

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРЕНЯЩЕГО МОМЕНТА, ДЕЙСТВУЮЩЕГО ПРИ ЛЕДОВОМ СЖАТИИ НА ЛЕДОСТОЙКУЮ САМОХОДНУЮ ПЛАТФОРМУ «СЕВЕРНЫЙ ПОЛЮС», МЕТОДОМ МОДЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ

И. А. Свистунов

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

Статья поступила в редакцию 11 апреля 2019 г.

Представлена методика проведения модельного эксперимента по оценке кренящего момента, возникающего в условиях ледовых сжатий, для первой в мире полярной дрейфующей ледостойкой самоходной платформы типа «Северный полюс». Рассмотрены теоретические положения методики и ее практическая реализация в ледовом бассейне Арктического и антарктического научно-исследовательского института. Согласно методике искомый параметр определяется с учетом потерь метацентрической высоты от влияния ледяной «подушки», образующейся под днищем платформы. В качестве примера приведены некоторые результаты из большой серии экспериментов.

Ключевые слова: дрейфующая научно-исследовательская платформа, модельный эксперимент, ледовые сжатия, устойчивость судов во льдах, ледовый кренящий момент.

Введение

Проведение непрерывных исследований в Арктике обусловлено научными, экономическими и геополитическими интересами России. По ряду причин, в том числе из-за сохраняющейся тенденции к таянию льдов Северного Ледовитого океана, продолжительные работы на естественных дрейфующих полях¹ в настоящее время затруднены.

Эффективным решением этой проблемы должно послужить проектирование и строительство уникального плавучего сооружения — ледостойкой самоходной платформы (ЛСП) «Северный полюс», выполняющей функции научно-исследовательской станции [1]. Первая в мире в своем роде дрейфующая самоходная платформа позволит решать весь спектр научных и изыскательских задач внутри арк-

тического сектора, обеспечивая при этом комфортные и безопасные условия для членов экспедиции. При этом задачи смогут выполняться не только в период дрейфа во льдах, но и во время переходов к местам швартовки, поскольку платформа будет иметь собственный движитель, а корпус — обводы, близкие к судовым (рис. 1).

На стадии модельных испытаний проекта ЛСП «Северный полюс» необходимо исследовать как активный режим взаимодействия сооружения со льдом — ледовую ходкость, так и режим дрейфа в ледяном массиве, сопровождающегося неизбежными ледовыми сжатиями различной интенсивности.

Исследование ледовой ходкости самоходной платформы может быть выполнено в ледовом бассейне по известным методикам, применяемым для моделей судов и ледоколов [2]. Со времен открытия в 1955 г. в Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте (АНИИ) первого в мире опытового ледового бассейна в этом

¹ На научно-исследовательских станциях типа «Северный полюс» (СП).



Основные характеристики ЛСП «Северный полюс»:

• наибольшая длина	83,1 м;
• наибольшая ширина	22,5 м;
• высота борта на миделе	11,4 м;
• осадка по конструктивной ватерлинии (КВЛ)	8,6 м;
• водоизмещение	10 373 т;
• мощность энергетической установки	4200 кВт;
• автономность по провизии/топливу	365/730 сут;
• экипаж / научный персонал	14/34 человека.

Рис. 1. Общий вид ЛСП «Северный полюс»
 Fig. 1. External view and main characteristics of the ice-resistant self-propelled platform (IRSP) "North Pole"

направлении накопился большой опыт проведения экспериментов. Проблема ледовых сжатий судов в ААНИИ в то время исследовалась главным образом с точки зрения обеспечения прочности корпусных конструкций [3]. Вопросы устойчивости в этих условиях в основном оставались в тени как вторичные, не требующие дополнительных исследований, а внешние воздействия при этом рассматривались как не создающие опасности потери данного качества у временно бездвигательного судна.

Для ЛСП исследование устойчивости (наряду с прочностью) становится первоочередным, поскольку главным эксплуатационным режимом является именно продолжительный дрейф во льдах, а не форсирование последнего. При сжатии в многолетних льдах большой толщины вероятно появление опрокидывающего момента, возникающего в результате частичного вытеснения корпуса и последующего разрушения кромок поля под бортами. Помимо этого в результате длительного дрейфа под корпусом платформы может накапливаться массивная ледяная подушка из различных фракций битого льда, влияющая на устойчивость плавучего сооружения.

Точное аналитическое решение поставленных задач пока не представляется возможным, что приводит к необходимости применения метода модельных испытаний. Для этого требуется разработать методику проведения эксперимента, которая позволит качественно и количественно оценить ледовый кренящий момент, а также определить изменение начальной метацентрической высоты в этих условиях. Созданию такой методики и посвящена настоящая работа.

Ледовый опытовый бассейн

Ледовый бассейн представляет собой экспериментальную установку в виде гидроканала, запол-

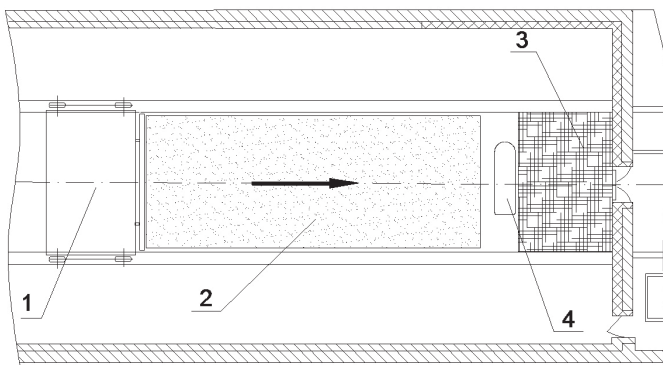


Рис. 2. Схема проведения модельного эксперимента по ледовым сжатиям ЛСП: 1 – буксировочная тележка, 2 – поле моделированного льда, 3 – утолщенное поле моделированного льда, 4 – модель платформы
 Fig. 2. Scheme of the model experiment on ice compression of the IRSP: 1 – towing trolley, 2 – simulated floe, 3 – thickened simulated floe, 4 – platform model

ненного водой, на поверхности которой создается лабораторный (моделированный) лед. В настоящее время известно много технологий приготовления льда, прочностные свойства которого уменьшены по сравнению с аналогичными характеристиками природного льда [4]. В ААНИИ традиционно применяется технология намораживания так называемого NaCl-льда, имеющего столбчатую структуру кристаллов [5].

Технические средства ныне действующего ледового бассейна ААНИИ (рис. 2, слева) позволяют проводить модельные испытания ходкости судов, эксперименты по оценке глобальных ледовых нагрузок на модели стационарных сооружений, моделировать всплытия подводных объектов из-под льда [6].

Во всех случаях должны соблюдаться требования теории подобия [7], которые распространяются как на модели испытываемых объектов (1), так и на моделируемую среду — лед (2):

$$\frac{L_n}{L_m} = \frac{B_n}{B_m} = \frac{T_n}{T_m} = \lambda, \quad \frac{V_n}{V_m} = \frac{t_n}{t_m} = \sqrt{\lambda},$$

$$\frac{P_n}{P_m} = \lambda^3, \quad \frac{M_n}{M_m} = \lambda^4, \quad (1)$$

$$\frac{h_n}{h_m} = \lambda, \quad \frac{E_n}{E_m} = \frac{\sigma_n}{\sigma_m} = \lambda, \quad \rho_n = \rho_m, \quad f_n = f_m, \quad (2)$$

где индекс «*n*» относится к натурным условиям, индекс «*m*» — к модели; λ — масштабный коэффициент; h — толщина льда; f — коэффициент трения льда; ρ — плотность льда; E — модуль упругости льда; σ — предел прочности льда на изгиб; L, B, T — главные размерения испытываемого объекта; V — скорость движения объекта; t — время; P — массовые силы²; M — моменты сил.

При разработке методики модельного эксперимента по ледовым сжатиям платформы эти требования также должны быть удовлетворены.

Сценарий для моделирования

Будущая ЛСП для осуществления дрейфа будет иметь несколько вариантов швартовки к ледяному полю, пригодному для разбивки ледового лагеря. Среди них самостоятельная швартовка к краю ледяного поля или внутри естественного разводья между кромками полей; а также швартовка с помощью ледокола внутри поля в проложенном канале.

При воздействии природных сил, вызывающих ледовое сжатие, в перечисленных вариантах могут возникнуть два сценария, характеризующиеся в одном

случае равными толщинами ледяных полей с обоих бортов, в другом — различными.

Как показали предварительные эксперименты с моделью ЛСП в ледовом бассейне, оба сценария сводятся к единой картине взаимодействия объекта со льдом. При сжатии между полями различной толщины модель упирается в более толстую кромку, приводя к разрушению поля со стороны противоположного борта. При сжатии во льдах одной толщины после непродолжительного разрушения кромок поочередно с обоих бортов наступает также приоритет ломки с одного борта. В обоих случаях наблюдаются тождественные процессы: периодическая ломка льда, сопровождаемая креном, и непрерывное накопление выломанных секторов возле бортов и оконечностей модели, а также непосредственно под плоским днищем.

В связи с этим для моделирования описанных явлений справедливо использовать следующую схему эксперимента в ледовом бассейне (рис. 2, справа). Модель ЛСП располагается поперек чаши бассейна между двумя ледяными полями, одно из которых приморожено к стенкам бассейна и имеет избыточную толщину, другое — подвижное и соответствует моделируемым толщинам. Подвижное поле надвигается на модель с помощью буксировочной тележки. Благодаря такому решению ломка льда происходит заведомо со стороны надвигающегося поля, а модель остается в заданном месте по длине бассейна. При этом протекают все необходимые для исследования процессы.

Физическая картина взаимодействия

В рамках выбранной схемы проведения эксперимента детально рассмотрим физическую картину взаимодействия модели платформы со льдом для определения основных и отсеивания второстепенных факторов, определяющих внешнее воздействие.

После контакта с полем моделированного льда практически сразу происходит постепенное вытеснение модели (рис. 3а). Обусловлено это тем, что у корпуса имеется существенный (до 15°) развал борта даже в средней части, а моделируемые ледовые условия соответствуют сжатиям в мощных многолетних льдах.

Процесс вытеснения завершается разрушением кромки надвигаемого поля. После этого модель стремительно притапливается с одновременным накрениением в сторону разрушившегося лед борта (рис. 3б). При дальнейшем надвигании надломленный сектор поворачивается и уходит в подсов, а подошедшая «свежая» кромка вступает в контакт с корпусом, предопределяя следующий цикл.

По истечении некоторого времени подсов из битого льда достигает значительных размеров, что способствует дальнейшему его распространению под плоское днище (рис. 3в). Накопление льда происходит вплоть до появления подсова со стороны про-

² Силы, приложенные к каждой единице объема и пропорциональные массе этого объема. К этой категории относятся силы тяжести и силы инерции [8].

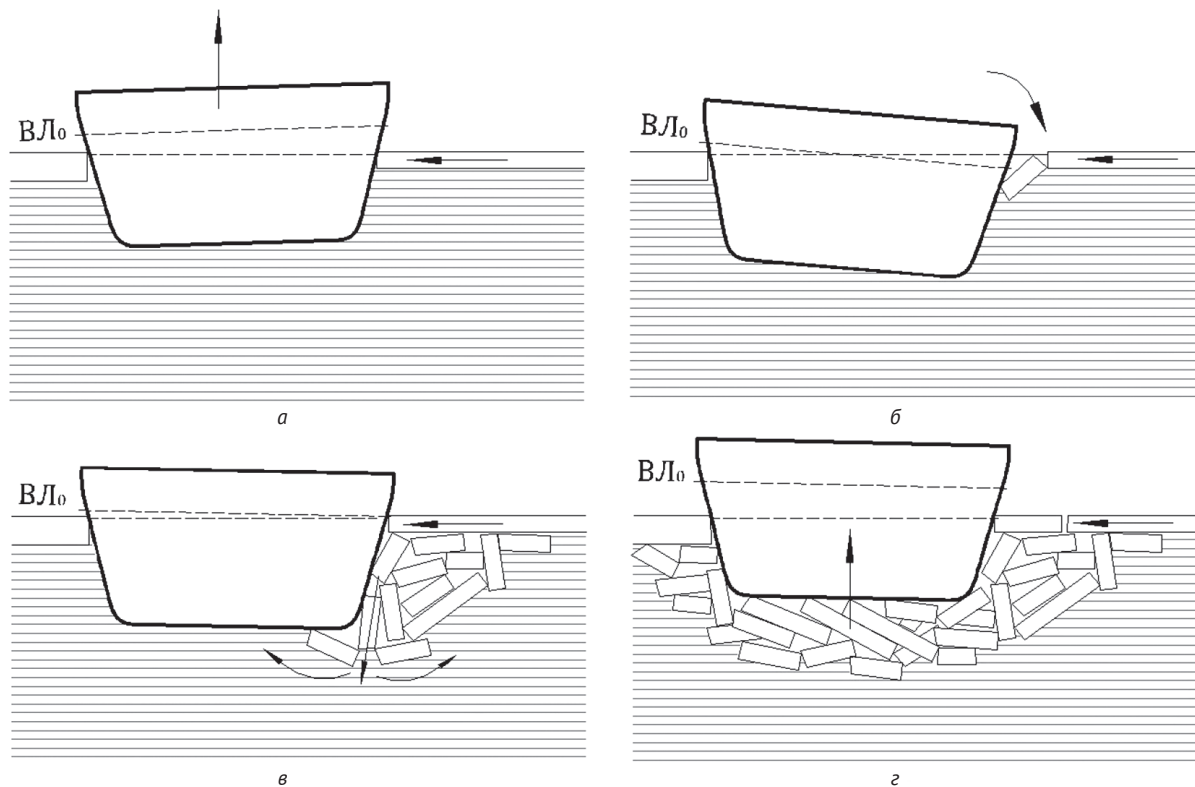


Рис. 3. Основные этапы взаимодействия модели платформы с ледяным полем при сжатии
 Fig. 3. Main stages of the interaction of the platform model with a floe during compression

типоволожного борта. В итоге ледяная чаша полностью закрывает подводную часть корпуса (рис. 3г).

Формирование чаши непрерывно сопровождается не только поперечными, но и продольными колебаниями модели. Дифферент при этом обусловлен неодновременностью разрушения кромки надвигаемого поля вдоль модели, а также неравномерностью распределения битого льда под корпусом по длине. Однако ледовые моменты в продольной пло-

скости не представляют серьезной опасности для платформы, поэтому в дальнейшем не учитываются.

Как видно из описания, исследуемый процесс в целом является колебательным, состоящим из повторяющихся циклов, отличающихся друг от друга с течением времени. Главные факторы, определяющие этот сложный процесс, — ледовое сжатие, разрушение кромок поля, формирование ледяной чаши под корпусом.

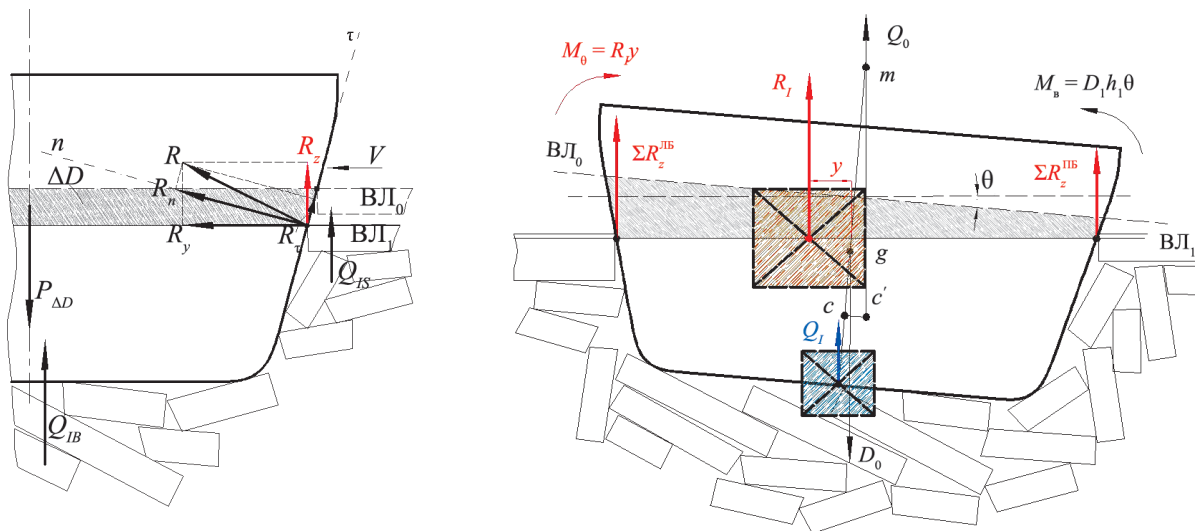


Рис. 4. Схемы сил и моментов, действующих на модель в условиях сжатий
 Fig. 4. Scheme of forces and moments acting on the model under compression

Определим силы (реакции) и моменты, действующие на модель в результате действия перечисленных причин.

Формализация задачи

Вытеснение модели при ледовом сжатии, действующем в горизонтальной плоскости, происходит за счет вертикальных составляющих реакций R , возникающих со стороны бортов (рис. 4, слева). По мере всплытия доля вертикальных проекций растет в связи с уменьшением водоизмещения на величину ΔD .

Разрушение надвигаемой ледяной пластины наступает в результате сложного изгиба [3] в момент превышения вертикальной нагрузки несущей способности ледяного покрова. Далее под действием гравитационных сил модель стремится к исходному равновесному положению, имея при этом разницу в величине реакций по бортам, что приводит модель к крену.

Сила плавучести от нарастающего под бортом подсова постепенно приводит к уменьшению амплитуд колебаний в каждом цикле сжатия за счет их демпфирования. На стадии образования полноценной ледяной чаши суммарная сила плавучести становится достаточной для осуществления постепенного привсплытия модели.

Для дальнейшей формализации задачи разделим силу плавучести на составляющие: силу плавучести подсова под бортами Q_{IS} и силу плавучести ледяной подушки под плоским днищем Q_{IB} . При этом полагаем, что первые силы Q_{IS} наряду с основными факторами участвуют главным образом в периодическом процессе накренения, а процесс непрерывного всплытия обусловлен только равнодействующей Q_{IB} . Неучет влияния плавучести подсова в последнем процессе не внесет сильных искажений, но позволит упростить схему для получения конечных расчетных зависимостей.

В свою очередь, результирующая Q_{IB} самостоятельного кренящего момента практически не дает. Как показали наблюдения, распределение льда в поперечном сечении под днищем на стадии образования полноценной ледяной чаши близко к равномерному, в связи с чем сила Q_{IB} будет проходить вблизи линии диаметральной плоскости.

Тогда в соответствии с предложенным описанием и с учетом введенных упрощений разрабатываемая для бассейна методика будет определять ледовый кренящий момент модели, вызванный совокупностью действия упругих сил, сил трения и массовых сил от процессов ледового сжатия, разрушения кромок полей, накопления подсова. Вместе с этим должна быть определена сила плавучести ледяной подушки, т. е. той части ледяной чаши, которая скапливается под днищем.

Теоретические основы методики

Как было показано, изменение посадки модели во время ледовых сжатий происходит под действием вертикальных составляющих внешних воздействий.

В связи с этим действие таких сил может быть заменено фиктивной процедурой снятия-приема грузов, силы тяжести которых соответствуют действующим силам, а их центры тяжести совпадают с точками приложения результирующих сил (рис. 4, справа). Этот подход позволит с помощью самой модели оценить внешние возмущающие факторы через эквивалентные им силы и моменты, не учитывая различия природы внешних сил, но исследуя их влияние на остойчивость модели. Весь процесс может быть представлен как последовательность статических положений равновесия модели.

На основе принятых допущений ледовый кренящий момент, имеющий сложную природу происхождения, может быть заменен эквивалентным кренящим моментом M_0 от перемещения фиктивного груза R_I переменной массы, центр тяжести которого всегда лежит в плоскости фактической

ватерлинии. При этом $R_I = \sum R_z^{ЛБ} + \sum R_z^{ПБ}$, где

$\sum R_z^{ЛБ}$ и $\sum R_z^{ПБ}$ — суммарные воздействия сил R_z и Q_{IS} на корпус модели с левого и правого бортов соответственно. Действие нарастающей силы плавучести ледяной подушки Q_{IB} , неизменной по направлению, будет компенсироваться постепенным снятием «груза» Q_I с центром тяжести, лежащим в основной плоскости.

Используя уравнение плавучести и метацентрическую формулу поперечной остойчивости [9], получим выражения, которые позволят определять фиктивные массы и эквивалентный кренящий момент в произвольный момент времени:

$$\left. \begin{aligned} P_{\Delta D} &= Q_I \pm R_I, \\ M_0 &= D_1 h_1 \sin \theta, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $P_{\Delta D}$ — масса вытесненной воды; $D_1 = D_0 - Q_I \pm R_I$; D_0 — исходное водоизмещение; $h_1 = h_0 \pm \Delta h$; h_0 — начальная метацентрическая высота; Δh — поправка к метацентрической высоте, вызванная суммарным влиянием Q_I и R_I ; θ — угол крена.

Совместное действие Q_I и R_I пропорционально изменению водоизмещения или потерянной силе плавучести модели ΔQ , которая может быть вычислена по формуле

$$\Delta Q = \rho_w g \Delta T \frac{(S_{WL_1} + S_{WL_2})}{2} \quad (4)$$

или

$$Q_I \pm R_I = \rho_w g \Delta T \bar{S}_{WL}, \quad (5)$$

где ρ_w — плотность воды; g — ускорение свободного падения; ΔT — среднее изменение осадки модели; S_{WL_1} и S_{WL_2} — площади ватерлиний, между которыми заключен вытесненный объем.

Фиктивные грузы, определяемые согласно (5), различно расположены по высоте, а значит, по-разному будут влиять на остойчивость модели. Поэтому важно определить их величины независимо друг от друга, как и разделить общую поправку Δh на составляющие Δh_Q и Δh_R от влияния Q_I и R_I соответственно.

Согласно введенному выше разделению возмущающих сил сложный процесс внешнего воздействия представим как сумму двух простых. Первый процесс — колебательный, от действия R_p , вызывающий периодическое изменение осадки ΔT_R , второй процесс имеет вид возрастающей функции изменения осадки ΔT_Q от непрерывного накопления льда под днищем.

Для каждого процесса отдельно определим, как изменится основной показатель (мера) остойчивости модели — начальная метацентрическая высота.

Влияние «груза» R_I на остойчивость будет как положительным, так и отрицательным, поскольку действие самой силы является периодическим. Формула для оценки поправки Δh_R к начальной метацентрической высоте может быть выведена на базе известных выражений для оценки изменения остойчивости и посадки судна при приеме или расходовании груза [9]. В данном случае аппликата центра тяжести принимаемого или снимаемого «груза» соответствует осадке по уровень фактической ватерлинии. Расчетное выражение для оценки поправки к начальной метацентрической высоте примет вид

$$\Delta h_R = \frac{\mp R_I}{D_0 \mp R_I} \left(\pm \frac{\Delta T_R}{2} - h_0 \right). \quad (6)$$

При рассмотрении влияния ледяной подушки задача решается аналогично задаче о посадке судна на мель или камни [9]. Не останавливаясь подробно на теоретическом решении, запишем конечное выражение для определения поправки Δh_Q к начальной метацентрической высоте, которая в данном случае всегда будет иметь отрицательное влияние на остойчивость:

$$\Delta h_Q = -\frac{Q_I}{D_0 - Q_I} \left(T - \frac{\Delta T_Q}{2} - h_0 \right), \quad (7)$$

где T — осадка по заданную ватерлинию.

С учетом последнего запишем общее расчетное выражение, позволяющее определить действие искомых сил:

$$\left. \begin{aligned} M_\theta &= (D_0 - Q_I \pm R_I) (h_0 - \Delta h_Q \pm \Delta h_R) \sin \theta, \\ Q_I &= \gamma \Delta T_Q \bar{S}_{WL}, \\ R_I &= \gamma \Delta T_R \bar{S}_{WL}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

В выражениях (6), (7) и (8) параметры ΔT_R , ΔT_Q и θ должны измеряться во время физического экспери-

мента в течение всего процесса ледового сжатия. Далее рассмотрим практическую реализацию данной концепции в ледовом бассейне с измерением этих параметров.

Методика проведения эксперимента

Модельный эксперимент выполняется в два этапа. Предварительно проводится опыт кренования модели на чистой воде для определения начальной метацентрической высоты h_0 и задания ей нужной величины. Для этого, как и в случае с натурным судном [10], производится последовательность извместных мероприятий, заключающаяся главным образом в перемещении крен-балласта с одного борта на другой для создания крена, который и фиксируется после прекращения возможных колебаний модели относительно нового положения равновесия. Определение метацентрической высоты выполняется по формуле

$$h_0 = \frac{pl}{D_0 tg \theta}, \quad (9)$$

где p — масса крен-балласта; l — расстояние от центра тяжести крен-балласта до диаметральной плоскости модели.

Выставление требуемого значения h_0 достигается перераспределением основного балласта внутри модели в сторону повышения или понижения центра тяжести модели z_g . Как показано выше, сама модель выступает в качестве измерительного инструмента. Поэтому метацентрическая высота будет характеристикой чувствительности данного «прибора». С этой позиции занижение величины h_0 повышает восприимчивость модели к внешнему опрокидывающему моменту, что, в свою очередь, позволяет получить большую точность при измерении углов крена в процессе следующего этапа эксперимента. Однако предпочтительнее выставлять h_0 пропорционально натурной величине для сохранения подобия картины взаимодействия реальным условиям при соблюдении остальных требований — см. (1) и (2).

Вторая и основная часть эксперимента проводится согласно представленному выше описанию в соответствии со схемой на рис. 2 (справа). При этом скорость надвигания и толщина моделированного льда задаются исходя из натуральных условий.

Внутри корпуса модели устанавливается шестикомпонентный инерциальный модуль (рис. 5, слева), который измеряет проекции векторов линейного ускорения и угловой скорости на ортогональные оси системы координат модели. Это позволяет получить изменение посадки модели — в данном случае осадки и крена — в течение всего времени воздействия.

Обработка и анализ сигналов изменения осадки модели ΔT позволили выполнить требование теории в плане разделения данного параметра на ΔT_R и ΔT_Q . Согласно результатам типичный получаемый сигнал

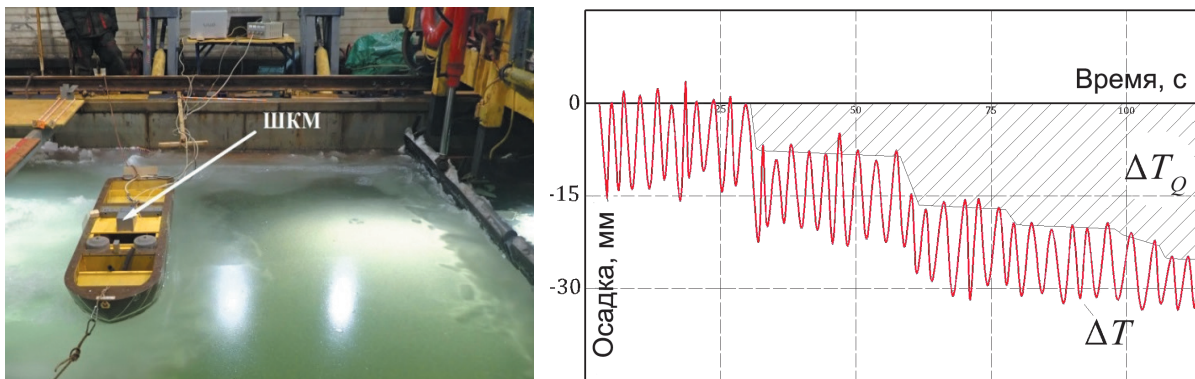


Рис. 5. Шестикомпонентный инерционный модуль (ШКМ) в модельном эксперименте
Fig. 5. Six-component inertial module (ШКМ) in a model experiment

Таблица 1. Основные характеристики ЛСП и параметры ледовых условий для моделирования

Характеристика	Натура	Модель 1:40
Длина по КВЛ	76,7 м	1917 мм
Ширина по КВЛ	21,8 м	545 мм
Осадка по КВЛ	8,6 м	215 мм
Осадка по БВЛ	7,6 м	191 мм
Водоизмещение по КВЛ	10390 т	162 кг
Водоизмещение по БВЛ	8821 т	139 кг
Метацентрическая высота в полном грузу / без груза	1,5 м	38 мм
Толщина ледяного покрова	0,8—3,0 м	20—75 мм
Скорость дрейфа ледяного поля	0,15—0,50 м/с	2,4—7,9 см/с

схематично может быть представлен графиком на рис. 5 (справа). Кривая $\Delta T = f_T(t)$ отображает сложный периодический процесс при постепенном ступенчатом смещении от исходного положения с уменьшением амплитуды колебаний. Заштрихованная зона на графике отображает потерю осадки от действия сил плавучести накапливающегося под корпусом льда. Таким образом, раскладывая общий процесс на составляющие [11], можно выявить функцию $\Delta T_R = f_{TR}(t)$ от действия циклического сжатия.

Полученные сигналы во времени $\Delta T_R = f_{TR}(t)$, $\Delta T_Q = f_{TQ}(t)$ и $\theta = f_\theta(t)$ используются в расчетных выражениях (6), (7) и (8). В итоге результат эксперимента представляется графиком ледового кренящего момента в функции от времени. Из графика определяется предельное значение параметра, которое после пересчета на натуру может быть использовано в расчетах устойчивости реального объекта с учетом действия других природных факторов (ветра, обледенения). Помимо предельной величины график $M_\theta = f_{M\theta}(t)$ дает информацию о характере процесса в целом, что важно для прогнозирования опасных ситуаций.

Методика позволяет получить изменение (потери) начальной метацентрической высоты во времени от влияния набивающейся под днищем ледяной подушки, а также предельное значение этой потери.

Регистрация таких характеристик, как скорость надвигания поля и распределение толщины льда, создает дополнительную платформу, на базе которой могут быть получены корреляционные зависимости между исследуемыми и задаваемыми параметрами для решения частных задач.

Практическая реализация методики

Согласно представленной методике была выполнена серия из 29 экспериментов ледового сжатия модели платформы «Северный полюс». Испытания проводились для двух вариантов загрузки модели при равной метацентрической высоте в диапазоне скоростей и толщин надвигаемого ледяного поля. Природные характеристики для моделирования задавались исходя из многолетней статистики, полученной по данным станций СП, и показаны в табл. 1. Там же представлены основные параметры модели ЛСП.

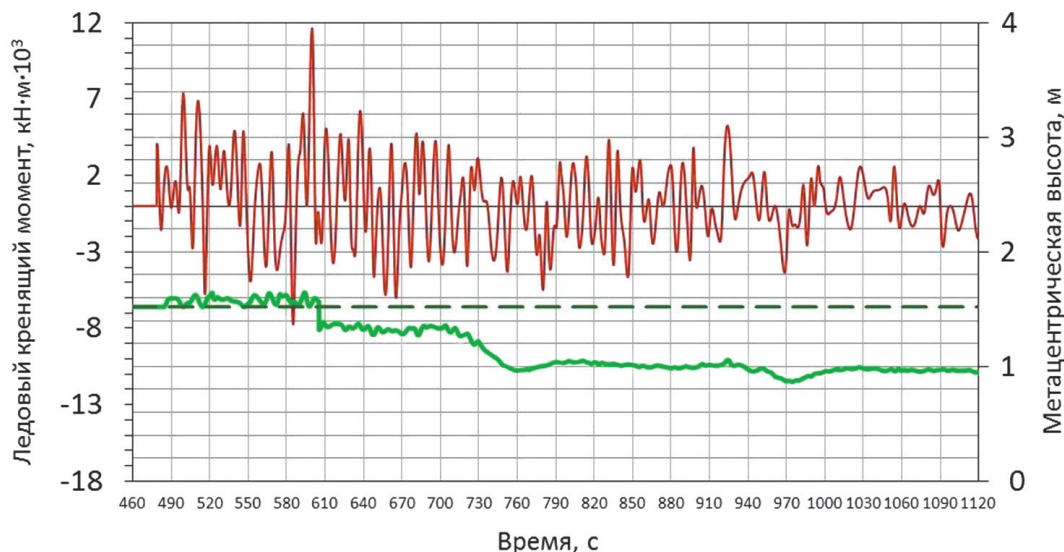


Рис. 6. Графики изменения кренящего момента и начальной метацентрической высоты платформы в процессе ледовых сжатий
 Figure 6. Plots of changes in the heeling moment and the initial metacentric height of the platform in the processes of ice compression

Пример результирующего графика в виде кривых $M_{\theta} = f_{M_{\theta}}(t)$ и $h_0 = f_h(t)$ представлен на рис. 6. Ледовый кренящий момент имеет максимумы на начальном этапе эксперимента, когда размер подсов еще недостаточен для демпфирования колебаний модели. В свою очередь, подсов является причиной попадания льда под плоское днище, в результате чего уменьшается метацентрическая высота, достигая максимума потерь ближе к концу эксперимента.

Качественный анализ графика позволяет сделать вывод, что вероятность одновременного наступления этих двух событий (двух максимумов) близка к нулю. Следовательно, нецелесообразно закладывать в дальнейший расчет остойчивости одновременно оба пиковых значения этих параметров.

Количественный анализ данных всей серии экспериментов показал, что максимальная величина кренящего момента для натуральных условий достигает 42 000 кНм при сжатии во льдах толщиной, близкой

к 3 м. Максимальная потеря метацентрической высоты соответствует 30% при толщине слоя ледяной подушки, сопоставимой с осадкой платформы.

На рис. 7 представлены фрагменты с экспериментов, где модель подвергается значительному кренящему моменту при сжатиях в толстых льдах (слева), а также показана начальная стадия формирования ледяной подушки (справа).

Заключение

Представлена методика проведения модельного эксперимента по оценке кренящего момента ледостойкой самоходной платформы типа «Северный полюс» в условиях ледовых сжатий. Рассмотрены ее теоретические положения и практическая реализация в ледовом бассейне ААНИИ. Согласно методике искомый параметр определяется с учетом потерь метацентрической высоты от влияния ледяной подушки, образующейся под днищем модели ЛСП в результате

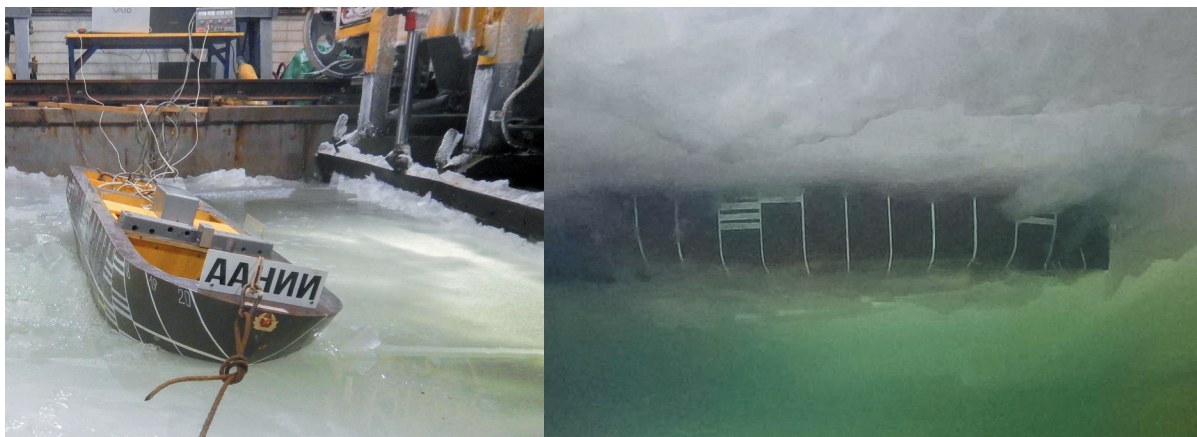


Рис. 7. Фрагменты с экспериментов по оценке ледового кренящего момента
 Fig. 7. Fragments of the experiments on the assessment of the ice heeling moment

циклического разрушения надвигающегося ледяного поля. В качестве примера приведены некоторые результаты из большой серии экспериментов.

Предложенная в работе концепция в перспективе может быть использована и для натурального объекта, а также для судов и ледоколов, имеющих значительный наклон борта, с целью создания систем мониторинга для контроля остойчивости в режиме реального времени.

Работа выполнена в рамках договора, заключенного между АО КБ «Вымпел» (Нижний Новгород) и ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт».

Автор выражает благодарность коллегам из Арктического и антарктического научно-исследовательского института за техническую и профессиональную помощь в подготовке и проведении трудоемких экспериментов в ледовом бассейне. Отдельную признательность автор выражает своему научному руководителю доктору технических наук, профессору Санкт-Петербургского государственного морского технического университета Владимиру Николаевичу Тряскину за помощь в работе над статьей.

Литература

1. Макаров А. С., Лихоманов В. А., Соколов В. Т. и др. Концептуальные принципы создания полярной дрейфующей исследовательской платформы // Арктика: экология и экономика. — 2018. — № 3 (31). — С. 65—75. — DOI: 10.25283/2223-4594-2018-3-65-75.

2. Шиманский Ю. А., Позняк И. И., Каштелян В. И., Рывлин А. Я. Проведение модельных испытаний ледоколов и судов ледового плавания. Фонды ААНИИ. — Л., 1958.

3. Хейсин Д. Е. Определение ледовых нагрузок, действующих на корпус судна, плавающего во льдах: Дис. ... канд. техн. наук / Ленингр. кораблестроит. ин-т. — Л., 1962. — 168 с.

4. Ионов Б. П., Грамузов Е. М. Ледовая ходкость судов. — СПб.: Судостроение, 2001. — 512 с.

5. Каштелян В. И., Позняк И. И., Рывлин А. Я. Сопrotивление льда движению судов. — Л.: Судостроение, 1968. — 268 с.

6. 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.

7. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. — М.: Наука, 1981. — 447 с.

8. Хейсин Д. Е., Попов Ю. Н., Игнатъев М. А. Анализ критериев моделирования движения судна во льдах. Фонды ААНИИ. — Л., 1964. — 27 с.

9. Семенов-Тянь-Шанский В. В. Статика и динамика корабля. Теория плавучести, остойчивости и спуска: Учебник для вузов: 2-е изд. — Л.: Судпромгиз, 1960. — 576 с.

10. Барсуков А. П., Певзнер Л. Р. Теория корабля: Учебник для курсантов высших военно-морских инженерных училищ. — Л., 1960. — 492 с.

11. Мэнли Р. Анализ и обработка записей колебаний. — М.: Машиностроение, 1972. — 368 с.

Информация об авторе

Свистунов Иван Андреевич, 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. 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. — DOI: 10.25283/2223-4594-2019-3-97-106.

DETERMINATION OF THE HEELING MOMENT ACTING IN ICE COMPRESSION ON THE ICE-RESISTANT SELF-PROPELLED PLATFORM “NORTH POLE” BY THE MODEL TESTING METHOD

Svistunov I. A.

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

The article was received on April 11, 2019

Abstract

The first in the world ice resistant self-propelled ship-type platform was designed and developed in the Russian Federation for performing year-round scientific studies in the Central Arctic Basin. An operation feature of this platform is its long drift in perennial ice. Accordingly, under conditions of ice compression both sufficient hull strength and the platform stability should be ensured.

At the design stage studies were performed in the Arctic and Antarctic Research Institute (AARI) ice tank. For performing physical modeling of the platform behavior under ice compression a unique methodology was developed, according to which the platform model was exposed to an approaching simulated floe from one of the sides. A measuring complex was installed on the model, which made it possible to measure with a high frequency the platform heel and draft change in the course of its interaction with ice. The obtained measurement data made it possible to calculate the value of the ice heeling moment and the main index of stability — a metacentric height — at each moment of time.

The paper presents the theoretical foundations of the proposed methodology. According to the latter, a series of 29 experiments were performed to compress the model of the North Pole platform. As an example, some results experiments are given.

Keywords: *drifting research platform, model experiment, ice compressions, stability of ships in ice, ice heeling moment.*

The work was performed under the agreement between the Vympel Design Bureau (Nizhny Novgorod) and FGBU “Arctic and Antarctic Research Institute”.

The author is grateful to his colleagues from the Arctic and Antarctic Research Institute for technical and professional assistance in preparing and conducting time-consuming experiments in the ice tank. Special thanks from the author to his supervisor Vladimir N. Tryaskin, Dr. of Engineering Science, Professor at St. Petersburg State Marine Technical University, for the help with the article

References

1. Makarov A. S., Likhomanov V. A., Sokolov V. T., Chernov A. V., Polovinkin V. N., Timofeev O. Ya., Mogutin Yu. B., Simonov Yu. A. Kontseptual'nye printsipy sozdaniya polyarnoi dreifuyushchei issledovatel'skoi platformy. [Conceptual principles for creation of the drifting polar research platform]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2018, no. 3 (31), pp. 65—75. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-3-65-75. (In Russian).
2. Shimanskii Yu. A., Poznyak I. I., Kashtelyan V. I., Ryvlin A. Ya. Provedenie model'nykh ispytaniy ledokolov i sudov ledovogo plavaniya. Fondy AANII. [Model trials of icebreakers and ice navigation ships]. Leningrad, 1958. (In Russian).
3. Kheisin D. E. Opreделение ledovykh nagruzok, deistvuyushchikh na korpus sudna, plavayushchego vo l'dakh. [Determination of ice loads, acting on the ship hull navigating in ice]. Dis. ... kand. tekhn. nauk. Leningr. korablestroit. in-t. Leningrad, 1962. 168 p. (In Russian).
4. Ionov B. P., Gramuzov E. M. Ledovaya khodkost' sudov. [Ice movement ships]. St. Petersburg, Sudostroenie, 2001, 512 p. (In Russian).
5. Kashtelyan V. I., Poznyak I. I., Ryvlin A. Ya. Soprotivlenie l'da dvizheniyu sudov. [Ice resistance of ship movement]. Leningrad, Sudostroenie, 1968, 268 p. (In Russian).
6. Krupina N. A., Likhomanov V. A., Maksimova P. V., Nikolaev P. M., Savitskaya A. V., Svistunov I. A., Chernov A. V. Itogi raboty bol'shogo ledovogo basseina AANII. [Results of work of large ice tank of AARI]. *Problemy Arktiki i Antarktiki*, 2015, no. 1 (103), pp. 101—110. (In Russian).
7. Sedov L. I. Metody podobiya i razmernosti v mekhanike. [Methods of similarity and dimension in mechanics]. Moscow, Nauka, 1981, 447 p. (In Russian).
8. Kheisin D. E., Popov Yu. N., Ignat'ev M. A. Analiz kriteriev modelirovaniya dvizheniya sudna vo l'dakh. Fondy AANII. [Analysis of the criteria for modeling the movement of ship in ice]. Leningrad, 1964, 27 p. (In Russian).
9. Semenov-Tyan-Shanskii V. V. Statika i dinamika korablya. Teoriya plavuchesti, ostoichivosti i spuska. [Ship statics and dynamics. Theory of buoyancy, stability and launching]. Uchebnik dlya vuzov: 2nd ed. Leningrad, Sudpromgiz, 1960, 576 p. (In Russian).
10. Barsukov A. P., Pevzner L. R. Teoriya korablya. [Ship theory]. Ucheb. dlya kursantov vysshikh voennomorskikh inzhenernykh uchilishch. Leningrad, 1960, 492 p. (In Russian).
11. Manley R. Analiz i obrabotka zapisei kolebanii. [Analysis and processing of vibration records]. Moscow, Mashinostroenie, 1972, 368 p. (In Russian).

Information about the author

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

Bibliographic description

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. *Arctic: Ecology and Economy*, 2019, no. 3 (35), pp. 97—106. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-3-97-106. (In Russian).

© Svistunov I. A., 2019