. Баренблатт Г. И. Автомодельные явления — анализ размерности и скейлинг / Пер. с англ. — Долгопрудный: Изд. дом «Интеллект», 2009. — 215 с.
3. Седов Л. И. Об основных моделях в механике. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1992. — 151 с.
4. Неуймин Я. Г. Модели в науке и технике: история, теория, практика. — Л.: Наука, 1984. — 189 с.
5. Сазонов К. Е. Роль В. Фруда в создании теории корабля: К 200-летию со дня рождения // Судостроение. — 2010. — № 5. — С. 63—68.
6. Готман А. Ш. К 200-летию со дня рождения Вильяма Фруда // Фундам. и прикладная гидрофизика. — 2011. — Т. 4, № 1. — С. 88—96.
7. Сазонов К. Е. «Царь-ледокол» академика А. Н. Крылова // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2021. — Т. 67, № 2. — С. 208—221.
8. Боруевич В. О., Русецкий А. А., Сазонов К. Е., Соловьев И. А. Современные гидродинамические лаборатории. — СПб.: ФГУП «Крылов. гос. науч. центр», 2019. — 316 с.
9. ITTC — Recommended Procedures and Guidelines. General Guidance and Introduction to Ice Model Testing. 7.5-02-04-01. — 2017. — URL: <https://www.ittc.info/media/8051/75-02-04-01.pdf>.
10. Sodhi D. S., Griggs D. B., Tucker W. B. Ice performance tests of USCGC Healy // Proceedings of the 16th International Conference POAC'01, Ottawa, Canada. — [S. l.], 2001. — Vol. 2. — P. 893—908.
11. Каневский Г. И., Клубничкин А. М., Сазонов К. Е. Прогнозирование характеристик ходкости многовальных судов. — СПб.: ФГУП «Крылов. гос. науч. центр», 2019. — 160 с.
12. Kanevskii G. I., Klubnichkin A. M., Sazonov K. E. The calculation of the propulsion in ice field using alternative system of the propeller-hull interaction coefficients // Proceedings of the ASME 2018 37d International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE, Madrid, Spain. — [S. l.], 2018. — (Paper 77210).
13. Вершинин С. А., Трусов П. А., Кузмичев К. В. Воздействие льда на сооружения Сахалинского шельфа. — М.: Ин-т Гипростроймост, 2005. — 208 с.
14. Добродеев А. А., Сазонов К. Е. Физическое моделирование ледовой нагрузки на протяженные гидротехнические сооружения. Сооружения с вертикальной стенкой // Арктика: экология и экономика. — 2020. — № 4 (40). — С. 77—89. — DOI: 10.25283/2223-4594-2020-4-77-89.
15. Добродеев А. А., Сазонов К. Е. Физическое моделирование ледовой нагрузки на протяженные гидротехнические сооружения. Откосные сооружения с наклонной гранью // Арктика: экология и экономика. — 2021. — Т. 11, № 1. — С. 90—100. — DOI: 10.25283/2223-4594-2021-1-90-100.
16. Сазонов К. Е. Теоретические основы плавания судов во льдах. — СПб.: ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, 2010. — 274 с.

17. Valanto P. Numerical prediction of ice loads and resistance of ships advancing in level ice // Proceedings of 6th International Conference on Ships and Marine Structures in Cold Regions, ICETECH'2000, St. Petersburg. — [S. l.], 2000. — P. 215—230.
18. Ралстон Т. Анализ ледовых нагрузок на конические конструкции в рамках теории предельного равновесия // Физика и механика льда / Ред. П. Трюде. — М.: Мир, 1983. — С. 282—297.
19. Croasdale K., Cammaert A., Metge M. A Method for the Calculation of Sheet Ice Loads on Sloping Structures // Proceedings of IAHR Ice Symposium, Trondheim, Norway. — [S. l.], 1994. — P. 874—881.
20. 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. — Iss. 92. — P. 1—16.
21. Бирюков В. А., Миряха В. А., Петров И. Б. Анализ зависимости глобальной нагрузки от механических параметров льда при взаимодействии ледяного поля с конструкцией // Докл. Акад. наук. — 2017. — Т. 474, № 6. — С. 696—699.
22. Петров И. Б. Проблемы моделирования природных и антропогенных процессов в Арктической зоне Российской Федерации // Мат. моделирование. — 2018. — Т. 30, № 7. — С. 103—136.
23. Гриневич Д. В., Бузник В. М., Нужный Г. А. Обзор применения численных методов для моделирования деформации и разрушения льда // Труды ВИАМ. — 2020. — № 8 (90). — С. 109—122.
24. Von Bock und Polach R., Ehlers S. Model scale ice. — Pt. B: Numerical model // Cold Regions Science and Technology. — 2013. — 94. — P. 53—60.
25. Лян Л., Шхинек К. Н. Воздействие льда на откосные сооружения // Инж.-строит. журн. — 2014. — № 1. — С. 71—79.
26. Hopkins M. A. Four stages of pressure ridging // J. Geophys. Res. — 1998. — 103 (C10). — P. 21883—21891.
27. Hansen E., Loset S. Modeling floating offshore units moored in broken ice: model description // Cold Regions Science and Technology. — 1999. — 29. — P. 97—106.
28. Ranta J., Polojärvia A. Limit mechanisms for ice loads on inclined structures: Local crushing // Marine Structures. — 2019. — 67. — P. 102633.
29. Long X., Liu L., Liu S., Ji S. Discrete Element Analysis of High-Pressure Zones of Sea Ice on Vertical Structures // J. Mar. Sci. Eng. — 2021. — 9. — 348 p.
30. Шхинек К. Н., Балагура С. В., Большев А. С., Фролов С. А. Математическое моделирование воздействия ровного льда и торосов с заякоренными плавучими сооружениями типа FPU и платформами типа SPAR // Науч.-техн. сб. PMPC. — 2009. — № 32. — P. 93—108.
31. Løset S., Shkhinek K. N., Gudmestad O. T., Høyland K. V. Actions from ice on Arctic Offshore and Coastal Structures. — Trondheim; St. Petersburg; Moscow; Krasnodar: Publ. "LAN", 2006. — 271 p.
32. Zhou L., Diao F., Song M. et al. Calculation Methods of Icebreaking Capability for a Double-Acting Polar Ship // J. Mar. Sci. Eng. — 2020. — 8. — 179 p.
33. Добродеев А. А., Клементьева Н. Ю., Сазонов К. Е. Несимметричное движение крупнотоннажных судов в «узком» канале // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2018. — Т. 64, № 2. — С. 200—207.
34. Dobrodeev A. A., Klementyeva N. Y., Sazonov K. E. Large ship motion mechanics in "narrow" ice channel // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. — 193. — 2018. — P. 012017.
35. Богородский В. В., Гаврило В. П. Лед. Физические свойства. Современные методы в гляциологии. — Л.: Гидрометеиздат, 1980. — 384 с.
36. Timco G. W., Weeks W. F. A review of the engineering properties of sea ice // Cold Regions Science and Technology. — 2010. — 60 (2). — P. 107—129.
37. Епифанов В. П., Сазонов К. Е. Влияние стоячих волн на локальную прочность ледяного поля // Докл. Акад. наук. — 2019. — Т. 489, № 6. — С. 30—35.
38. Ледяные образования морей Западной Арктики / Под ред. Г. К. Зубакина. — СПб., ААНИИ, 2006. — 272 с.

Информация об авторах

Добродеев Алексей Алексеевич, кандидат технических наук, заместитель начальника лаборатории — начальник сектора, Крыловский государственный научный центр (196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44), старший преподаватель, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (190121, Россия, Санкт-Петербург, Лощманская ул., д. 3), старший научный сотрудник, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (195251, Россия, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29), e-mail: A_Dobrodeev@ksrc.ru.

Сазонов Кирилл Евгеньевич, доктор технических наук, начальник лаборатории, Крыловский государственный научный центр (196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44), профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (190121, Россия, Санкт-Петербург, Лощманская ул., д. 3), ведущий научный сотрудник, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (195251, Россия, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29), e-mail: kirsaz@rambler.ru.

Библиографическое описание данной статьи

Добродеев А. А., Сазонов К. Е. Моделирование в морской ледотехнике // Арктика: экология и экономика. — 2021. — Т. 11, № 4. — С. 557—567. — DOI: 10.25283/2223-4594-2021-4-557-567.

MODELING IN MARINE ICE ENGINEERING

Dobrodeev, A. A., Sazonov, K. E.

Krylov State Research Centre, Saint-Petersburg State Marine Technical University, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (St. Petersburg, Russian Federation)

The article was received on July 16, 2021

Abstract

In the modern world, it is already difficult to imagine the creation of a significant engineering structure without modeling its external and internal appearance, the operation modeling of the main mechanisms, operating conditions and many other design features and emerging phenomena at the design stage. The paper interprets modeling and simulation as one of the computational methods that allow us to obtain quantitative results when studying ice impact on marine structures, for e.g. icebreakers and transport vessels, platform substructures, hydro-technical installations. In connection with the above, from the existing classification of modeling methods, the authors consider the physical and mathematical ones in the work. They present comparative advantages of both methods in their application in the problems of marine ice engineering, as well as the prospects for their development for solving a wide range of scientific problems aimed at the development of Arctic shipbuilding.

Keywords: *physical modeling, ice model tank, numerical modeling, ice properties.*

This work was carried out as part of the project “Research of statistical properties relating to the ice loads on engineering structures and the development of a new method of their probabilistic modeling” No. 0784-2020-0021 with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

References

1. Sedov L. I. Methods of similarity and measurement in mechanics. Moscow, Nauka, 1977, 440 p. (In Russian).
2. Barenblatt G. I. Self-similar phenomena-dimensional analysis and scaling. Dolgoprudnyi, Publ. “Intellect”, 2009, 215 p. (In Russian).
3. Sedov L. I. About the main models in mechanics. Moscow, Moscow Univ. Press, 1992, 151 p. (In Russian).
4. Neujmin Ya. G. Models in science and technology: history, theory, practice. Leningrad, Nauka, 1984, 189 p. (In Russian).
5. Sazonov K. E. The role of V. Froude in the creation of the theory of the ship. Sudostroenie, 2010, no. 5, pp. 61—66. (In Russian).
6. Gotman A. Sh. On the 200th anniversary of the birth of William Froude. Fundamental and applied hydrophysics, 2011, vol. 4, no. 1, pp. 88—96. (In Russian).
7. Sazonov K. E. “Tsar-Icebreaker” by academician A. N. Krylov. Problemy Arktiki i Antarktiki, 2021, vol. 67, no. 2, pp. 208—221. (In Russian).
8. Borusevich V. O., Rusetskii A. A., Sazonov K. E., Solov'ev I. A. The modern hydrodynamic laboratories. St. Petersburg, Krylov State Research Centre, 2019, 316 p. (In Russian).
9. ITTC — Recommended Procedures and Guidelines. General Guidance and Introduction to Ice Model Testing. 7.5-02-04-01. 2017. Available at: <https://www.ittc.info/media/8051/75-02-04-01.pdf>.
10. Sodhi D. S., Griggs D. B., Tucker W. B. Ice performance tests of USCGC Healy, Proc. 16th Int. Conf. POAC'01, Ottawa, Canada, 2001, vol. 2, pp. 893—908.
11. Kanevskij G. I., Klubnichkin A. M., Sazonov K. E. Forecasting the characteristics of the seaworthiness of multi-tow vessels. St. Petersburg, Krylov State Research Centre, 2019, 160 p.
12. Kanevskij G. I., Klubnichkin A. M., Sazonov K. E. The calculation of the propulsion in ice field using alternative system of the propeller-hull interaction coefficients. Proceedings of the ASME 2018 37d International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE, Madrid, Spain. [S. I.], 2018. Paper 77210.
13. Vershinin S. A., Truskov P. A., Kuzmichev K. V. The impact of ice on the structures of the Sakhalin shelf. Moscow, Institute Giprostroymost, 2005, 208 p. (In Russian).
14. Dobrodeev A. A., Sazonov K. E. Physical modeling of ice load on extended hydraulic constructions. The vertical wall constructions. Arktika: ekologiya i ekonomika. [Arctic: Ecology and Economy], 2020, no. 4 (40), pp. 77—89. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-4-77-89. (In Russian).
15. Dobrodeev A. A., Sazonov K. E. Physical modeling of ice load on extended hydraulic constructions. Slope constructions with an inclined surface. Arktika: ekologiya i ekonomika. [Arctic: Ecology and Economy], 2021, vol. 11, no. 1, pp. 90—100. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-1-90-100. (In Russian).
16. Sazonov K. E. Theoretical foundations of ship navigation in ice. St. Petersburg, Krylov State Research Centre, 2010, 274 p. (In Russian).
17. Valanto P. Numerical prediction of ice loads and resistance of ships advancing in level ice. Proceedings

- of 6th International Conference on Ships and Marine Structures in Cold Regions, ICETECH'2000, St. Petersburg. [S. I.], 2000, pp. 215—230.
18. *Ralston T.* Analysis of ice loads on conical structures in the framework of the theory of limit equilibrium. Collection of Physics and mechanics of ice. Ed. by P. Trudet. Moscow, Mir, 1983, pp. 282—297. (In Russian).
19. *Croasdale K., Cammaert A., Metge M.* A Method for the Calculation of Sheet Ice Loads on Sloping Structures. Proceedings of IAHR Ice Symposium, Trondheim, Norway, 1994, pp. 874—881.
20. *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, iss. 92, pp. 1—16.
21. *Biryukov V. A., Miryaha V. A., Petrov I. B.* Analysis of the dependence of the global load on the mechanical parameters of ice during the interaction of the ice field with the structure. *Dokl. Akad. nauk*, 2017, vol. 474, no. 6, pp. 696—699. (In Russian).
22. *Petrov I. B.* Problems of modeling natural and anthropogenic processes in the Arctic zone of the Russian Federation. *Mat. modelirovaniye*, 2018, vol. 30, no. 7, pp. 103—136. (In Russian).
23. *Grinevich D. V., Buznik V. M., Nuzhnyj G. A.* Review of the application of numerical methods for modeling the deformation and destruction of ice. *Trudy VIAM*, 2020, no. 8 (90), pp.109—122. (In Russian).
24. *Von Bock und Polach R., Ehlers S.* Model scale ice. Pt. B: Numerical model. *Cold Regions Science and Technology*, 2013, 94, pp. 53—60.
25. *Lyan L., Shkhinek K. N.* The impact of ice on slope structures. *Inzh.-stroitel. zhurn.*, 2014, no. 1, pp. 71—79. (In Russian).
26. *Hopkins M. A.* Four stages of pressure ridging. *J. Geophys. Res.*, 1998, 103 (C10), pp. 21883—21891.
27. *Hansen E., Loset S.* Modeling floating offshore units moored in broken ice: model description. *Cold Regions Science and Technology*, 1999, 29, pp. 97—106.
28. *Rantaa J., Polojärvia A.* Limit mechanisms for ice loads on inclined structures: Local crushing. *Marine Structures*, 2019, 67, p. 102633.
29. *Long X., Liu L., Liu S., Ji S.* Discrete Element Analysis of High-Pressure Zones of Sea Ice on Vertical Structures. *J. Mar. Sci. Eng.*, 2021, 9, 348 p.
30. *Shkhinek K. N., Balagura S. V., Bol'shev A. S., Frolov S. A.* Mathematical modeling of the impact of flat ice and hummocks with anchored floating structures of the FPU type and platforms of the SPAR type. *Nauch.-tekhn. sb. RMRS*, 2009, no. 32, pp. 93—108. (In Russian).
31. *Løset S., Shkhinek K. N., Gudmestad O. T., Høyland K. V.* Actions from ice on Arctic Offshore and Coastal Structures. Trondheim; St. Petersburg; Moscow; Krasnodar: Publ. "LAN", 2006, 271 p.
32. *Zhou L., Diao F., Song M., Han Y., Ding S.* Calculation Methods of Icebreaking Capability for a Double-Acting Polar Ship. *J. Mar. Sci. Eng.*, 2020, 8, 179 p.
33. *Dobrodeev A. A., Klement'eva N. Yu., Sazonov K. E.* Asymmetric movement of large-tonnage vessels in the "narrow" channel. *Problemy Arktiki i Antarktiki*, 2018, vol. 64, no. 2, pp. 200—207. (In Russian).
34. *Dobrodeev A. A., Klementyeva N. Y., Sazonov K. E.* Large ship motion mechanics in "narrow" ice channel. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci*, 2018, p. 193 012017.
35. *Bogorodskij V. V., Gavrilov V. P.* Led. Physical properties. Modern methods in glaciology. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1980, 384 p. (In Russian).
36. *Timco G. W., Weeks W. F.* A review of the engineering properties of sea ice. *Cold Regions Science and Technology*, 2010, 60 (2), pp. 107—129.
37. *Epifanov V. P., Sazonov K. E.* The effect of standing waves on the local strength of the ice field. *Dokl. Akad. nauk*, 2019, vol. 489, no. 6, pp. 30—35. (In Russian).
38. *Ice formations of the seas of the Western Arctic.* Ed. by G. K. Zubakin. St. Petersburg, Arctic and Antarctic Research Institute, 2006, 272 p. (In Russian).

Information about the authors

Dobrodeev, Aleksei Alekseevich, PhD of Engineering Science, Head of Ice Researching Section, Krylov State Research Centre (44, Moskovskoe shosse, St. Petersburg, Russia, 196158), Chief Lecturer, St. Petersburg State Marine Technical University (3, Lotsmanskaya Str., St. Petersburg, Russia, 190121), Senior Researcher, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (29, Polytechnicheskaya Str., St. Petersburg, Russia, 195251), e-mail: A_Dobrodeev@ksrc.ru.

Sazonov, Kirill Evgenevich, Doctor of Engineering Science, Head of Ice Laboratory, Krylov State Research Centre (44, Moskovskoe shosse, St. Petersburg, Russia, 196158), Professor, St. Petersburg State Marine Technical University (3, Lotsmanskaya Str., St. Petersburg, Russia, 190121), Leading Researcher, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (29, Polytechnicheskaya Str., St. Petersburg, Russia, 195251), e-mail: kirsaz@rambler.ru.

Bibliographic description of the article

Dobrodeev, A. A., Sazonov, K. E. Modeling in marine ice engineering. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. [Arctic: Ecology and Economy], 2021, vol. 11, no. 4, pp. 557—567. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-4-557-567. (In Russian).