

Экспериментальные методы определения глобальной ледовой нагрузки на морские инженерные сооружения

К. Е. Сазонов, доктор технических наук

ФГУП Крыловский государственный научный центр, Санкт-Петербург

А. В. Чернов¹

ФГБУ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург

Рассмотрены экспериментальные методы определения глобальной ледовой нагрузки на морские инженерные сооружения. Отдельно рассмотрены методы измерений ледовой нагрузки в натуральных и модельных условиях. Подробно описаны натурные эксперименты с ледоколом «Капитан Николаев», носовая оконечность которого хорошо имитирует коническое инженерное сооружение. Описаны возможности модельного эксперимента для определения глобальной ледовой нагрузки на морские сооружения со сложной геометрией поверхностей, взаимодействующих со льдом.

Ключевые слова: глобальная ледовая нагрузка, морское инженерное сооружение, ледовый опытовый бассейн, натурные испытания, ледовые модельные испытания.

Введение

Начало XXI в. отмечено повышением интереса к освоению арктического региона Земли. Одно из основных направлений деятельности человека в арктических и замерзающих морях — добыча углеводородного сырья. Наиболее востребованными районами освоения углеводородных месторождений в Арктическом бассейне следует считать Баренцево море с проектами Штокмановского газоконденсатного месторождения (Россия) и месторождения Снёвит (Snøhvit, Норвегия), акваторию Печорского моря с установленными платформой «Приразломная» и терминалом «Варандей», акватории, прилегающие к полуострову Ямал, месторождения в акватории Прудо Бэй (Prudhoe Bay) на северном побережье полуострова Аляска (США), устье реки Маккензи (Канада), Канадский Арктический архипелаг. Крупнейшими проектами в неарктических замерзающих морях являются группа проектов в районе острова Сахалин, Кашаганское месторождение на Северном Каспии (Казахстан), Бохайский залив (Bohai Bay, Китай).

Характер воздействия льда на морское инженерное сооружение оказывает определяющее влияние на принимаемые при его проектировании инженерные решения. В этой ситуации вопрос о корректном назначении уровня ледовой нагрузки на проектируемое сооружение становится чрезвычайно важным. Заниженные проектные ледовые нагрузки могут привести к снижению уровня безопасности эксплуатации сооружения, в то время как завышение расчетной нагрузки чревато необоснованным удорожанием конструкции сооружения и падением рентабельности добычи.

В настоящее время существуют различные подходы к определению глобальной ледовой нагрузки [1]:

- нормативный;
- расчетный;
- экспериментальный (модельный и натурный эксперимент);
- вероятностное моделирование.

Все они имеют свои достоинства и недостатки и должны применяться на разных стадиях процесса проектирования морского ледостойкого инженерного сооружения. Ниже подробно рассмотрены экспериментальные методы, которые, по мнению авторов,

¹ e-mail: chernov@aari.ru.

позволяют в настоящее время получать наиболее достоверные результаты, причем главное внимание уделено экспериментальным технологиям, активно применяемым в российской практике.

Натурные испытания

Для изучения глобальной ледовой нагрузки на морские инженерные сооружения в принципе могут быть использованы как натурный, так и модельный эксперименты. С практической точки зрения наибольший интерес должен представлять натурный эксперимент, так как при его проведении потенциально можно получить информацию о реальных воздействиях льда на сооружение. К сожалению, эта потенциальная возможность практически никогда не реализуется. Для измерения глобального воздействия среды на натурный объект необходимо «закрепить на динамометре» и исключить посторонние влияния, например контакт с дном акватории. Поэтому для определения глобальной ледовой нагрузки на сооружения применяют различные косвенные методы. В [2] приводится перечень основных применяемых методик:

1. Применение тензометрических измерений деформаций конструкции сооружения. По полученной информации с помощью метода конечных элементов восстанавливают действующую на конструкцию ледовую нагрузку.
2. Измерение деформаций давления в грунте под сооружением. Анализ этих данных позволяет при определенных допущениях также восстановить глобальную нагрузку на сооружение.
3. Применение акселерометров. В этом случае платформа рассматривается как массивная механическая система, для которой известны демпфирование и жесткость. Теоретически в этом случае с помощью двойного интегрирования можно получить силовое воздействие на платформу.
4. Применение наклонометров, которые позволяют получить как глобальный наклон сооружения

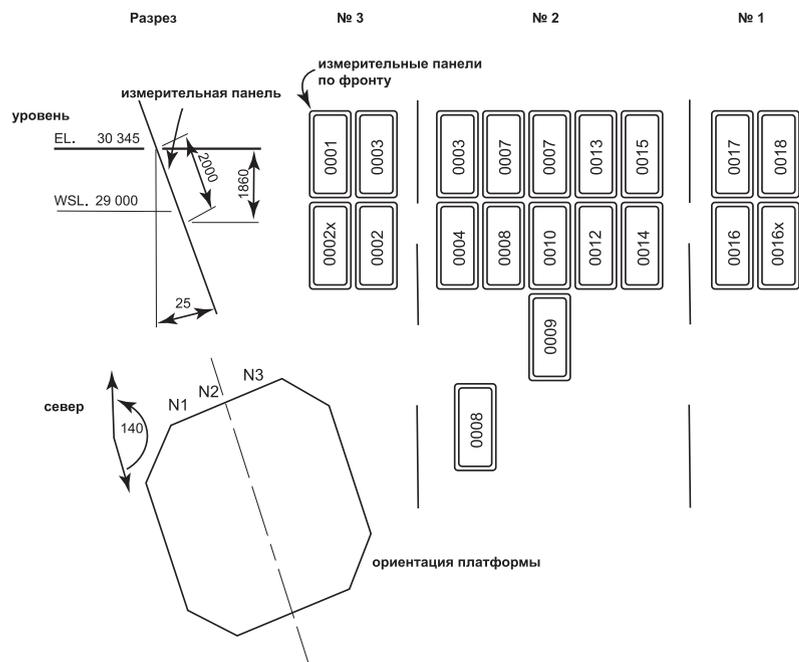


Рис. 1. Размещение измерительных панелей на платформе «Витязь» [3]

под действием нагрузки, так и угловые перемещения одной точки конструкции относительно другой. Эта информация также может быть использована для оценки глобальной нагрузки.

5. Применение специальных панелей, на которых измеряется действующее на них усилие. Это наиболее распространенный способ, который позволяет определить локальное давление льда на панель. Полученные данные о давлении с помощью разнообразных процедур распространяются на все сооружение, и таким образом можно получить данные о глобальной нагрузке. При определении глобальной ледовой нагрузки на основании измерений, выполненных на панелях, необходимо учитывать наличие масштабного эффекта, проявляющегося в увеличении ледового давления при уменьшении площади контактирующего со льдом измерительного датчика.

В российской практике такой метод измерения ледовой нагрузки успешно используется на платформе «Витязь», установленной на Пильтун-Астокском месторождении на шельфе острова Сахалин [3]. На рис. 1 приведена заимствованная из [3] схема размещения измерительных панелей, имеющих размер 1×2 м. Глобальная нагрузка на платформу определялась на основе анализа локальных давлений на измерительные панели, при этом учитывались смещения в пространстве и времени процессов разрушения льда перед широким сооружением. На рис. 2 представлена полученная по результатам измерений диаграмма действия глобальной ледовой нагрузки.

В [2] приведена сводная таблица всех выполненных различными косвенными способами натурных измерений глобальной ледовой нагрузки на морские и гидротехнические сооружения с 1963 по 2003 гг.

Непосредственное измерение глобальной ледовой нагрузки возможно только для ледостойкого плавучего сооружения, снабженного якорной системой удержания, при условии измерения натяжения в якорных линиях и углов подхода якорных линий к сооружению. Такие измерения выполнялись при эксплуатации платформы Кулук в море Бофорта [4].

Измерения, выполняемые на стационарных сооружениях, имеют ряд достоинств, делающих материалы таких наблюдений весьма ценными.



Рис. 2. Действие глобальных ледовых нагрузок в течение времени эксперимента [3]

Так, постоянное нахождение сооружения в определенной точке замерзающей акватории дает возможность получить статистически значимый с точки зрения продолжительности ряд измерений. Определенные в результате наблюдений значения ледовых нагрузок могут быть непосредственно использованы при проектировании сооружений аналогичных форм и размеров, что связано с отсутствием масштабного эффекта и тождественностью процессов разрушения ледяных образований.

К недостаткам измерений на стационарных объектах следует отнести невозможность проведения исследований с произвольными ледяными образованиями, а также невозможность прямого измерения глобальной ледовой нагрузки. Кроме того, конструктивные особенности сооружений зачастую не позволяют разместить измерительную систему на эксплуатирующемся объекте, т. е. возможность таких измерений должна быть заложена еще при проектировании и постройке сооружения.

Возможно также определение глобальной ледовой нагрузки (ледового сопротивления) на ледоколах и судах ледового плавания при регистрации упора движительного комплекса. Необходимо отметить, что ледовая нагрузка в этом случае определяется точностью задания коэффициентов взаимодействия движителей с корпусом судна.

К положительным сторонам измерений нагрузок с использованием в качестве измерительного инструмента судна следует отнести возможность проведения экспериментов в любом районе, а также возможность выбора ледяного образования для эксперимента. Из недостатков нужно отметить в первую очередь невозможность прямого применения результатов экспериментов при проектировании сооружения и, как следствие, необходимость разработки методики пересчета результатов эксперимента на произвольное инженерное сооружение.

Метод измерения глобальной ледовой нагрузки, использующий специально приспособленное судно, излагается ниже.

Использование судна для исследования глобальной ледовой нагрузки на сооружения

По мнению авторов, одним из наиболее перспективных типов натуральных экспериментов являются измерение глобальных нагрузок на судно и последующий пересчет полученных результатов на сооружение. Такой подход обладает рядом преимуществ по сравнению с изложенными выше. Во-первых, в качестве аналога сооружения выступает судно — объект, сравнимый с ним по размерам, что исключает проблемы, связанные с влиянием масштабного эффекта. Во-вторых, судно взаимодействует с натурным льдом, двигаясь при этом в различных ледовых условиях, что позволяет имитировать разные сценарии взаимодействия сооружения с ледяными образованиями.

Натурные экспериментальные исследования с использованием ледокола «Капитан Николаев» проводились в 2008 г. в экспедиции «Штокман-2008» [4; 5]. Ледокол «Капитан Николаев» (рис. 3а) был спроектирован и построен фирмой «Wärtsilä» (Финляндия, Хельсинки) в 1978 г. В 1990 г. по инициативе финских кораблестроителей ему была заменена носовая оконечность, которая после переоборудования получила форму, близкую к усеченному конусу. Чертеж ватерлиний в этом районе корпуса представлен на рис. 3б. При такой форме носовой оконечности механизм разрушения льда аналогичен процессам, происходящим при взаимодействии льда с конечным инженерным сооружением.

Базовой идеей экспериментального метода является возможность представить движение судна при соударении со льдом как движение твердого

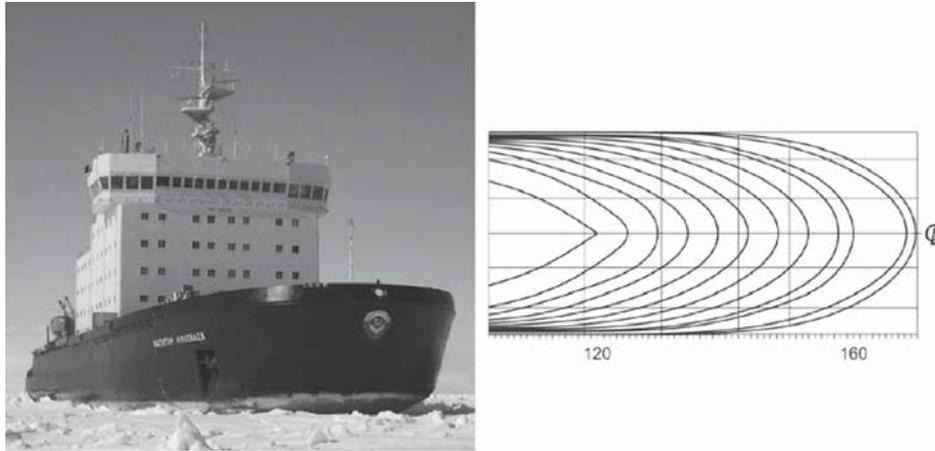


Рис. 3. Ледокол «Капитан Николаев»: общий вид (а) и ватерлинии в носовой оконечности (б)

тела с шестью степенями свободы. Соответственно кинематические параметры такого движения являются зависящим от времени вектором шести компонент (продольное, поперечное и вертикальное перемещение центра тяжести судна и три угловых перемещения: углы крена, дифферента и рыскания), а также первыми и вторыми производными этого вектора по времени (т. е. линейные и угловые скорости и ускорения). Движение судна может быть описано традиционно применяемой в теории корабля системой обыкновенных дифференциальных уравнений, которые связывают кинематические параметры с главным вектором сил и главным моментом [7]. В эти дифференциальные уравнения движения судна дополнительно включены выражения для сил, действующих на судно со стороны льда, и моментов этих сил. Подробно принятая система уравнений описана в [8].

Традиционно система дифференциальных уравнений движения используется для расчета параметров движения судна при известных силах и моментах, действующих на него. Однако в данном случае решается вторая задача механики — определение силового воздействия на тело по заданным параметрам его движения [9]. В рассматриваемой методике все параметры движения — линейные и угловые ускорения, скорости и перемещения — определяются путем измерений в ходе экспериментов, а расчетными являются компоненты главного вектора силы и момента.

Для решения задачи определения внешних сил было использовано специальное оборудование, позволяющее измерять линейные ускорения и угловые скорости в ходе эксперимента. Для получения результатов совместно использовались приборы ДКВ-21 и БИМ-003.12, изготовленные российскими предприятиями. Основу каждого прибора составляли три акселерометра и три гироскопа, размещенных ортогонально друг к другу. Акселерометры



Рис. 4. Общий вид торосистого образования

измеряли общее ускорение (включая компоненту силы тяжести), а гироскопы — три компоненты угловой скорости вращения судна. Остальные параметры движения (линейные и угловые перемещения, линейные скорости и угловые ускорения) являются расчетными величинами и могут быть получены в результате первичного анализа данных измерений. С помощью дополнительных устройств также измерялись параметры пропульсивного комплекса, необходимые для решения системы уравнений.

В качестве примера далее приведены результаты эксперимента по взаимодействию ледокола с торосистым образованием, показанным на рис. 4. Для преодоления этого торосистого образования ледокол совершил четыре набега. В работе рассмотрен только первый набег, в процессе которого судно взаимодействовало с неразрушенным торосом.

Перед экспериментом был выполнен комплекс ледоисследовательских работ, в результате которых было получено описание верхней и нижней поверхностей тороса, а также его внутреннее строение

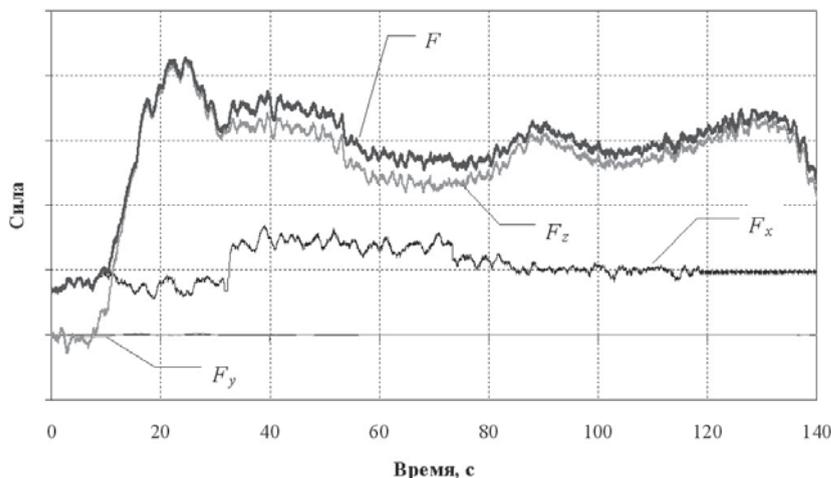


Рис. 5. Рассчитанные силы, действующие на судно при взаимодействии с торосистым образованием

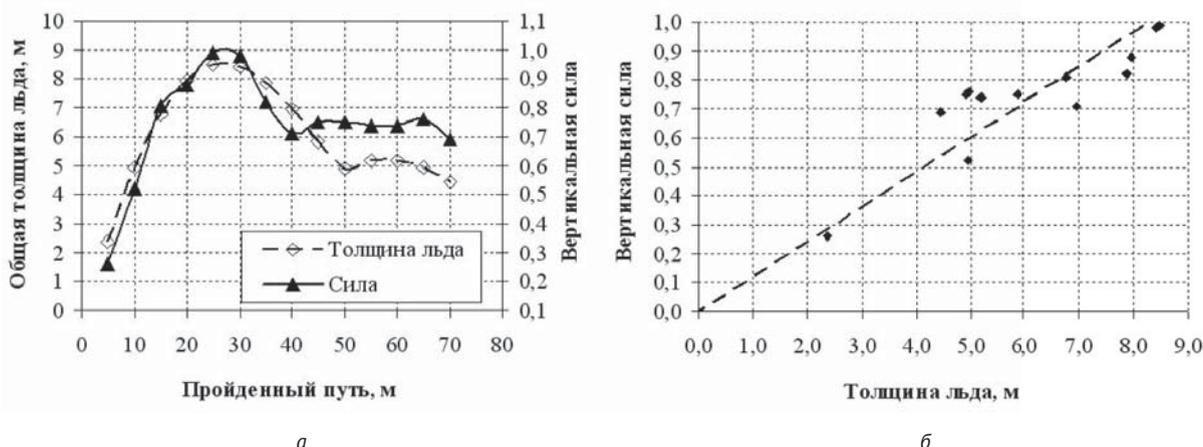


Рис. 6. Сопоставление значений общей толщины льда и полной силы

вдоль двух профилей. Профили были отмечены красной на льду, эти метки показаны на рис. 4.

На основании измеренных в эксперименте кинематических характеристик движения ледокола были рассчитаны значения компонентов главного вектора и момента внешних сил в зависимости от времени. Суммарная нагрузка со стороны льда для каждого момента времени определялась по соотношению

$$F = \sqrt{(F_x)^2 + (F_y)^2 + (F_z)^2}.$$

На рис. 5 приведены результаты расчета сил, нормированные по максимальному значению.

В начале эксперимента на протяжении 10 с ледокол двигался в ровном льду. На этом участке определяющей составляющей полной силы являлась ее продольная компонента. Затем произошел контакт с торосистым образованием, в результате которого ледокол начал «наползать» на торос, и появилась дополнительная вертикальная сила, действующая

на форштевень судна. Именно вертикальная компонента силы давала наибольший вклад в значение общей силы, в то время как продольная компонента составляла от 30% до 50% вертикальной компоненты. Поперечная же компонента силы была несоизмеримо мала по сравнению с двумя другими. Это связано с тем, что при взаимодействии с торосом ледокол двигался практически прямолинейно, и вектор суммарной силы фактически лежал в диаметральной плоскости судна.

Для более детального анализа процесса взаимодействия были сопоставлены значения полной силы и общей толщины льда в торосистом образовании и построены зависимости полной силы и общей толщины льда от пройденного ледоколом расстояния, отсчитываемого от начала взаимодействия форштевня ледокола со льдом. Соответствующие графики представлены на рис. 6; как можно видеть, характер изменения как общей толщины льда, так и возникающей при взаимодействии с этим льдом полной силы практически одинаков, что подтверждается

выборочным коэффициентом корреляции, который равен 0,94.

Приведенные данные убедительно свидетельствуют, что указанная методика позволяет получать важные для практики результаты. Данные эксперимента позволяют провести верификацию используемых ныне и вновь разрабатываемых расчетных методов определения глобальной ледовой нагрузки на коническую конструкцию при взаимодействии с торосом. Наиболее точные данные могут быть получены в эксперименте, когда внедрение ледокола в торосистое образование происходит по инерции. В этом случае нет необходимости учитывать тяговые характеристики ледокола.

Модельные исследования

В настоящее время проведение модельных испытаний в ледовом бассейне — единственный метод получения информации о глобальной ледовой нагрузке на любые морские инженерные сооружения, так как только в этом случае модель может быть закреплена на динамометре, позволяющем измерить глобальную нагрузку. В настоящее время в России модельные испытания проводятся в Крыловском государственном научном центре (КГНЦ) [10] и Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте (АНИИ) [11].

Модельные эксперименты по определению глобальной нагрузки на сооружения отличаются большим разнообразием. Принципиально в ледовых бассейнах могут быть реализованы две схемы испытаний: при прямом и обратном движении.

В первом случае на неподвижно закрепленную модель с помощью буксировочной тележки надвигается моделированное ледяное поле (рис. 7). Эта схема испытаний в большей степени соответствует натурным условиям, но проведение эксперимента становится более трудоемким. Во втором случае модель буксировочной тележкой протаскивается



Рис. 7. Модельные испытания инженерного сооружения по схеме прямого движения в ледовом бассейне АНИИ

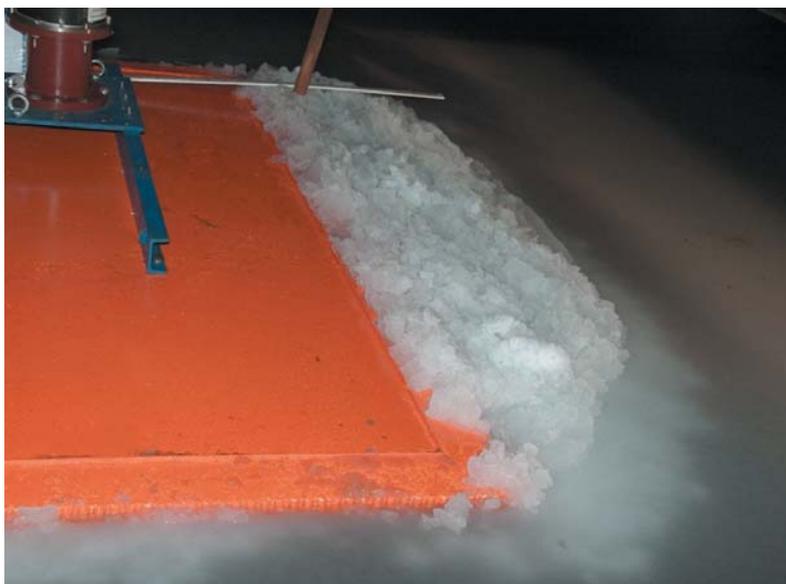


Рис. 8. Модельные испытания инженерного сооружения по схеме обратного движения в ледовом бассейне КГНЦ

через неподвижный ледяной покров (рис. 8). Различие между двумя схемами заключается в гидромеханическом воздействии на модель, однако, как правило, скорости буксировки модели невелики и различие в гидродинамической нагрузке лежит в пределах точности эксперимента, что было подтверждено опытным путем [12]. Наиболее часто в практике работы ледовых бассейнов используется схема обратного движения.

Для воспроизведения в модельном эксперименте адекватной картины разрушения ледяного покрова в соответствии с теорией моделирования его прочность и толщина уменьшаются в λ раз, где λ — масштаб модели инженерного сооружения. Помимо оценки параметров силового воздействия на модель в ходе модельного эксперимента могут быть определены геометрические характеристики ледяных нагромождений (надводных и подводных), которые часто формируются

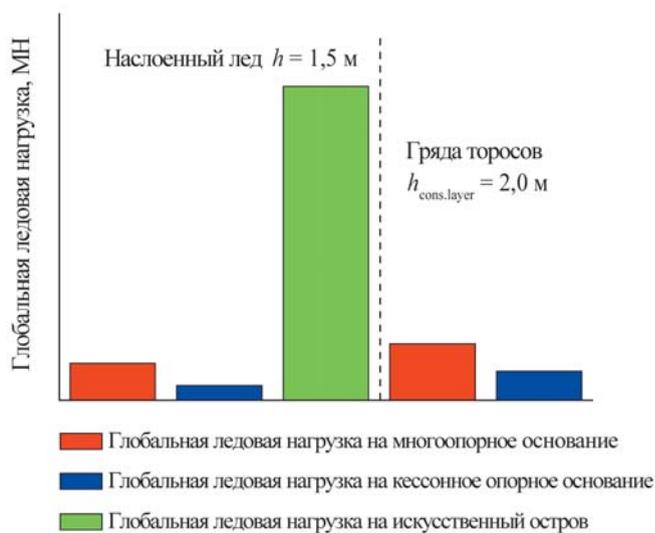


Рис. 9. Сравнение максимальных среднепиковых значений глобальной ледовой нагрузки на различные типы сооружений при проведении модельных исследований в ровном льду и грядах торосов (h – толщина льда, $h_{\text{cons.layer}}$ – толщина консолидированного слоя тороса)

у борта модели и во многом определяют величину глобальной ледовой нагрузки.

При моделировании заякоренных инженерных сооружений глобальная ледовая нагрузка определяется путем измерения натяжения связей, как и в натурном эксперименте [13].

Модельный эксперимент является эффективным средством проведения сравнительного анализа конкурирующих концепций обустройства того или иного месторождения. Он особенно эффективен, когда необходимо сделать выбор между принципиально различными техническими решениями. На рис. 9, заимствованном из [14], приведены результаты сравнительных испытаний трех типов ледостойких платформ, предназначенных для эксплуатации в условиях мелководья.

Модельный эксперимент — незаменимое звено в разработке математических моделей изучаемых явлений. В модельном эксперименте можно изучить физику исследуемых явлений, что позволяет исключить произвол в выборе физической модели явления, который, к сожалению, нередко имеет место при разработке математических моделей, особенно специалистами, не имеющими большого опыта натурных или модельных ледовых испытаний.

Метод модельного эксперимента имеет ряд недостатков. Так, очевидно, что воздействие ледяного покрова на сооружение является случайной функцией времени. В ходе эксперимента обычно получают только одну реализацию этой функции, стационарность и эргодичность которой предполагаются. В ходе экспериментов по единственной реализации определяется величина ледовой нагрузки. К подобной процедуре не применимы традиционные статистические методы обработки экспериментальных данных. Из этого следует, что результат, полученный в ледовом бассейне, нельзя рассматривать как некоторую абсолютную истину, нельзя требовать, чтобы этот результат в точности повторился в следующих аналогичных испытаниях в данном или другом ледовом бассейне. Совпадение результатов может быть только приближительным.

Вследствие высокой стоимости испытаний в ледовом бассейне практически невозможно выполнить исследования особенностей работы инженерного сооружения во льдах во всем диапазоне возможных эксплуатационных условий. Обычно для модельных испытаний заказчик выбирает наиболее тяжелые ледовые условия, чтобы получить оценку максимальных величин глобальной ледовой нагрузки. При таком подходе часто исследуются условия, которые с очень малой вероятностью могут реализовываться в природе. Например, при оценке максимальных усилий от воздействия на ледостойкую платформу торосистого образования для моделирования в ледовом бассейне выбирают торос с килем, парусом и консолидированным слоем, соответствующими 100-летнему периоду повторяемости каждой из характеристик по отдельности, хотя подобные сочетания в натуральных условиях не случаются. Можно с полной уверенностью сказать, что такие испытания приводят к завышению уровня глобальной ледовой нагрузки, который регистрируется в ходе проведения эксперимента.

В то же время стоимость натурального эксперимента по сравнению с модельным еще более высока. С этим фактором связано весьма ограниченное количество натуральных данных о глобальной ледовой нагрузке. В такой ситуации оптимальным представляется сочетание двух видов экспериментов, т. е. использование относительно небольшого количества натуральных данных для верификации результатов модельного эксперимента. В частности, технология моделирования торосистых ледяных образований может быть модифицирована следующим образом. На первом этапе модельного эксперимента подбирается продолжительность сморазивания ледяного образования. При достижении подобия глобальной ледовой нагрузки при эксперименте с эталонной моделью

судна моделированный торос считается подобным натурному. На втором этапе сморачивание тороса выполняется с определенной ранее продолжительностью, а эксперимент проводится с испытываемой моделью. Предложенная схема, по мнению авторов, позволит повысить достоверность результатов модельного эксперимента.

Литература

1. Добродеев А. А., Сазонов К. Е., Тимофеев О. Я. Глобальная нагрузка на морские инженерные сооружения: Методы определения // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2015. — № 38/39. — С. 61—65.
2. Palmer A., Croasdale K. Arctic Offshore Engineering. — Singapore: World Scientific, 2013. — 357 p. (<http://www.worldcat.org/title/arctic-offshore-engineering/oclc/817542239>).
3. Вершинин С. А., Трусков П. А., Кузмичев К. В. Воздействие льда на сооружения Сахалинского шельфа / Ин-т Гипростроймост. — М., 2005. — 208 с.
4. Wright B. Ice loads on the Kulluk in managed ice conditions // Proc. Sixteenth Intern. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. — Vol. 2. — Ottawa, 2001. — P. 553—566.
5. Krupina N. A., Likhomanov V. A., Chernov A. V., Gudoshnikov Y. P. Full-scale ice impact study of icebreaker Kapitan Nikolaev: general description // Proc. of 19th Intern. Offshore (Ocean) and Polar Engineering Conference, ISOPE-2009, Osaka, Japan, 21—26 June, 2009: Paper TPC-463.
6. Likhomanov V. A., Krupina N. A., Chernov A. V., Gudoshnikov Y. P. Results of Definition of the Global Ice Load During in situ Research on Impact of the Icebreaker Kapitan Nikolaev on Various Ice Formations // Proceedings of 19th International Offshore (Ocean) and Polar Engineering Conference, ISOPE-2009, Osaka, Japan, 21—26 June, 2009. Paper TPC-465.
7. Справочник по теории корабля / Под ред. Я. И. Войткунского. — Л.: Судостроение, 1985. — Т. 1: Гидромеханика. Сопротивление движению судов. — 768 с.; Т. 2: Статика судов. Качка судов. — 440 с.; Т. 3: Управляемость водоизмещающих судов. Гидродинамика судов с динамическими принципами поддержания. — 544 с.
8. Крупина Н. А., Чернов А. В. Применение инерциальной измерительной системы для определения глобальной ледовой нагрузки на судно // Тр. ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. — 2010. — Вып. 51 (335). — С. 55—68.
9. Пановко Я. Г. Механика деформируемого твердого тела: Современные концепции, ошибки и парадоксы. — М.: Наука, 1985. — 288 с.
10. Денисов В. И., Сазонов К. Е., Тимофеев О. Я. Новые экспериментальные возможности Крыловского государственного научного центра по изучению ледовых воздействий на объекты морской техники // Арктика: экология и экономика. — 2015. — № 3 (19). — С. 76—81.
11. Крупина Н. А., Лихоманов В. А., Максимова П. В. и др. Итоги работы большого ледового бассейна ААНИИ // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2015. — № 1 (103). — С. 101—110.
12. Карулин Е. Б., Карулина М. М., Благовидов Л. Б. Модельные исследования взаимодействия со льдом платформы кессонного типа на мелководье // Тр. ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. — 2007. — Вып. 34 (318). — С. 5—21.
13. Карулин Е. Б., Карулина М. М., Клементьева Н. Ю. и др. Модельные исследования взаимодействия со льдом платформ, предназначенных для Штокмановского ГКМ // Газовая промышленность. — 2007. — № 10. — С. 70—73.
14. Добродеев А. А., Сазонов К. Е., Бойцун И. И. Сравнительный анализ различных типов опорных оснований объектов обустройства месторождений в Каспийском море // Тр. Крылов. гос. науч. центра. — 2015. — Вып. 88 (372). — С. 203—210.