

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛОБАЛЬНОЙ ЛЕДОВОЙ НАГРУЗКИ ОТ ЛЕДОВЫХ СЖАТИЙ НА СУДА И ПЛАВУЧИЕ ПЛАТФОРМЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В КАЧЕСТВЕ ПОЛЯРНЫХ ДРЕЙФУЮЩИХ ОБСЕРВАТОРИЙ

И. А. Свистунов

Арктический и антарктический научно-исследовательский институт
(Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 3 июля 2022 г.

Задача прогнозирования ледовых нагрузок в работе решается путем комбинирования математических методов и физического моделирования в ледовом опытовом бассейне. В результате получена экспериментально-аналитическая методика моделирования ледовых сжатий в ледовом бассейне. Базовой частью методики является новая математическая модель, описывающая физические процессы, сопровождающие квазистатическое взаимодействие плавучего объекта, имеющего наклонные борта в средней части корпуса, с толстым однолетним или многолетним ледяным полем. Экспериментальная часть методики основывается на специальной технологии проведения серийных модельных испытаний в ледовом бассейне, которая позволяет использовать разработанную математическую модель для оценки ледовых нагрузок при ледовых сжатиях.

Ключевые слова: дрейфующие полярные станции, модельный эксперимент, ледовые сжатия, ледовые нагрузки, ледовый опытовый бассейн.

Введение

Актуальность рассматриваемого вопроса продиктована принятым в нашей стране курсом на обновление комплексных научных исследований в арктическом бассейне. Дрейфующие полярные станции, организуемые на базе плавучих инженерных сооружений, являются наиболее эффективным и надежным инструментом при достижении поставленной цели.

Для осуществления планового дрейфа судно, ледакол или специализированное плавучее сооружение «закалывается» в ледяное поле, пригодное для разбивки ледового лагеря. Как правило, подбирается поле толстого однолетнего или многолетнего льда протяженностью в несколько километров с минимальным содержанием трещин, разводьев, торосистых нагромождений.

В период дрейфа система «судно — лед» неизбежно подвергается влиянию ледовых сжатий.

Обеспечение общей безопасности эксплуатации морских объектов в таком режиме связано с решением двух основных задач: исследования поведения дрейфующего объекта как плавучего твердого тела, находящегося внутри ледяного поля, при интенсивных ледовых сжатиях; и прогнозирования локальных ледовых нагрузок от ледовых сжатий на бортовые корпусные конструкции дрейфующих сооружений.

В рамках первой задачи исследуется общая картина физического взаимодействия элементов системы; производится оценка остойчивости плавучих объектов во льдах и величины опрокидывающего момента, возникающего при ледовых сжатиях; исследуется влияние ледяной «подушки», формирующейся в подводной части корпуса во время ледового дрейфа. Обозначенные проблемы рассматривались ранее в [1], где в первом приближении предлагалась экспериментально-аналитическая методика количественной оценки кренящего момента и остойчивости дрейфующих во льдах объектов для ледового

опытового бассейна на примере ледостойкой самоходной платформы (ЛСП) «Северный полюс». Такая задача ставилась впервые, и для ее решения использовался существующий опыт экспериментального моделирования в ледовом бассейне, накопленный различными отечественными и зарубежными исследователями [2—4].

На основании решения второй задачи выполняется проектирование набора ледового пояса или осуществляется его модернизация в случае адаптации судов ледового плавания для длительного дрейфа во льдах. Как правило, оценка расчетных ледовых нагрузок, возникающих при ледовых сжатиях, производится аналитическими методами [5]. Вывод подобных расчетных зависимостей также может быть реализован на базе результатов физического моделирования в ледовом бассейне. При этом следует понимать, что воспроизведение процесса локального смятия кромок ледяного поля, наблюдаемого в реальных условиях, в модельном эксперименте представляется неосуществимым из-за несовершенства используемых в настоящее время моделей ледяного покрова. Однако сохраняется путь перехода к локальным ледовым нагрузкам после установления их связи с глобальной ледовой нагрузкой, т. е. силой, воспринимаемой инженерным объектом в целом. Последняя уже может быть исследована в ледовом бассейне при соблюдении законов, установленных теорией моделирования.

В настоящей статье предлагается экспериментально-аналитическая методика определения глобальной ледовой нагрузки от ледовых сжатий на суда и плавучие сооружения с наклонными бортами в средней части корпуса. Объекты, имеющие развал борта, наиболее предпочтительны для длительного планового дрейфа, поскольку в этом случае реализуется менее энергозатратный механизм изгибного разрушения ледяной пластины. Максимальными при этом будут усилия, направленные перпендикулярно к борту при всестороннем обжатии корпуса. Для их определения выведены расчетные аналитические зависимости и разработана технология проведения эксперимента. В сущности новая методика представляет собой доработку и развитие идей, сформулированных автором в [1].

Предпосылки к созданию методики

Анализ теоретических основ метода физического моделирования в ледовом бассейне [2—4], а также опыт проведения предварительных экспериментов по ледовым сжатиям [1; 6] позволили установить, что для воспроизведения физических процессов, сопровождающих дрейф плавучих сооружений с наклонными бортами при ледовом сжатии, справедливы основные требования теории подобия, предъявляемые при моделировании движения судов в сплошных льдах.

Математически требования к модели плавучего объекта и модели ледяного покрова формулируются следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{L_n}{L_m} &= \frac{(x_g)_n}{(x_g)_m} = \frac{(z_g)_n}{(z_g)_m} = \lambda, \quad \frac{v_n}{v_m} = \frac{t_n}{t_m} = \sqrt{\lambda}, \quad \frac{P_n}{P_m} = \frac{D_n}{D_m} = \lambda^3; \\ \frac{M_n}{M_m} &= \lambda^4, \quad \frac{(I_x)_n}{(I_x)_m} = \frac{(I_y)_n}{(I_y)_m} = \lambda^5, \quad (f_T)_n = (f_T)_m; \\ \frac{h_n}{h_m} &= \frac{E_n}{E_m} = \frac{(\sigma_p)_n}{(\sigma_p)_m} = \lambda, \quad (\rho_i)_n = (\rho_i)_m, \quad \mu_n = \mu_m \end{aligned} \quad (1)$$

где индекс «*n*» относится к натурным характеристикам, индекс «*m*» — к модельным; λ — модуль подобия; L , x_g , z_g — характерный линейный размер (главные измерения испытываемого объекта) и пространственные координаты центра тяжести плавучего объекта; v — скорость взаимодействия; t — время; P — массовые силы; D — водоизмещение плавучего объекта; M — момент силы; I_x , I_y — моменты инерции массы плавучего объекта; f_T — коэффициент трения льда о поверхность корпуса плавучего объекта; h — толщина льда; E — модуль деформации льда при изгибе; σ_p — предел прочности льда на изгиб; ρ_i — плотность льда; μ — коэффициент Пуассона.

На основании серии предварительных испытаний в ледовом бассейне была разработана схема проведения эксперимента, позволяющая моделировать главные процессы, возникающие при ледовом сжатии дрейфующих сооружений. Согласно схеме на рис. 1 модель плавучего сооружения 1 помещается поперек чаши ледового бассейна между свободноплавающим полем моделированного льда 2 и его утолщенной частью 3, примороженной к стенкам бассейна. К модели подводится технологический мост 4, на котором располагается регистрирующая аппаратура 5. С помощью буксировочной тележки 6 ледяное поле 2 с заданной скоростью надвигается на модель, имитируя таким образом ледовое сжатие.

В такой постановке эксперимента разрушение льда происходит заведомо со стороны надвигающегося поля, а модель остается в заданной точке по длине чаши бассейна. Установление приоритета ломки льда со стороны одного из бортов при продолжительном интенсивном сжатии судна ледяными полями подтверждается натурными наблюдениями [7]. В процессе эксперимента измерительный комплекс регистрирует изменение посадки модели (осадки, углов крена и дифферента) от внешних ледовых сил.

В результате испытаний было установлено, что сложное явление длительного взаимодействия дрейфующего сооружения с ледяным полем образовано двумя более простыми процессами.

Первый процесс — периодическое выжимание корпуса модели за счет действия вертикальных составляющих сил ледового сжатия на наклонные участки бортов в районе действующей ватерлинии. Разрушение ледяной пластины наступает в результате изгиба в момент превышения вертикальной нагрузки не-

сущей способности ледяного покрова (рис. 2, слева). Как правило, ледяные сектора выламываются поочередно вдоль линии контакта с корпусом модели. После образования сектора под действием гравитационных сил модель стремится к исходному равновесному положению, продолжая испытывать воздействие со стороны льдины, что в результате приводит к наклоненному положению модели. Таким образом, данный процесс содержит два этапа, в которых модель находится в поджатом и подвсплывшем состояниях — до момента разрушения кромки ледяного поля (этап I) и после выламывания ледяного сектора (этап II). Важно отметить, что такой сценарий реализуется во льдах относительно большой толщины. В тонких ледяных полях вытеснение корпуса при ледовом сжатии не наблюдается.

Второй процесс обусловлен подвсплыванием модели из-за постепенного «обрастания» корпуса обломками льдин ниже ватерлинии (рис. 2, справа). В данном случае процесс вызван влиянием сил плавучести притопленного льда, образующего ледяную «чашу».

Эффект вытеснения корпуса, наблюдаемый в обоих процессах, позволяет рассматривать саму модель в качестве измерительного инструмента для определения ледовых нагрузок. Тогда требуется построить математическую модель, позволяющую определять внешние действующие ледовые усилия в зависимости от параметров, характеризующих посадку модели.

Несмотря на перемещение зоны разрушения ледяного поля вдоль линии борта при сжатии, выжимание модели происходит практически без дифферента. Формирование ледяной чаши также не приводит к появлению значительных углов дифферента. Таким образом, при аналитическом описании справедливо рассматривать плоское перемещение корпуса с двумя степенями свободы: линейное вертикальное движение (всплытие) и вращательное колебание относительно продольной оси (крен).

Для вывода расчетных выражений применим принцип замены вертикальных проекций внешних сил условными процедурами снятия виртуальных грузов, центры тяжести которых располагаются в точках приложения результирующих ледовых сил [1]. При этом квазистатическое взаимодействие модели плавучего объекта с ледяным полем рассматривается как последовательная серия статических равновесных положений плавучего объекта, для которых расчет изменения остойчивости и плавучести (от фиктивных

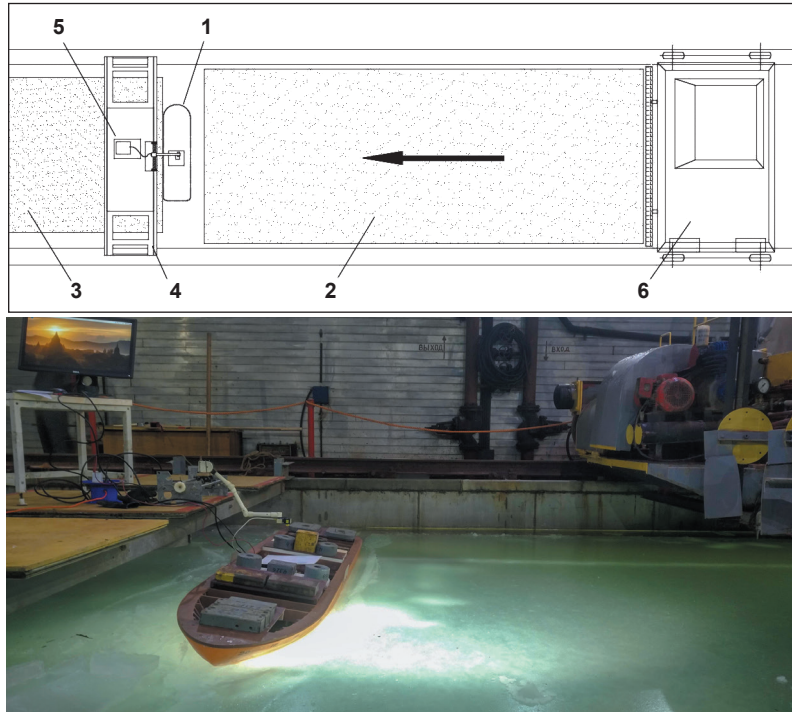


Рис. 1. Схема модельного эксперимента по ледовым сжатиям в ледовом опытовом бассейне (фото автора, 2021 г.)

Fig. 1. Scheme of the model experiment on ice compression in the ice towing tank (photo by author, 2021)

грузов) может быть выполнен традиционными методами статики корабля.

Аналитическая часть методики

Аналитическое описание процессов требует внесения ряда упрощений и допущений.

Колебательный процесс, вызванный периодическим разрушением ледяного поля, будет рассматриваться как череда обозначенных этапов, непрерывно сменяющих друг друга. Таким образом, достаточно рассмотреть два типичных случая равновесного состояния системы «судно — вода — лед» и определить условие перехода между этапами. При этом полагаем, что силы трения F_T для обоих этапов будут ориентированы вниз, поскольку ледяные поля стремятся к вытеснению корпуса наверх. В рамках математического моделирования процесса принимается, что обозначенное направление сил трения будет сохраняться и во время переходов между этапами ледового сжатия.

Для аналитического описания процесса предварительно определяется связь искомой результирующей нормальной силы F_N с вертикальной F_ζ и горизонтальной F_η проекциями суммарной ледовой нагрузки F , действующей со стороны прижимаемого ледяного поля на наклонный борт судна, находящегося в прямом положении (рис. 3):

$$\begin{aligned} F_\zeta &= F_N (\sin \beta_\infty - f_T \cos \beta_\infty); \\ F_\eta &= F_N (\cos \beta_\infty + f_T \sin \beta_\infty). \end{aligned} \quad (2)$$



Рис. 2. Основные процессы, сопровождающие интенсивное ледовое сжатие дрейфующих объектов: слева – изгибное выламывание ледяных секторов, справа – формирование ледяной чаши (фото автора, 2021 г.)

Fig. 2. The main processes accompanying the intense ice compression of drifting objects: on the left – bending breaking out of ice sectors, on the right – the formation of an ice cushion (photo by author, 2021)

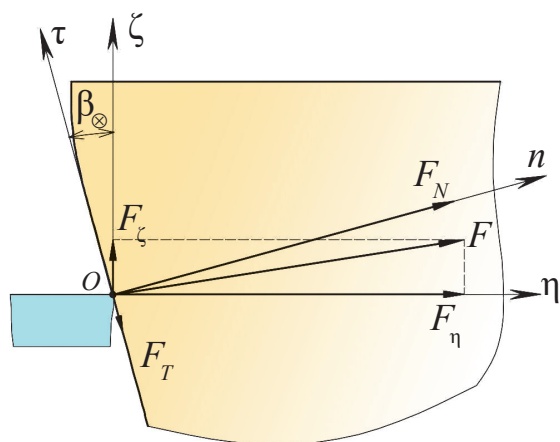


Рис. 3. Связь между проекциями ледовой нагрузки в различных системах координат: $nO\tau$ – система координат, связанная с корпусом судна; n – нормальная к борту ось; τ – тангенциальная ось, лежащая в плоскости борта; $\eta O\zeta$ – система координат, связанная с плоскостью ледяного покрова; η – ось, проходящая в плоскости действующей ватерлинии (ледяного покрова); ζ – ось, перпендикулярная плоскости действующей ватерлинии

Fig. 3. Relationship between projections of ice load in different coordinate systems: $nO\tau$ – coordinate system, associated with the ship's hull; n – axis normal to side; τ – tangential axis in the plane of side; $\eta O\zeta$ – coordinate system associated with the ice sheet plane; η – axis in the plane of the current waterline (plane of the ice cover); ζ – axis perpendicular to the plane of the current waterline

Основой для вывода аналитической модели выступают уравнения равновесия системы «судно — вода — лед», рассматриваемые на двух этапах ледового сжатия. На рис. 4 показаны схемы действующих сил и моментов для этапов I и II, а также соответствующие им уравнения. На схеме $\rho_w g V^* = \rho_w g (V_0 - \delta V)$, где ρ_w — плотность воды; g — ускорение свободного падения; V_0 — объемное водоизмещение по исходную ватерлинию; δV — объем корпуса, вышедшего из воды при всплытии.

Согласно схеме на этапе I на корпус плавучего сооружения действует кренящий момент M_θ , обусловленный воздействием усилий при ледовых сжатиях, который при моделировании будет рассматриваться как момент от снятого груза, сила тяжести которого пропорциональна силе F_ζ , а центр тяжести располагается в плоскости действующей ватерлинии на некотором расстоянии η от следа диаметральной плоскости. Кренящий момент уравновешивается восстанавливающим моментом M_θ , определяемым в соответствии с метacentрической формулой поперечной остойчивости с учетом поправок для начальной метacentрической высоты h_m и исходного водоизмещения D_0 . Сила F_ζ определяется объемом корпуса, вышедшим из воды, характеризуемым, в свою очередь, уменьшением

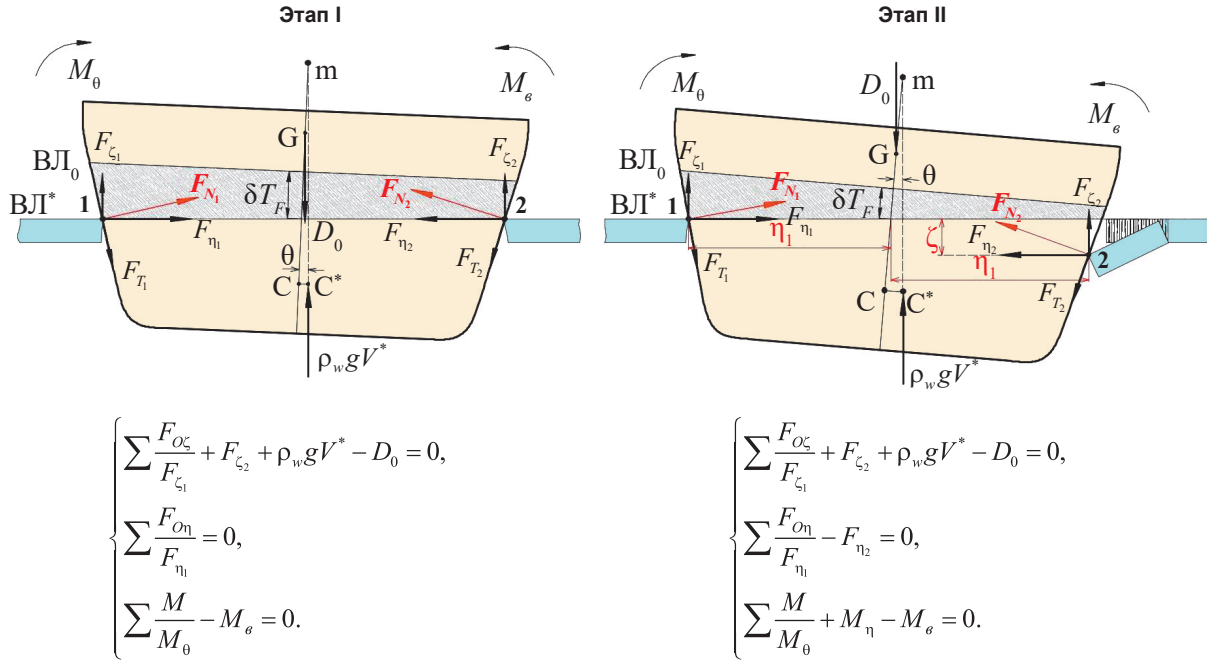


Рис. 4. Схема действующих на корпус сил и моментов при ледовом сжатии: ВЛ₀ – положение исходной ватерлинии; ВЛ* – положение фактической ватерлинии; m – поперечный метацентр; G – центр тяжести судна; C (и C*) – центр величины погруженного объема корпуса в различных положениях; D₀ – весовое водоизмещение (исходное); θ – угол крена; δT_F – изменение средней осадки в результате вытеснения корпуса ледовым сжатием

Fig. 4. Scheme of forces and moments acting on the hull during ice compression: ВЛ₀ – initial waterline; ВЛ* – actual waterline; m – transverse metacenter; G – ship's center of gravity; C (and C*) – center of the immersed body volume in different positions; D₀ – weight displacement (initial); θ – roll angle; δT_F – change in average draft as a result of displacement of the hull by ice compression

средней осадки δT_F. На этапе II возникает действие дополнительного момента M_η, создаваемого горизонтальными проекциями ледовых сил F_η, действующими навстречу друг другу в разных плоскостях на расстоянии плеча ζ.

Процесс накопления льда под корпусом представляет интерес на стадии, когда влияние сил плавучести от сформировавшегося ледяного образования становится достаточным для привсплытия модели. Эксперименты показали, что ледяная чаша к этому моменту уже полностью закрывает подводную часть корпуса, а форма ее обводов в поперечном сечении может быть описана в первом приближении параболической кривой. Тогда результирующая сил плавучести, приложенная в районе плоского днища, будет проходить вблизи основной линии корпуса. В дальнейшем принимается, что точка приложения силы всегда лежит на этой линии.

Из анализа физической картины протекания процесса следует, что основной вклад в результирующую сил плавучести подводного нагромождения вносит скопление льда под плоским днищем (рис. 5). Влияние подсовов в районе бортов в большей мере проявляется при формировании ледяной чаши и заключается в удерживании от расползания ледяной подушки под днищем. Вклад сил плавучести от ледяных скоплений в носовом и кормовом подзорах незначителен из-за специфики формы обводов оконечностей, способствующих соскальзыванию ледяных секторов и перемещению основной части

ледяного массива на периферию ледяной чаши, где ее влияние на корпус отсутствует.

Таким образом, реальный процесс подвсплытия модели от увеличивающейся ледяной чаши заменяется условной схемой, согласно которой корпус непрерывно вытесняется в прямом положении и на ровный киль под действием нарастающей сосредоточенной силы Q, являющейся результирующей сил плавучести ледяной подушки, распределенной по площади плоского днища (условные границы обозначены пунктиром на рис. 5). При этом упрощенный процесс рассматривается как процедура снятия фиктивных грузов, центры тяжести которых лежат в плоскости днища на линии пересечения с диаметральной плоскостью; суммарная масса грузов равна Q/g. Потери водоизмещения здесь определяются изменением осадки на величину δT_Q, т. е. сила Q = ρ_wgδT_QS_Q, где S_Q – среднее значение площадей ватерлиний, между которыми заключен вытесненный объем от влияния ледяной подушки.

При совместном моделировании двух процессов в расчетные выражения вносятся поправки, учитывающие взаимное влияние различных по природе сил, среди которых поправки к метацентрической высоте δh_F и δh_Q. Зависимости для плеч η₁, η₂, и ζ определяются из геометрических соображений при последовательном рассмотрении положений поджатого льдом корпуса на двух этапах в соответствии со схемой, приведенной на рис. 6 [6].

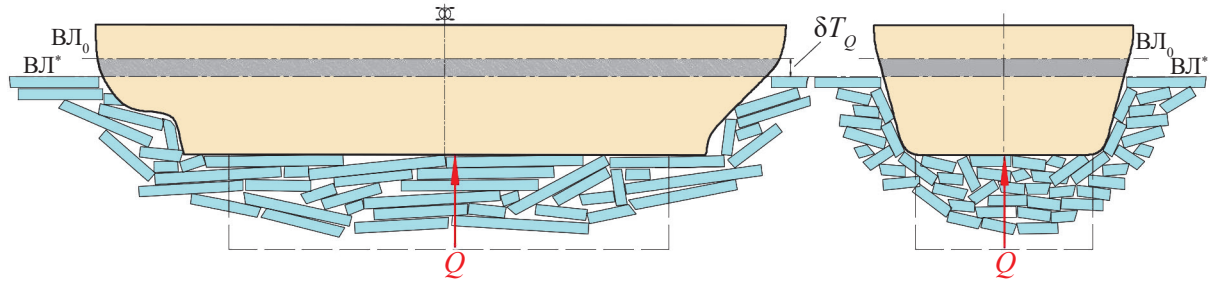


Рис. 5. Схема распространения ледяных секторов под корпусом модели
Fig. 5. Scheme of distribution of ice sectors under the hull of a model

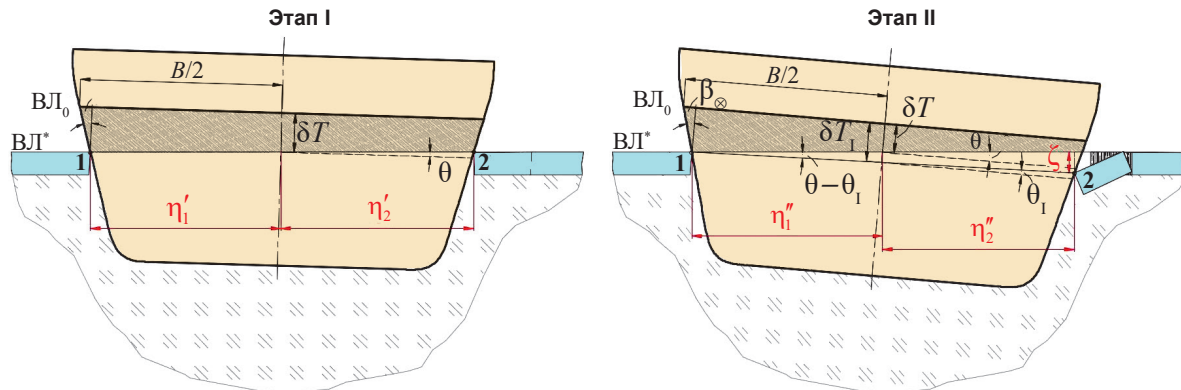


Рис. 6. К определению плеч η_1 , η_2 и ζ , изменяющихся в процессе ледового сжатия
Fig. 6. To the definition of parameters η_1 , η_2 and ζ that changing during ice compression

Конечные расчетные выражения для определения нормальных усилий F_N , полученные из уравнений, приведенных на рис. 4, с учетом формул (2), учитывающих наличие угла крена θ , имеют вид:

- для этапа I:

$$\left. \begin{aligned} F'_{N_1} &= \frac{\eta'_2 \rho_w g \delta T \bar{S} + (D_0 - \rho_w g \delta T_F \bar{S} - \rho_w g \delta T_Q \bar{S}_Q)(h_m - \delta h'_F - \delta h_Q) \sin \theta}{(\eta'_1 + \eta'_2) [\sin(\beta - \theta) - f_T \cos(\beta - \theta)]}, \\ F'_{N_2} &= \frac{\eta'_1 \rho_w g \delta T \bar{S} - (D_0 - \rho_w g \delta T_F \bar{S} - \rho_w g \delta T_Q \bar{S}_Q)(h_m - \delta h'_F - \delta h_Q) \sin \theta}{(\eta'_1 + \eta'_2) [\sin(\beta + \theta) - f_T \cos(\beta + \theta)]}; \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

- для этапа II:

$$\left. \begin{aligned} F''_{N_1} &= \frac{\eta''_2 \rho_w g \delta T \bar{S} + (D_0 - \rho_w g \delta T_F \bar{S} - \rho_w g \delta T_Q \bar{S}_Q)(h_m - \delta h''_F - \delta h_Q) \sin \theta - \rho_w g \delta T \bar{S} \zeta \varepsilon_f}{(\eta''_1 + \eta''_2 - \zeta \varepsilon_f) [\sin(\beta - \theta) - f_T \cos(\beta - \theta)]}, \\ F''_{N_2} &= \frac{\eta''_1 \rho_w g \delta T \bar{S} - (D_0 - \rho_w g \delta T_F \bar{S} - \rho_w g \delta T_Q \bar{S}_Q)(h_m - \delta h''_F - \delta h_Q) \sin \theta}{(\eta''_1 + \eta''_2 - \zeta \varepsilon_f) [\sin(\beta + \theta) - f_T \cos(\beta + \theta)]}; \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \eta'_1 = \eta''_1 &= \frac{B/2 - \delta T \operatorname{tg} \beta}{\cos \theta + \sin \theta \operatorname{tg} \beta}; \quad \eta'_2 = \frac{B/2 - \delta T \operatorname{tg} \beta}{\cos \theta - \sin \theta \operatorname{tg} \beta}; \quad \eta''_2 = \frac{B/2 - \delta T \operatorname{tg} \beta}{\cos \theta - \sin \theta \operatorname{tg} \beta} - \zeta \operatorname{tg}(\theta + \beta); \\ \zeta &= \frac{B/2 - \delta T \operatorname{tg} \beta}{\cos \theta - \sin \theta \operatorname{tg} \beta} \sin(\theta - \theta_1) + (\delta T_1 - \delta T) \cos \theta; \quad \varepsilon_f = \frac{1 + f_T \operatorname{tg}(\beta + \theta)}{\operatorname{tg}(\beta + \theta) - f_T}; \\ \delta h'_F \approx \delta h''_F &= -\frac{F_\zeta}{D_0 - F_\zeta} \left(\frac{\delta T'_F}{2} - h_m \right); \quad \delta h_Q = -\frac{Q}{D_0 - Q} \left(T_0 - \frac{\delta T_Q}{2} - h_m \right), \end{aligned} \quad (5)$$

где δT — изменение средней осадки в результате суммарного воздействия на корпус внешних ледовых сил F_ζ и Q ; \bar{S} — среднее значение площадей ватерлиний, между которыми заключен вытесненный объем от суммарного влияния ледовых сил F_ζ и Q ; B — ширина корпуса на миделе на уровне исходной ватерлинии;

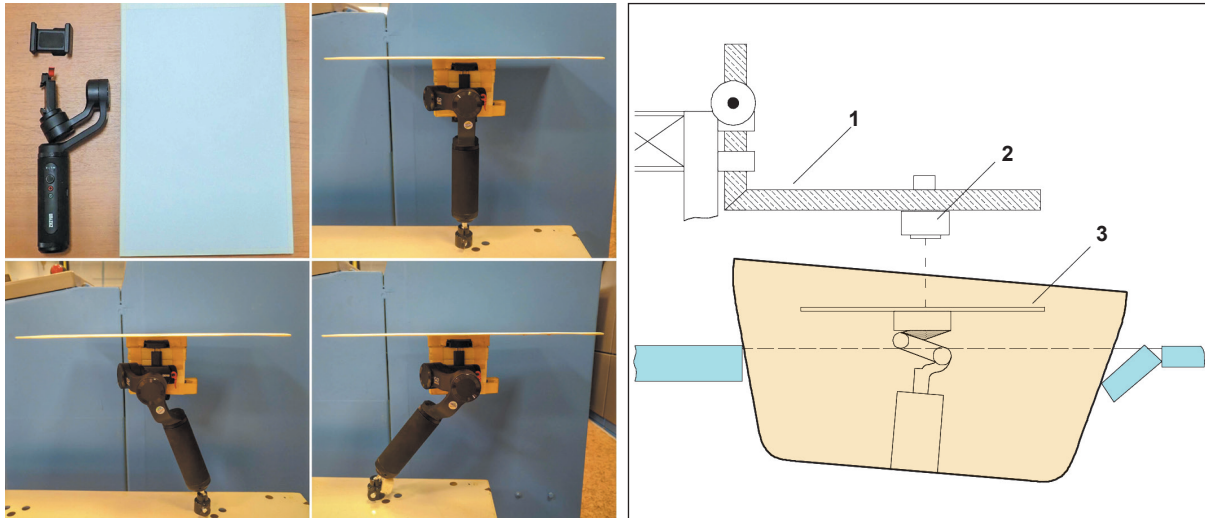


Рис. 7. Электронный стабилизатор горизонта и схема измерения осадки в модельном эксперименте: 1 — подвижная консоль, 2 — лазерный датчик линейных перемещений, 3 — отражательная площадка (фото автора, 2021 г.)
Fig. 7. Electronic horizon stabilizer and scheme for measuring draft in a model experiment: 1 — movable console, 2 — laser linear encoder, 3 — reflective platform (photo by author, 2021)

δT_i — фиксированное в каждом цикле сжатия значение изменения осадки, соответствующее моменту начала выламывания ледяного сектора; θ_i — угол крена, соответствующий по времени величине δT_i в каждом цикле сжатия; символы «'» и «''» используются для обозначения этапов I и II соответственно.

Как видно из выражений (4), переход от этапа II к этапу I осуществляется при обнулении параметра ζ , т. е. в момент контакта корпуса с кромкой ледяного поля после поворота выломанного сектора. Пренебрегая силами плавучести обломка как малыми по сравнению с контактными усилиями, считаем, что момент M_{η} также обнуляется. Таким образом, для создания программного комплекса автоматизированной обработки экспериментальных данных достаточно использовать выражения (4) и (5).

Экспериментальная часть методики

Согласно выведенным расчетным выражениям (4) и (5), в процессе модельного эксперимента непрерывно и синхронно должны регистрироваться угол крена $\theta(t)$ и осадка $T(t)$. При этом по требованию расчетной формулы уменьшения водоизмещения от действия сил ледового сжатия и от влияния сил плавучести ледяной подушки должны определяться раздельно.

Измерение углов крена осуществляется посредством инклинометра.

Наиболее точный способ измерения осадки модели — прямое измерение с помощью лазерного датчика линейных перемещений. В эксперименте такая схема реализована следующим образом. В корпусе модели монтируется гироскопическая система, способная удерживать в горизонтальной плоскости площадку для отражения лазерного сигнала при любых произвольных наклонениях модели (рис. 7). В качестве основы для данного устройства исполь-

зовался электронный стабилизатор горизонта, применяемый для видеокамер при съемке в движении. Конструктивно стабилизатор состоит из двух взаимно перпендикулярных рам, соединенных между собой и рукоятью тремя шарнирами, управляемыми относительно своих осей электромоторами, оснащенными микроэлектромеханическими гироскопами. Высокая чувствительность устройства гарантирует сохранение заданного горизонта даже при динамическом характере воздействия на модель.

Далее на технологическом мосту закрепляется подвижная консоль с посадочным гнездом для лазерного датчика, как схематично показано на рис. 7 справа. Консоль обеспечивает свободное перемещение датчика в плоскости горизонта, сохраняя при этом нормаль лазерного луча к зеркалу воды. Таким образом, в процессе эксперимента осуществляется контроль положения датчика, находящегося непосредственно над отражательной площадкой стабилизатора.

Функция изменения осадки во времени определится по простой формуле

$$T(t) = T_0 - l_0 + l_t, \quad (6)$$

где T_0 — начальная осадка модели; l_0 — исходное расстояние от источника лазерного излучения до горизонтальной площадки стабилизатора; l_t — то же расстояние в произвольный момент времени t .

Для разделения регистрируемого сигнала $T(t)$ на две функции $T_Q(t)$ и $T_F(t)$, определяемые влиянием сил Q и F_{ζ} соответственно, процесс надвигания ледяного поля в модельном эксперименте осуществляется с периодическими остановками, во время которых происходит максимальное ослабление модели от ледовых сжатий. После устранения внешних сил со стороны ледяного поля модель просаживается, сохраняя подвсплывшее положение, обусловлен-

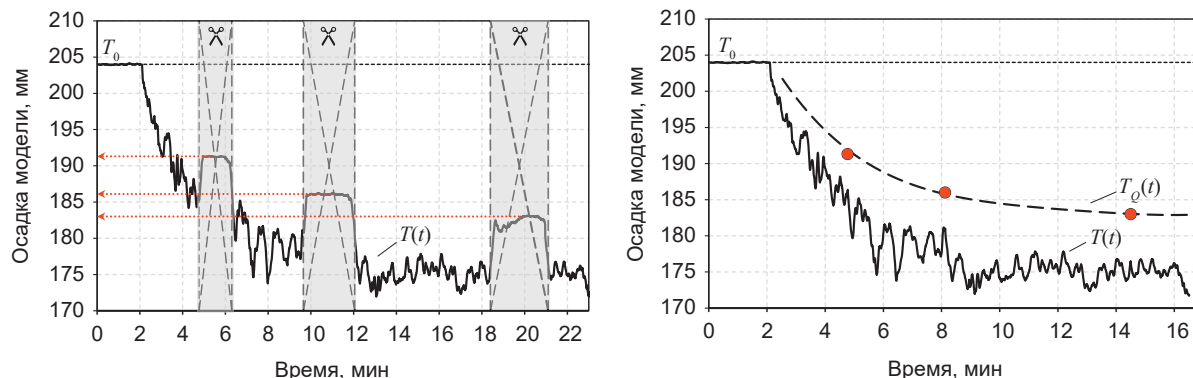


Рис. 8. Принцип разделения общего сигнала $T(t)$ на составляющие в модельном эксперименте
Fig. 8. The principle of dividing the total signal $T(t)$ into components in a model experiment

ное главным образом влиянием ледяной подушки. С каждой последующей остановкой осадка модели уменьшается вследствие прироста льда под корпусом и в конечном счете достигает некоторого предельного значения. На рис. 8 слева показан общий вид регистрируемого сигнала $T(t)$, на котором фиксированы моменты остановок. После удаления обозначенных отрезков и построения функции $T_Q(t)$ по полученным точкам (рис. 8, справа) находится кривая $T_F(t)$ как разность функций. Точность построения функции $T_Q(t)$ зависит от количества совершенных во время эксперимента остановок.

Полученные кривые $\theta(t)$, $T_Q(t)$ и $T_F(t)$ с каждого эксперимента, проводимого при заданных толщинах и изгибной прочности ледяного поля, подаются в расчетную программу, реализующую расчет глобальной ледовой нагрузки в соответствии с выражениями (4) и (5).

Реализация методики на примере дрейфующей платформы «Северный полюс»

Реализация представленной концепции, комбинирующей элементы математического и физического моделирования, выполнена в ледовом опытовом бассейне Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) на примере модели ЛСП «Северный полюс», осуществляющей условный дрейф в северной части Восточно-Сибирского моря.

Предельная толщина ледяных полей, в которых будет проходить дрейф, в данном районе достигает 3 м. При физическом моделировании задаются несколько значений толщин льда с некоторым ин-

тервалом в обозначенном пределе. Изгибная прочность льда на акватории Восточно-Сибирского моря, согласно расчетным данным, полученным по формуле А. Я. Рывлина [8], будет колебаться в диапазоне 490—910 кПа. В рамках примера принимается среднее значение величины, соответствующее 700 кПа.

Интенсивное разрушение льда в месте контакта с корпусом ЛСП может происходить в периоды попадания системы «платформа — льдина» в зоны сильного ледового сжатия. Согласно наблюдениям [5], такое сжатие, вызванное, как правило, ветровым воздействием, оказывается весьма непродолжительным, протекающим не более нескольких часов (10^3 — 10^4 с). При этом скорость, с которой будет происходить разрушение льда, не превысит скорости дрейфа ледяных полей, находящейся в диапазоне 0,01—0,65 м/с. Для модельного эксперимента время действия ледового сжатия принималось равным 1 ч, а скорость выбиралась внутри указанных пределов.

Коэффициент трения окрашенного стального корпуса о лед принимался равным 0,15. Для модели его величина задается на стадии покраски в соответствии с общепринятыми методиками [2; 4].

Согласно главным размерениям платформы «Северный полюс» и обозначенным характеристикам ледовых условий, а также техническим возможностям ледового бассейна ААНИИ, был принят масштаб моделирования 1:40. В табл. 1 представлены параметры натурального объекта и соответствующие им значения для масштабной модели, изготовленной в модельном цехе ААНИИ (рис. 9). Природные характеристики, принятые для имитации ледовых

Таблица 1. Параметры ЛСП «Северный полюс» и ее масштабной модели

Характеристика	Натура	Модель 1:40
Длина по конструктивной ватерлинии (КВЛ)	76,7 м	1917 мм
Ширина по КВЛ	21,8 м	545 мм
Осадка по КВЛ	8,6 м	215 мм

Окончание табл. 1

Характеристика	Натура	Модель 1:40
Водоизмещение по КВЛ	10390 т	162 кг
Поперечная метацентрическая высота	1,5 м	38 мм
Протяженность цилиндрической вставки	65 м	1625 мм
Угол наклона борта в средней части	16°	
Коэффициент трения корпуса о лед	0,15	

Таблица 2. Характеристики для моделирования ледовых сжатий в ледовом бассейне ААНИИ

Характеристика	Натура	Масштаб 1:40
Толщина поля моделированного льда	1,0 м	25 мм
	1,8 м	45 мм
	2,4 м	60 мм
Прочность льда на изгиб	700 кПа	17,5 кПа
Скорость дрейфа ледяных полей	0,16 м/с	2,5 см/с
Время действия ледового сжатия	1 ч	9,5 мин

сжатий в модельном эксперименте, сведены в табл. 2.

Перед экспериментами модель платформы подвергалась балластировке, статической и динамической тарировкам. Особенно важно для экспериментов по ледовым сжатиям соблюдение условий подобия в отношении положения центра тяжести по высоте и момента инерции массы относительно продольной оси.

Подготовленная к испытаниям модель, оборудованная измерительным комплексом, помещалась в чаше ледового бассейна в соответствии с экспериментальной схемой (рис. 1 и 7). После подключения регистрирующей аппаратуры выполнялось поджигание ледяного поля к модели с помощью буксировочной тележки. Эксперимент завершался по истечении времени, отведенного для имитации ледового сжатия, рассчитанного с учетом затрат времени на плановые остановки.

На рис. 10 слева показан пример результирующего графика, полученного с единичного эксперимента после проведения обработки и построения кривой $T_Q(t)$.

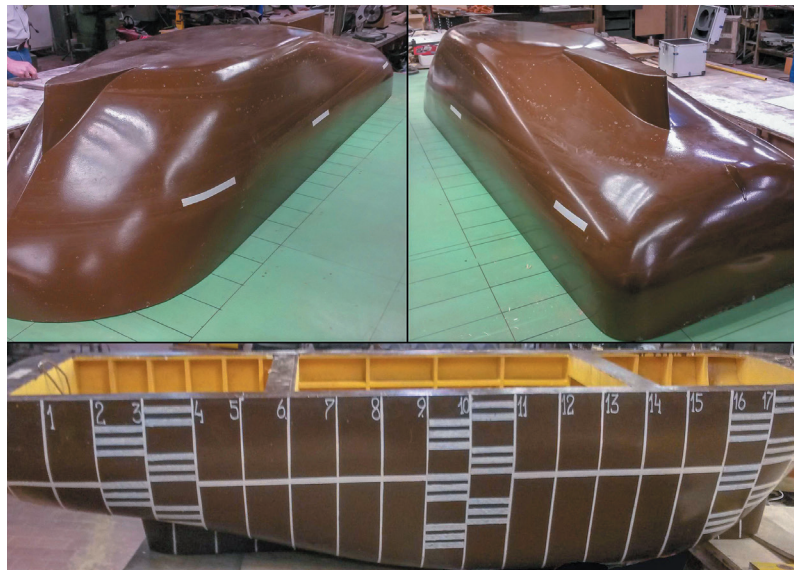


Рис. 9. Общий вид модели дрейфующей платформы «Северный полюс», изготовленной в масштабе 1:40 (фото автора, 2021 г.)
Fig. 9. General view of the model of the drifting platform “North Pole”, made in scale 1:40 (photo by author, 2021)

Затем экспериментальные данные подавались в расчетную модель (4), в соответствии с которой также должны быть заданы значения площади фактической ватерлинии на каждый момент времени. Для расчета последней дополнительно строилась аппроксимация, определяющая зависимость площади ватерлинии от осадки $S(T)$ в пределах ее фактического изменения при ледовых сжатиях. Такая зависимость для модели ЛСП «Северный полюс» имеет вид

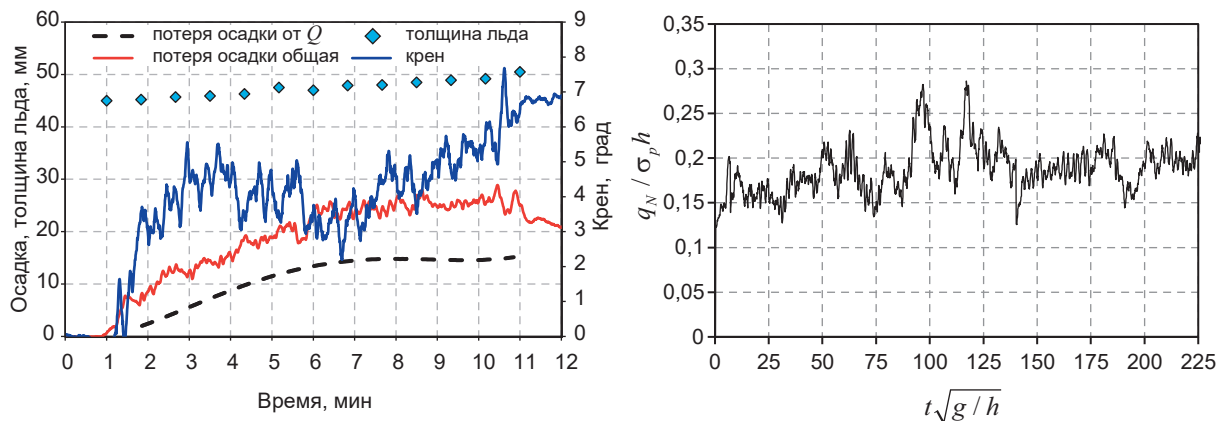


Рис. 10. Пример данных эксперимента и результатов расчета по математической модели
Fig. 10. An example of the data from the experiment and the results of the calculation according to the mathematical model

$$S(T) = -2,33 \cdot 10^{-8} T^3 + 5,21 \cdot 10^{-6} T^2 + 2,86 \cdot 10^{-3} T + 0,306, \quad (7)$$

где площадь S выражается в m^2 , а осадка T — в мм.

При расчетах коэффициент трения льда о корпус принимался в качестве фиксированной величины в предположении, что в статическом приближении диапазон изменения скорости взаимодействия будет незначительным, а выбранное завышенное для свежеокрашенного корпуса значение параметра даст ошибку в безопасную сторону.

На рис. 10 справа приведен пример расчета глобальной ледовой нагрузки на базе предложенной математической модели. Результаты представлены в безразмерной системе координат: $q_N / \sigma_p h$ — относительная погонная глобальная ледовая нагрузка, $t \sqrt{g/h}$ — безразмерное время, где $q_N = F_N / L_{цв}$, $L_{цв}$ — длина цилиндрической вставки платформы. Как видно, вращательные колебания модели, совершаемые при сжатиях, приводят к появлению существенных пиков ледовой нагрузки.

Для полной серии испытаний, выполненной в данном случае при варьируемых толщинах ледяного поля и фиксированных значениях изгибной прочности льда, скорости надвигания ледяного поля и времени ледового воздействия, производилась статистическая обработка результатов. На основании полученных данных определялись функциональные зависимости для ледовой нагрузки заданной обеспеченности, как показано на рис. 11 слева. В конечном счете были получены эмпирические кривые, определяющие глобальные ледовые нагрузки в функции толщины льда для конкретной обеспеченности (вероятности превышения). В качестве примера на рис. 11 (справа) показаны кривые для нескольких значений обеспеченности: максимальные и минимальные значения соответствуют 5%-ной и 95%-ной обеспеченности.

Полноценная верификация результатов моделирования по изложенной методике возможна лишь после специальных натурных экспериментов во время реального дрейфа ЛСП «Северный полюс». На

данном этапе выполнялось только сопоставление результатов с оценками альтернативных расчетных методов. В монографии [9] предлагается простая теоретическая формула, не учитывающая всю сложность характера взаимодействия плавучего объекта с льдом при ледовых сжатиях:

$$F_N = \frac{0,7 \sigma_p h^2}{\sin \beta_{\infty} - f_T \cos \beta_{\infty}}. \quad (8)$$

Значения ледовых нагрузок, рассчитанные на базе формулы (8), оказались близки к наиболее вероятным, полученным по данным физического моделирования (см. табл. 3). Приведенное сравнение результатов, разумеется, не позволяет в полной мере судить о точности предлагаемой методики, но дает ориентиры, на основании которых можно сделать заключение о ее адекватности.

Таблица 3. Сопоставление результатов моделирования с теоретическим расчетом

Параметр	Толщина льда, м			
	1,8	2,2	2,6	3,0
Погонная нагрузка, кН/м:				
эксперимент	214	307	418	545
теоретический расчет	199	278	372	482

Заключение

Предложена экспериментально-аналитическая методика моделирования глобальных ледовых нагрузок от ледовых сжатий на дрейфующие суда и плавучие платформы с наклонным бортом в средней части, реализуемая в условиях ледового опытового бассейна. Подробно изложены основные теоретические и экспериментальные положения предлагаемой методики, а также приведен конкретный пример ее реализации для дрейфующей ледостойкой платформы «Северный полюс».

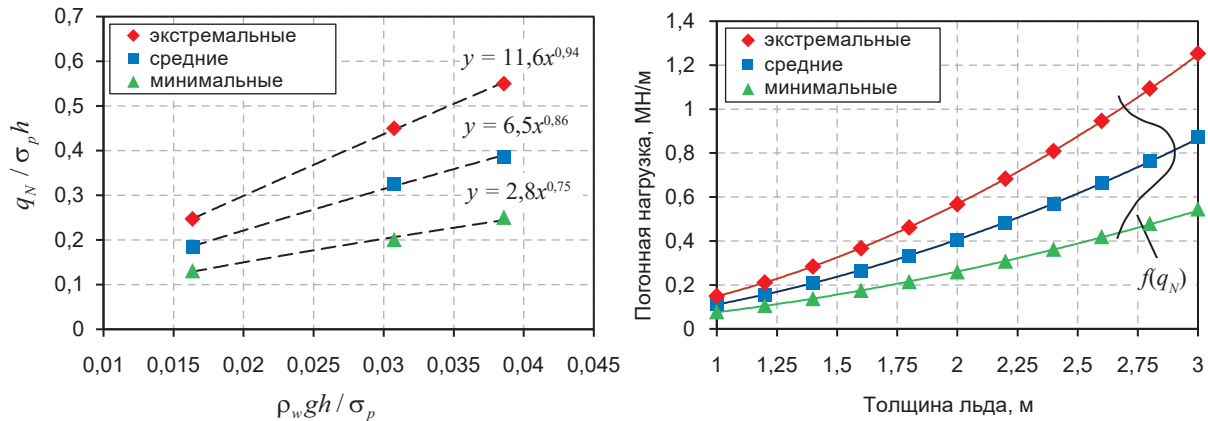


Рис. 11. Пример построения эмпирических кривых глобальной ледовой нагрузки по результатам серийных модельных испытаний

Fig. 11. An example of constructing empirical curves of global ice load based on the results of serial model tests

Методика в первую очередь ориентирована на плавучие объекты, используемые в качестве баз для полярных дрейфующих научных станций, поскольку для их организации целенаправленно выбирается наиболее однородное сплошное поле большой толщины. Тем не менее данный экспериментально-теоретический подход может быть применим и для других случаев дрейфа судов и сооружений судового типа, картина взаимодействия с ледяным покровом в которых будет близка к описанному в статье.

Представленная работа — продолжение проводившихся ранее исследований поведения дрейфующих во льдах объектов методом модельных испытаний [1]. Перспективным направлением для дальнейшего развития методики является разработка новых расчетных моделей для прогнозирования локальных ледовых нагрузок после установления их взаимосвязи с глобальными, полученными в модельном эксперименте.

Литература

1. Свистунов И. А. Определение кренящего момента, действующего при ледовом сжатии на ледостойкую самоходную платформу «Северный полюс», методом модельных испытаний // Арктика: экология и экономика. — 2019. — № 3 (35). — С. 97—106.

2. Каштелян В. И., Позняк И. И., Рывлин А. Я. Сопротивление льда движению судов. — Л.: Судостроение, 1968. — 268 с.
3. Крупина Н. А., Лихоманов В. А., Максимова П. В. и др. Итоги работы большого ледового бассейна ААНИИ (к 25-летию со дня ввода в строй) // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2015. — № 1 (103). — С. 101—110.
4. Сазонов К. Е. Модельный и натурный эксперименты в морской ледотехнике. — СПб.: Крылов. гос. науч. центр, 2021. — 306 с.
5. Рывлин А. Я., Хейсин Д. Е. Испытания судов во льдах. — Л.: Судостроение, 1980. — 208 с.
6. Свистунов И. А. Моделирование ледовых нагрузок от ледовых сжатий на суда и плавучие платформы, используемые в качестве дрейфующих полярных станций: Дис. ... канд. техн. наук / СПбГМТУ. — СПб., 2021. — 199 с.
7. Лихоманов В. А., Попов Ю. Н. Испытания теплохода Оленегорск в арктическую навигацию 1967 года. — Л.: ААНИИ, 1968 — 48 с.
8. Рывлин А. Я. Метод прогнозирования предела прочности ледяного покрова на изгиб // Проблемы Арктики и Антарктики. — 1974. — Вып. 45. — С. 79—86.
9. Каштелян В. И., Рывлин А. Я., Фаддеев О. В., Ягодкин В. Я. Ледоколы. — Л.: Судостроение, 1972. — 288 с.

Информация об авторе

Свистунов Иван Андреевич, кандидат технических наук, младший научный сотрудник, Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (199397, Россия, Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38), e-mail: svistunoff.ivan@yandex.ru.

Библиографическое описание данной статьи

Свистунов И. А. Экспериментально-аналитическая методика определения глобальной ледовой нагрузки от ледовых сжатий на суда и плавучие платформы, используемые в качестве полярных дрейфующих обсерваторий // Арктика: экология и экономика. — 2023. — Т. 13, № 1. — С. 85—96. — DOI: 10.25283/2223-4594-2023-1-85-96.

EXPERIMENTAL-ANALYTICAL METHOD FOR DETERMINING THE GLOBAL ICE LOAD FROM ICE COMPRESSION ON SHIPS AND FLOATING PLATFORMS USED AS POLAR DRIFTING OBSERVATORIES

Svistunov, I. A.

Arctic and Antarctic Research Institute (St. Petersburg, Russian Federation)

The article was received on July 3, 2022

Abstract

The article considers the problem of determining global ice loads from ice compression on ships, icebreakers, floating platforms used as bases for drifting Arctic research stations. The author solves the task of forecasting ice loads during operation by combining mathematical methods and physical modeling in the ice tank. As a result, an experimental-analytical method for modeling ice compression in an ice tank has been obtained. The basic part of the technique is a new mathematical model that describes the physical processes that accompany the quasi-static interaction of a floating object with inclined sides in the middle part of the hull with a thick one-year or multi-year ice field. The experimental part of the methodology is a special technology for conducting serial model tests in an ice tank, which makes it possible to use the developed mathematical model to assess the ice loads under ice compression.

The author considers the application of a new modeling technique on the example of the ice-resistant self-propelled platform "North Pole". The results of the assessment of the global ice load based on the data of a series of model tests carried out in the Arctic and Antarctic Research Institute (AARI) ice tank are presented.

Keywords: *drifting polar stations, model experiment, ice compressions, ice loads, ice tank.*

References

1. Svistunov I. A. Determination of the heeling moment acting in ice compression on the ice-resistant self-propelled platform "North Pole" by the model testing method. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. [Arctic: Ecology and Economy], 2019, no. 3 (35), pp. 97—106. (In Russian).
2. Kashtelyan V. I., Poznyak I. I., Ryvlin A. Ya. Ice resistance of ship movement. Leningrad, Sudostroenie, 1968, 268 p. (In Russian).
3. Krupina N. A., Likhomanov V. A., Maksimova P. V., Nikolayev P. M., Savitskaya A. V., Svistunov I. A., Chernov A. V. Results of work of large ice tank of AARI (To the 25th anniversary of the commissioning). *Problemy Arktiki i Antarktiki*, 2015, no. 1 (103), pp. 101—110. (In Russian).
4. Sazonov K. E. Model and full-scale experiments in marine ice engineering. St. Petersburg, Krylov. gos. nauch. tsentr, 2021, 306 p. (In Russian).
5. Ryvlin A. Ya., Kheysin D. E. Testing of vessels in ice. Leningrad, Sudostroenie, 1980, 208 p. (In Russian).
6. Svistunov I. A. Modeling of ice loads from ice compressions on ships and floating platforms used as drifting polar stations: Dissertation for the degree of Candidate of Engineering. St. Petersburg, 2021. 199 p. (In Russian).
7. Likhomanov V. A., Popov Yu. N. Tests of the ship Ole-negorsk in the Arctic navigation of 1967. Leningrad, AANII, 1968, 48 p. (In Russian).
8. Ryvlin A. Ya. A method for predicting the bending strength of an ice sheet. *Problemy Arktiki i Antarktiki*, 1974, iss. 45, pp. 79—86. (In Russian).
9. Kashtelyan V. I., Ryvlin A. Ya., Faddeev O. V., Yagodka V. Ya. *Ledokoly*. Leningrad, Sudostroenie, 1972, 288 p. (In Russian).

Information about the author

Svistunov, Ivan Andreevich, PhD of Engineering Science, Junior Researcher, Arctic and Antarctic Research Institute (38, Beringa Str., St. Petersburg, Russia, 199397), e-mail: svistunoff.ivan@yandex.ru.

Bibliographic description of the article

Svistunov, I. A. Experimental-analytical method for determining the global ice load from ice compression on ships and floating platforms used as polar drifting observatories. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. [Arctic: Ecology and Economy], 2023, vol. 13, no. 1, pp. 85—96. DOI: 10.25283/2223-4594-2023-1-85-96. (In Russian).

© Svistunov I. A., 2023