УДК 626.01; 627.22

**Моделирование в морской ледотехнике**

*В современном мире уже 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. В связи с вышесказанным из существующей классификации методов моделирования в работе рассмотрены физическое и математическое. Приведены сравнительные достоинства обоих методов при их 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 – это общенаучный метод изучения разнообразных объектов окружающего нас мира с помощью моделей этих объектов. Построение и исследование моделей уже 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 является многозначным понятием, что не позволяет разработать общую ее классификацию. В соответствии с многозначностью понятия модель существует много различных видов моделирования. В данной работе применительно к морской ледотехнике будут рассмотрены два вида моделирования: физическое и математическое.

Под физическим моделированием будем понимать такой метод исследования, при котором изучаемый природный и/или технический объект заменяется его уменьшенной (увеличенной) копией – моделью (рис. 1). Этот метод включает в себя три основных этапа: создание физической модели изучаемого объекта, проведение комплекса экспериментальных исследований с моделью, перенос полученных результатов на реальный (натурный) объект. Основой для метода физического моделирования является фундаментальная теория подобия и размерности [1,2].

Основным понятием математического моделирования является 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.

|  |  |
| --- | --- |
| E:\Добродеев Алексей\Добродеев Работа в ЦНИИ\44. СТАТЬИ и КОНФЕРЕНЦИИ\2021\Арктика Экология и Экономика-2\Фотографии для статьи\ПРИРАЗЛОМНАЯ 014.jpg | E:\Добродеев Алексей\Добродеев Работа в ЦНИИ\44. СТАТЬИ и КОНФЕРЕНЦИИ\2021\Арктика Экология и Экономика-2\Фотографии для статьи\DSC_7286р.jpg |
| а) | б) |

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

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

В настоящее время под математическим моделированием обычно понимают изучение свойств моделируемого объекта с применением методов вычислительной математики. При этом часто математическая модель представляет собой определенную совокупность теоретических моделей и эмпирических соотношений, которые, по мнению исследователя, наилучшим образом описываю 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 века. Всеобщее использование метода физического моделирования связано с деятельностью выдающего 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. Поэтому, когда возникла необходимость в проектировании мощных ледоколов для освоения Северного морского пути стали предприниматься попытки его применения для исследования 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 проведения этих работ было выявлено существенное отличие в применении метода 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, обладающую определенным набором свойств, отличающихся от натурного морского льда. Кроме этого потребовалось создать теорию моделирования для ледового бассейна и обосновать методику переноса полученных результатов на натурные условия. Создание ледового бассейна позволило выполнять измерения силового воздействия льда на изучаемый инженерный объект. Это обстоятельство создало 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 в других странах [8]. Для координации и стандартизации методов проведения исследований в ледовых бассейнах разных стран в рамках Международной конференции опытовых бассейнов (МКОБ) создан специальный ледовый комитет, разрабатывающий рекомендации по процедуре проведения испытаний [9]. По мере расширения номенклатуры объектов исследования и моделируемых ледовых условий рекомендации ледового комитета МКОБ пересматриваются, уточняются и корректируются. В случае необходимости разрабатываются новые документы, отражающие появление новых типов экспериментов, которые осуществляются в ледовых бассейнах.

Как и любое экспериментальное исследование, модельный эксперимент имеет присущие ему достоинства и недостатки. Важнейшим преимуществом физического эксперимента в морской ледотехнике является возможность измерения глобальной ледовой нагрузки, действующей на модель в целом, а также измерение 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 . Их связь задается следующим соотношением:

, (1)

где  – 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 получать даже приближенные оценки полного ледового сопротивления, т.к. традиционные методы расчета тяговых характеристик не позволяли рассчитать тягу судна при его движении в ледовых условиях. Только разработка альтернативной (швартовной) 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, соответственно, 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 ледовую нагрузку, действующую на панель. 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 зрение такое восстановление является некорректной математической задачей. Ее решение возможно только с привлечением довольно сильных и зачастую мало обоснованных допущений. Определенные исследования в этой области сейчас ведутся в ледовом опытовом бассейне Крыловского Центра. Они направлены на изучение зависимости локальной и глобальной ледовой нагрузок применительно к объектам с различной формой корпуса (рис. 2).



Рис. 2. Сопоставление локальных и глобальных ледовых нагрузок путем экспериментов в ледовом опытовом бассейне

Fig. 2. Comparison of local and global ice loads by experiments in an ice model tank

К достоинствам физического моделирования относится возможность воспроизведения характера протекания физического процесса, который происходит 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 исследуемых 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 одним важнейшим достоинством метода физического моделирования является возможность сознательного выбора режимов проведения экспериментов. Причем эта возможность касается не только параметров движения исследуемой модели, но и ледовых условий. К настоящему времени в практике работы ледовых бассейнов накоплен опыт воспроизведения таких ледовых условий как ровный и битый ледяной покров, наслоенный и тертый лед, торосистые образования, имитация ледовых сжатий. В ледовых бассейнах также возможно воспроизведение различных комбинаций указанных ледовых условий.

К недостаткам метода физического моделирования ледовой нагрузки можно отнести, во-первых, сложность эксперимента. Для его осуществления необходимо создание специализированной лаборатории – ледового бассейна. Современный ледовый бассейн представляет собой высокотехнологичное производство, предназначенное для воспроизведения в нем различных ледовых условий и проведение экспериментов. Ледовый бассейн включает в себя большой набор разнообразных систем, обеспечивающих его функционирование, основной из которых является холодильный комплекс. Из сказанного следует, что такого типа лаборатории 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.

Вторым недостатком ледовых бассейнов является относительно высокая стоимость экспериментов, проводимых в них, а также довольно большая продолжительность испытаний. Высокая стоимость объясняется большими затратами на выполнение технологических процессов приготовления льда, обслуживание технологического оборудования, обеспечивающего функционирование бассейна, затраты на ремонтные работы оборудования и помещений, находящихся под постоянным воздействием изменяющейся температуры (колебания температуры в летние месяцы может достигать 50 0С) и другие факторы.

Ледовые испытания характеризуются довольно большими временными затратами по отношению к объему получаемой в них информации. Такое положение вещей 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 временной промежуток, имеющий продолжительность порядка одних суток. В зависимости от применяемой в том или ином бассейне технологии эта величина может варьироваться, но вряд ли можно достигнуть удовлетворительного результата менее чем за 12 – 14 часов. Из этого следует, что в среднем в ледовом бассейне при его работе в нормальном режиме можно намораживать по два моделированных поля в неделю. В экстренных случаях, в принципе, возможно увеличить число полей, приготавливаемых за одну неделю. Однако после интенсивного намораживания нескольких полей подряд необходимо «растепление» бассейна, т.к. в нем намерзает большое количество паразитного льда, который мешает его 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 будет провести только после приготовления следующего поля моделированного льда. Это обстоятельство, а также конечные размеры ледяного покрова, определяют объем информации, который можно получить в эксперименте. Все ледовые бассейны стараются повысить эффективность своей работы, составляя план экспериментов в одном ледяном покрове таким образом, чтобы получить максимум информации из одного поля. Так, после проведения испытаний в неразрушенном ледяном покрове, могут проводиться испытания в битых и/или тертых льдах, испытания по исследованию возможности выхода модели из собственного канала, приготавливаться торосистые образования и т.д.

Как любая экспериментальная установка каждый ледовый бассейн имеет ряд ограничений. Эти ограничения обычно связаны с геометрическими размерами бассейна, а также 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 этого 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 ледотехники обладает рядом важных достоинств, но имеет ряд недостатков и ограничений. Несмотря на постоянно увеличивающиеся экспериментальные возможности ледовых бассейнов, они не безграничны.

**Математическое моделирование**

В настоящее время в качестве основной альтернативы методу физического моделирования рассматривается моделирование математическое. Часто можно слышать утверждения, что с помощью математического моделирования можно решить любые инженерные задачи, причем эти решения будут обладать большей точностью, позволяют получить большой объем разнообразной информации и, самое главное, они дешевле, чем экспериментальные исследования.

Активное использование метода математического моделирования началось в морской ледотехнике в последней четверти прошлого века в связи с повсеместным внедрением в практику научных исследований ЭВМ. 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. Кроасдайла [19]. Указанные расчетные методы практически сразу же были использованы при создании новых инженерных объектов, т.к. позволяли быстро получать ответ на целый ряд проектных задач. Они позволяли проводить предварительную оптимизацию конструкций, отбрасывая наиболее плохие решения, перед проведением исследований в ледовых бассейнах, что позволило снизить объем модельных испытаний. С течением времени методы расчета совершенствовались, создавались новые программы, например, довольно распространенная в настоящее время программа расчета ледового сопротивления, создана 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. Это классическое направление, 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 исследования влияния физико-механических свойств льда на величину возникающих нагрузок. Довольно подробный обзор публикаций по этому направлению содержится в работе [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 затруднительно описывать движение обломков льда, образовавшихся после его разрушения.

Известно, что МДЭ эффективен для анализа достаточно быстрых процессов, связанных с переносом вещества. Поэтому, первоначально этот метод в морской ледотехнике применялся для описания такого рода процессов, например, формирование торосистого образования [26] или взаимодействие 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 в настоящий момент 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 широкому применению этого метода 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 в математическом моделировании в морской ледотехнике является создание относительно простых инженерных программ расчета, предназначенных для решения определенных задач. Такие программы обычно создаются исследовательскими группами и нацелены решение стоящих перед ними проблем. Как правило, такие разработки не направлены на всеобщее использование. При их создании широко используется эмпирическая информация и различные приближенные формулы. Примером таких программ может 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 внутренних причин, которые препятствуют бурному развитию численного моделирования. По мнению авторов, одной из таких фундаментальных причин является отсутствие общепризнанного математического описания льда и ледяного покрова как физического объекта. Трудности с его описанием связаны 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 работе [31]. Как указано в этой работе, реализация того или иного типа разрушения носит вероятностный характер. Так, к примеру, в экспериментах по изучению воздействия льда на двухопорные сооружения часто наблюдается не совпадающие типы разрушения перед различными опорами.

**Перспективы применения методов физического и математического моделирования**

Из приведенного выше анализа следует, что ни метод физического моделирования, ни метод математического моделирования не обладают достаточной общностью для решения любых задач морской ледотехники. Оба метода исследования имеют как существенные достоинства, так и значительные недостатки, и ограничения. По мнению авторов, наиболее эффективной стратегией дальнейшего развития исследований в области морской ледотехники является совместное применение физического и математического методов моделирования. Необходимо отметить, что такая практика все чаще применяется в работе ледовых бассейнов. Такой вывод подтверждается публикациями в научной периодике [24,32 и др.]. При этом для математического моделирования, как правило, используемый программный продукт, который относится к третьему из рассмотренных выше типов. Это позволяет констатировать, что специалисты в области физического моделирования в настоящее время активно используют метод математического моделирования в свой работе, 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, которая фактически сводится к участию в валидации разработанных методов. С такой позицией трудно согласиться по целому ряду причин. Основные из них приводятся ниже.

Выше 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, которая бы описывала все его физико-механические свойства. Для эффективного развития численных методов было бы достаточно разработки ряда моделей льда с указанием приблизительного диапазона их использования. Важным моментом при этом является достижение некоторого консенсуса среди разработчиков программного продукта и конечных пользователей полученных результатов. Пока такие модели не разработаны и не достигнут консенсус, расчеты ледовых воздействий на инженерные объекты не могут обладать необходимой общностью. Строго говоря, часто имеющийся программный продукт невозможно сравнивать между собой и, соответственно, определять наиболее эффективный и перспективный.

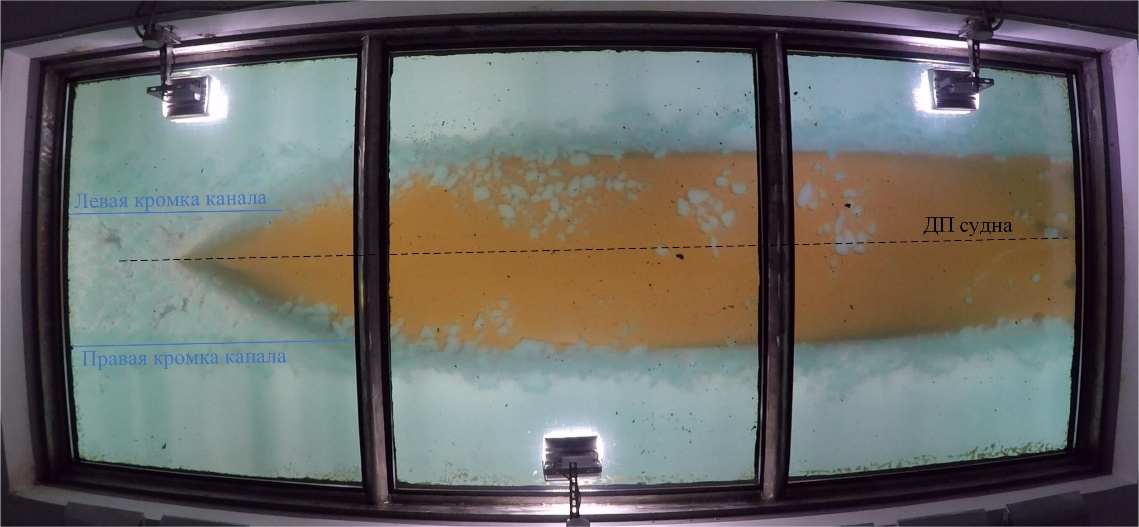


Рис. 3. Самоходные испытания судна в узком ледовом канале.

Движение судна со смещением от центральной оси ледового канала

Fig. 3. Self-propulsion tests of vessel in narrow ice channel.

Moving of vessel with an offset from the central axis of the ice channel

Еще одной проблемой является отсутствие учета малоизученных эффектов при разработке математических моделей. В качестве примера можно указать нарушение симметрии движения крупнотоннажного судна по узкому каналу, проложенному ледоколом, ширина которого меньше ширины проводимого судна. При рассмотрении такой задачи обычно предполагается, что диаметральная плоскость проводимого судна совпадает с осью канала, а взаимодействие бортов судна с кромками канала является симметричным. Необходимо отметить, что такое положение крупнотоннажного судна в канале является устойчивым. Тем не менее, в модельных экспериментах в ледовом бассейне с моделями крупнотоннажных судов, движущихся в режиме свободного самохода, было зафиксировано нарушение симметрии движения [33,34]. Это нарушение симметрии заключается в том, что диаметральная плоскость судна не совпадет 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 осуществлении их проводок.

На процесс нарушения симметрии 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 движения происходит из-за реально существующей не симметрии 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 их математических моделей неизбежно используются, иногда довольно сильные, допущения. Среди таких допущений соображения о симметрии протекающих процессов занимают одну из лидирующих позиций. По-видимому, если бы существовала математическая модель ледяного покрова, в которой были бы учтены «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, по-видимому, еще не скоро может быть создана.

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

Общей проблемой, 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 другим. Поэтому при проведении физического эксперимента с морскими инженерными сооружениями обычно ориентируются на результаты полевых исследований в месте предполагаемого их 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. Необходимо отметить, что часто в результате обработки полевых данных получают оценочные значения для экстремальных значений исследованных величин [38]. Как правило, именно эти значения принимаются 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 ледопроходимости судна.

При математическом моделировании принципиально возможен такой же подход, но, в этом случае одно из основных достоинств метода – возможность выполнения расчетов при широком варьировании 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 проведения 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 методы моделирования: физический и математический. 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, который бы обеспечил дальнейшее развитие морской ледотехники, по мнению авторов, является совместное применение указанных подходов при решении различных прикладных задач. Указанный подход начал формироваться в последние годы, при этом инициатива в основном происходит от специалистов, в первую очередь, занятых физическим экспериментом. Это связано с тем, что ледовые бассейны в практике своей работы сталкиваются с необходимостью сложных практических задач, моделирование которых в полном объеме или невозможно, или требует очень больших затрат труда и времени. Эффективное решение таких задач возможно лишь при содружестве «экспериментаторов» и «математиков».

Из изложенного выше следует еще один вывод, который в большей степени относится не к исследователям, а к заказчикам работы. Создание физической и математической 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 ситуациях качественное выполнение как физического, так и математического моделирования становится затруднительной, а порою и нереализуемой задачей.

**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 / Долгопрудный: Изд. дом «Иртеллект», 2009. — 215 с.
3. *Седов Л. И.* Об основных моделях в механике / М., Изд-во МГУ, 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 // Судостроение. — 2010. — № 5. — С. 61—66.
6. *Готман А. Ш.* К 200-летию со дня рождения Вильяма Фруда // Фундаментальная 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. *Борусевич 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 // Proc. 16th Int. Conf. POAC’01, Ottawa, Canada. — 2001. — Vol.2. — pp. 893-908.
11. *Каневский Г. И., Клубничкин А. М., Сазонов К. Е.* Прогнозирование характеристик ходкости многовальных судов / СПб: ФГУП «Крыловский государственный научный 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 37rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE, Madrid, Spain. — 2018. — Paper 77210.
13. *Вершинин С. А., Трусков П. А., Кузмичев К. В.* Воздействие льда на сооружения Сахалинского шельфа. / М.: «Институт 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. академика А.Н. Крылова, 2010. — 274 с.
17. *Valanto P.* Numerical prediction of ice loads and resistance of ships advancing in level ice // Proc. of 6th Int. Conf. on Ships and Marine Structures in Cold Regions, ICETECH’2000, St. Petersburg. — 2000. — P. 215—230.
18. *Ралстон Т.* Анализ ледовых нагрузок на конические конструкции в рамках теории предельного равновесия // Сб. Физика и механика льда, под ред. П. Трюде, Москва, “Мир”. — 1983. — C. 282—297.
19. *Croasdale K., Cammaert A., Metge M.* A Method for the Calculation of Sheet Ice Loads on Sloping Structures // Proc. IAHR Ice Symposium, Trondheim, Norway. — 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. — Issue 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 // ДАН. —2017. — Т. 474, № 6. — С. 696—699.
22. *Петров И. Б.* Проблемы моделирования природных и антропогенных процессов в Арктической зоне Российской Федерации // Математическое 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 — Part B: Numerical model // Cold Regions Science and Technology. — 2013. — 94. — P. 53—60.
25. *Лян Л., Шхинек К. Н.* Воздействие льда на откосные сооружения // Инженерно-строительный журнал. — 2014. — №1. — C.71—79.
26. *Hopkins M.A.* Four stages of pressure ridging // J. Geophys. Res. — 1998. — 103(C10): 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. *Rantaa J., Polojärvia A.* Limit mechanisms for ice loads on inclined structures: Local crushing // Marine Structures. — 2019. — 67. — 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 // Научно-технический сборник РМРС. — 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., Han Y., Ding S.* 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. А., Klementyeva N. Y., Sazonov K. E.* Large ship motion mechanics in “narrow” ice channel // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. — 2018. — Sci. 193 012017.
35. *Богородский В. В., Гаврило В. П.* Лед. Физические свойства. Современные методы в гляциологии / Л.: Гидрометеоиздат. — 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 // ДАН. — 2019. — Т. 489, № 6. — С. 30—35.
38. Ледяные образования морей Западной Арктики. Под ред. д.г.н. Г. К. Зубакина / СПб., ААНИИ. — 2006. — 272 с.