

УДК 624.124.791

© В. А. Зувев, Е. М. Грамузов, А. А. Куркин*, Ю. А. Двойченко, А. С. Себин, 2022

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 603950, ул. Минина, д. 24,
г. Нижний Новгород, Россия

*E-mail: aakurkin@gmail.com

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА НАГРУЗКОЙ, ДВИЖУЩЕЙСЯ С МАЛОЙ СКОРОСТЬЮ

Статья поступила в редакцию 22.06.2021, после доработки 06.02.2022, принята в печать 29.03.2022

Аннотация

Рассматривается возможность физического моделирования деформации ледяного покрова от нагрузки, движущейся с малой скоростью. Используя уравнение колебаний упругой пластины на основании гидравлического типа, показано, что подобие напряженно-деформированного состояния в модельном льду может быть достигнуто только в рамках подходов классической теории моделирования ледяного покрова Ногида-Шиманского. Принимая во внимание известные сложности, связанные с практической реализацией этого способа, исследуется применимость модели льда уменьшенной толщины, разработанной в НГТУ. Она заключается в преднамеренном несоблюдении подобия льда по толщине при удовлетворении прочих требований, реализуя частичное подобие модели. Показываются возникающие при этом расхождения с теорией Ногида-Шиманского, оценивается их влияние на конечный результат. Исследуется применимость модели тонкого льда в бассейнах с естественным охлаждением классической формы для целей моделирования движения нагрузки с малой скоростью. Приведены результаты экспериментального исследования деформации ледяного покрова под движущейся нагрузкой с использованием модельного тонкого естественного льда. Исследуется изменение формы волны и максимального прогиба льда в зависимости от изменения скорости движения и величины нагрузки. Показана связь уменьшения отношения площади профиля чаши прогибов к профилю выгиба льда перед движущейся нагрузкой с увеличением скорости в начале движения, что может говорить о резком росте энергетических затрат на деформирование ледяного покрова, когда взаимодействие технического средства со льдом уже нельзя рассматривать как квазистатическое. Точное определение этих затрат является критически важным при проектировании ледокольных средств, прокладывающих канал в поле сплошного льда.

Ключевые слова: лёд, физическое моделирование, модель льда, ледовый бассейн

© В. А. Зувев, Е. М. Грамузов, А. А. Куркин*, Ю. А. Двойченко, А. С. Себин, 2022

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Minin St., 24, Nizhny Novgorod, 6039050, Russia

*E-mail: aakurkin@gmail.com

PHYSICAL MODELING OF ICE COVER DEFORMATION UNDER THE ACTION OF A MOVING LOAD AT LOW SPEED

Received 22.06.2021, Revised 06.02.2022, Accepted 29.03.2022

Abstract

The current paper considers the possibility of physical modeling of ice cover deformation under the action of a moving load at low speed. Using an equation for elastic plate oscillations on the foundation of a hydraulic type, it is shown that similarity of a stress and strain state (SSS) of model ice can be achieved but within the scope of the approaches based on a classical theory of Nogid-Shimansky modeling of ice cover. Taking into account certain complications connected with practical implementation of the above method, the applicability of a reduced-thickness ice model developed at NNSTU is investigated. This model uses the ice thickness that intentionally does not comply with the similarity requirements, all other requirements being satisfied, thus providing incomplete similarity of the model. Some disagreements with a Nogid-Shimansky model connected with that are revealed and their influence on the end result is evaluated. The applicability of a thin ice model is investigated in natural cooled model tanks of

Ссылка для цитирования: Зувев В.А., Грамузов Е.М., Куркин А.А., Двойченко Ю.А., Себин А.С. Физическое моделирование деформации ледяного покрова нагрузкой, движущейся с малой скоростью // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т. 15, № 2. С. 19–32. doi:10.48612/fpg/mkmg-68r8-4h6v

For citation: Zuev V.A., Gramuzov E.M., Kurkin A.A., Dvoichenko Y.A., Sebin A.S. Physical Modeling of Ice Cover Deformation Under the Action of a Moving Load at Low Speed. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022, 15, 2, 19–32. doi:10.48612/fpg/mkmg-68r8-4h6v

classical shape used for modeling of load movement at low speed. The results of the experimental investigation of ice cover deformation under the action of a moving load using a model for the natural thin ice are given. The modification of a wave shape and maximum ice deflection depending on change of a movement speed and loading are investigated. The connection of decrease of a ratio of the deflection basin profile area to the outward ice bending profile in front of a moving load with increase of speed at the start of the movement is demonstrated, which can be an evidence of a sharp growth of energy expenses for ice cover deformation when the interaction between the technical facility and ice cannot be considered as quasistatic. An exact evaluation of such expenditures is crucial when designing the ice-breaking facilities clearing a path through floe ice.

Keywords: ice, physical modeling, ice model, ice model tank

1. Введение

Физическое моделирование остаётся наиболее эффективным средством изучения взаимодействия различных морских технических объектов с ледяным покровом при проектировании. Развивающееся арктическое судоходство требует строительства новых, более мощных ледоколов, способных обеспечить проводку крупнотоннажных судов не только во льдах предельной толщины, но и гарантировать движение с определённой коммерчески обоснованной скоростью. Поиски оптимальных параметров ледокольного судна, уверенно двигающегося во льдах с требуемыми скоростями без необходимости работать набегами, приводят к новым перспективным формам корпуса [1, 2]. Также одним из наиболее эффективных методов разрушения ледяного покрова обладают ледокольные средства, создающие систему распределённых давлений на поверхности льда [3]. Исследование взаимодействия со льдом корабельных ледотехнических средств, прокладывающих канал с необходимой скоростью, требует пересмотра используемых подходов в физическом моделировании, учёта возникающих в ледяном покрове динамических процессов.

Разработкой математических и физических моделей взаимодействия перемещающейся нагрузки с ледяным покровом занималось большое число исследователей [4–9]. Однако все эти работы охватывают только случаи околокритической, критической и сверхкритической скоростей движения нагрузки, посвящены вопросам резонансного метода разрушения льда судами на воздушной подушке, а также организации ледовых переправ и ледовых аэродромов. Вопросам физического моделирования деформации и разрушения ледяного покрова нагрузкой, движущейся со скоростями, характерными для ледокольных средств, не использующих резонансный метод (далее будем называть эти скорости малыми), уделено не так много внимания. Это связано в первую очередь с тем, что до недавнего времени при проектировании ледоколов вопрос ставился исключительно о достижении предельной ледопроеходимости, в то время как обеспечения разрушения льда при заданной скорости движения не требовалось. В связи с этим становится актуальной задача разработки подходов к физическому моделированию деформации и разрушения ледяного покрова от действия нагрузки, движущейся с малой скоростью, установление условий моделирования и критериев подобия, проработка способов проведения эксперимента в условиях современного ледового опытового бассейна.

Вопросу обоснования термина «малая скорость» посвящена работа [10], и, хотя изучение пограничных состояний, когда начинают сказываться пластические деформации во льду, продолжает оставаться актуальным, малой можно считать такую скорость, когда изгибно-гравитационные волны в ледяном покрове не распространяются.

Как известно, поведение ледяного покрова под воздействием движущейся нагрузки хорошо описывается уравнением вязкоупругих колебаний [4]. Модель упругой пластины при высоких скоростях даёт незатухающие колебания, что не согласуется с известными экспериментальными данными. Однако, проведённое с использованием численных методов широкое исследование различных математических моделей, описывающих вязкоупругие свойства деформируемой пластины [11, 12], позволило сделать вывод, что упругая модель при малых скоростях движения нагрузки даёт решения, близкие к модели Кельвина-Фойгта, причем, чем ниже скорость, тем меньше расхождение. Полученные решения сравнивались с экспериментальными натурными данными [6], было выявлено их высокое сходство. Таким образом, можно сделать вывод о низком влиянии пластических свойств льда при малых скоростях движения нагрузки, а значит о возможности использования для целей моделирования наиболее хорошо разработанную теорию упругости, а также методы физического моделирования льда как упругой среды.

В данной статье исследуется возможность моделирования напряжённого-деформированного состояния ледяного покрова при воздействии на него движущейся нагрузки, используя уравнение колебаний бесконечной упругой пластины на основании гидравлического типа, классическую теорию моделирова-

ния ледяного покрова Ногида-Шиманского [16] и моделирование с использованием тонкого естественного льда. Показана их связь, а также принимаемые допущения, позволяющие на практике выполнять модельный эксперимент только при частичном подобии наблюдаемых явлений. Приведены результаты экспериментов в ледовом опытовом бассейне НГТУ с естественным охлаждением, направленных на исследование поведения ледяного покрова при движении по нему нагрузки с малой скоростью, а также на изучение применимости полученных условий моделирования.

2. Условия моделирования

Ледяной покров будем рассматривать как идеально упругое тело. В качестве математической модели используем тонкую жёсткую упругую пластину на основании Винклера [13]. Это возможно, принимая во внимание, что глубина чаши прогиба ледяного покрова, а, следовательно, и амплитуда распространяющейся в нём волны при малых скоростях движения много меньше её длины. Таким образом, частицы пластины под действием поперечно направленной нагрузки будут испытывать только малые вертикальные колебания, горизонтальные усилия, трение, а также силы сжатия, присутствующие в ледяном покрове, учитывать не будем. В этом случае течение воды вблизи поверхности пластины можно рассматривать как безвихревое [14], а жидкость в целом как идеальную.

Рассматривая динамическую задачу колебаний ледяного покрова под действием нагрузки, Д.Е. Хейсин выделяет уравнение равновесия упругой пластины в каждый момент времени под действием внешних и внутренних сил [4]:

$$D\nabla^2\nabla^2w + \rho_i h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = q(x, y, t) + p(x, y, t), \quad (1)$$

где ρ_i — плотность льда; $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$ — цилиндрическая жёсткость ледяной пластины; E — модуль деформации; h — толщина льда; μ — коэффициент Пуассона; $q(x, y)$ — действующая на пластину статическая нагрузка со стороны внешних сил; $w(x, y)$ — прогиб пластины; $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ — оператор Лапласа; $p(x, y, t)$ — воздействие на пластину гидродинамических сил.

Эти силы, действующие на нижнюю кромку пластины, для волн малой амплитуды можно определить по формуле:

$$p = -kw - \rho_w \left. \frac{\partial \Phi}{\partial t} \right|_{z=w}, \quad (2)$$

где Φ — потенциал скорости жидкости; $k = \rho_w g$ — коэффициент упругого основания; ρ_w — плотность воды; g — ускорение свободного падения.

В отличие от Хейсина, будем рассматривать давление жидкости на нижней поверхности пластины не при $z = 0$, а при $z = w$. При движении нагрузки по пластине последняя испытывает деформации, вследствие чего поверхность воды также деформируется. Приравнивание давления на нижней поверхности пластины к давлению на уровне покоящейся жидкости приводит к условию проницаемости пластины. Это может быть удобно при поиске аналитического решения, так как избавляет от нелинейности в дифференциальном уравнении и допустимо если рассматривать прогибы пластины и, следовательно, перемещение частиц жидкости, как малые. Однако, в случае поиска критериев подобия для физического моделирования это допущение не является необходимым.

В рассматриваемом уравнении на пластину действуют только вертикальные силы, а перемещение давления приводит только к её вертикальным прогибам. В этом случае, можно предположить, что перемещения жидкости вблизи нижней поверхности пластины также будут только вертикальными:

$$\vec{v}_x, \vec{v}_y = 0 \Big|_{z=w}, \quad (3)$$

где $\vec{v}_x$ и $\vec{v}_y$ — проекции вектора скорости потока жидкости на оси x и y .

В том случае, если напряжённо-деформированное состояние (НДС) модели ледяного покрова может быть описано с помощью того же уравнения равновесия (1), что и для натурального льда, то члены этого уравнения для модели должны быть связаны с соответствующими членами уравнения для натурального льда через соответствующие масштабы моделирования:

$$D_n \nabla^2 \nabla^2 w_n = \frac{\lambda_D \lambda_w}{\lambda_l^4} D_m \nabla^2 \nabla^2 w_m; \quad (\rho_i)_n h_n \frac{\partial^2 w_n}{\partial t_n^2} = \frac{\lambda_{\rho_i} \lambda_w \lambda_h}{\lambda_l^2} (\rho_i)_m h_m \frac{\partial^2 w_m}{\partial t_m^2};$$

$$(\rho_w)_n g w_n = \lambda_{\rho_w} \lambda_w (\rho_w)_m g w_m; \quad (\rho_w)_n \left. \frac{\partial \Phi_n}{\partial t_n} \right|_{z_n=w_n} = \frac{\lambda_{\rho_w} \lambda_v \lambda_w}{\lambda_l} (\rho_w)_m \left. \frac{\partial \Phi_m}{\partial t_m} \right|_{z_m=w_m}; \quad (4)$$

$$q_n(x_n, y_n, t_n) = \frac{\lambda_P}{\lambda_l^2} q_m(x_m, y_m, t_m).$$

где $\lambda_l, \lambda_w, \lambda_h, \lambda_D, \lambda_{\rho_i}, \lambda_{\rho_w}, \lambda_l, \lambda_v, \lambda_P$ — масштабы моделирования соответственно: линейных размеров, прогибов пластины, толщины льда, цилиндрической жёсткости пластины, плотности льда, плотности воды, времени, скорости, сил; здесь и далее индексы n и m означают принадлежность элемента к описанию натуры и модели соответственно.

Тогда уравнение равновесия натурной ледяной пластины можно записать:

$$\frac{\lambda_D \lambda_w}{\lambda_l^4} D_m \nabla^2 \nabla^2 w_m + \frac{\lambda_{\rho_i} \lambda_w \lambda_h}{\lambda_l^2} (\rho_i)_m h_m \frac{\partial^2 w_m}{\partial t_m^2} + \lambda_{\rho_w} \lambda_w (\rho_w)_m g w_m + \frac{\lambda_{\rho_w} \lambda_v \lambda_w}{\lambda_l} (\rho_w)_m \left. \frac{\partial \Phi_m}{\partial t_m} \right|_{z_m=w_m} = \frac{\lambda_P}{\lambda_l^2} q_m(x_m, y_m, t_m). \quad (5)$$

Разделим обе части уравнения на λ_w :

$$\frac{\lambda_D}{\lambda_l^4} D_m \nabla^2 \nabla^2 w_m + \frac{\lambda_{\rho_i} \lambda_h}{\lambda_l^2} (\rho_i)_m h_m \frac{\partial^2 w_m}{\partial t_m^2} + \lambda_{\rho_w} (\rho_w)_m g w_m + \frac{\lambda_{\rho_w} \lambda_v}{\lambda_l} (\rho_w)_m \left. \frac{\partial \Phi_m}{\partial t_m} \right|_{z_m=w_m} = \frac{\lambda_P}{\lambda_l^2 \lambda_w} q_m(x_m, y_m, t_m). \quad (6)$$

Рассмотрим коэффициенты, стоящие перед членами получившегося уравнения. При проведении модельных испытаний разницу плотностей натурной и модельной воды не учитывают, что позволяет выполнить моделирование третьего члена уравнения, описывающего влияние упругого основания:

$$\lambda_{\rho_w} = 1. \quad (7)$$

Масштаб моделирования цилиндрической жёсткости можно записать:

$$\lambda_D = \lambda_E \lambda_h^3 \frac{1 - \mu_n^2}{1 - \mu_m^2}. \quad (8)$$

Для того чтобы уравнение изгиба модельной ледяной пластинки было эквивалентно уравнению изгиба натурного льда необходимо, чтобы коэффициенты перед членами уравнения (6), описывающие взаимосвязь между масштабами моделирования, не оказывали бы влияния на уравнение, т.е.:

$$\frac{\lambda_E \lambda_h^3}{\lambda_l^4} \cdot \frac{1 - \mu_n^2}{1 - \mu_m^2} = 1, \quad \frac{\lambda_{\rho_i} \lambda_h}{\lambda_l^2} = 1, \quad \frac{\lambda_{\rho_w} \lambda_v}{\lambda_l} = 1, \quad \frac{\lambda_P}{\lambda_l^2 \lambda_w} = 1. \quad (9)$$

Если в модели выполняется подобие прогибов ледяной пластины:

$$\lambda_w = \lambda_l = \lambda, \quad (10)$$

то коэффициент перед членом в правой части уравнения (6), описывающий действие внешней нагрузки, прикладываемой к ледяной пластине, переписывается:

$$\lambda_P = \lambda_l^2 \lambda_w = \lambda^3. \quad (11)$$

Это выражение представляет собой известный из классической теории подобия [15] динамический масштаб моделирования, представляющий собой условие моделирования Ньютоновских сил.

Коэффициент перед вторым членом уравнения (6) является условием подобия инерционных сил льда, и в том случае, если плотность материала модели льда такая же, как у натурного ледяного покрова:

$$\lambda_{\rho_i} = 1, \quad (12)$$

а толщина льда подчиняется геометрическому масштабу моделирования:

$$\lambda_h = \lambda, \quad (13)$$

получим условие, представляющее собой временной масштаб моделирования:

$$\lambda_t = \sqrt{\lambda_h \lambda_{\rho_i}} = \sqrt{\lambda}. \quad (14)$$

Рассматривая коэффициент четвёртого члена уравнения (6), описывающего кинематическое давление жидкости на нижнюю поверхность пластины, а также принимая во внимание (7) и (13), получим выражение для кинематического масштаба моделирования [15]:

$$\lambda_v = \frac{\lambda_t}{\lambda_{\rho_w}} = \sqrt{\lambda}. \quad (15)$$

При использовании в качестве модели ледяного покрова материала, у которого коэффициент Пуассона будет таким же, как у натурального льда $\lambda_\mu = 1$, получим условие подобия сил упругости пластины, описываемых первым членом уравнения (6):

$$\frac{\lambda_E \lambda_h^3}{\lambda_t^4} = 1, \text{ или в другом виде:} \\ \lambda_h = \lambda^{4/3} \lambda_E^{-1/3}. \quad (16)$$

Учитывая (13), получим:

$$\lambda_E = \lambda. \quad (17)$$

Все вместе рассмотренные условия являются составляющей частью известных критериев моделирования льда, разработанных Ногидом и Шиманским [16] (т.н. классическая теория моделирования ледяного покрова):

$$\lambda_{\rho_w} = \lambda_{\rho_i} = \lambda_\mu = \lambda_f = 1, \lambda_h = \lambda, \lambda_E = \lambda_\sigma = \lambda, \lambda_v = \sqrt{\lambda}, \lambda_P = \lambda^3, \quad (18)$$

где λ_f и λ_σ — масштабы моделирования коэффициента трения и критических изгибных напряжений.

Таким образом, из результатов выполненного анализа следует, что при проведении модельных экспериментов по разрушению льда нагрузкой, движущейся с малой скоростью, достижение подобия НДС ледяного покрова, описываемого уравнением (1), возможно при удовлетворении условий классической теории моделирования ледяного покрова.

Однако практическое выполнение этих условий встречает значительные трудности, связанные как с недостаточной изученностью процессов разрушения натурального ледяного покрова, так и с разработкой приемлемого материала модели льда. Более подробно это описано в [17, 18]. Перспективным является применение композитной модели ледяного покрова с использованием гранул полиэтилена высокого давления (“GP-ice”) [19, 20]. Однако свойства этой модели при статическом разрушении изучены пока ещё недостаточно, чтобы говорить о её применении в динамических задачах.

Оригинальный метод физического моделирования движения судов во льдах, основанный на аналогичном подходе к определению критериев подобия, предложен в [21]. Используется статическое уравнение равновесия упругой изотропной пластины на основании Винклера:

$$D \nabla^2 \nabla^2 w = q(x, y) - kw. \quad (19)$$

Уравнение (19) рассматривается как математическая модель, адекватно описывающая НДС ледяного покрова при его разрушении ледокольным судном, движущемся в тяжёлых льдах, что определяет её достаточность для целей выявления критериев подобия при физическом моделировании разрушения ледяного покрова ледокольным средством. В этом случае скорость хода судна достаточно мала и его взаимодействие со льдом можно рассматривать как квазистатическое [22]. На основе общности математического описания деформации натурального и модельного ледяного покрова уравнением (19) выделяются следующие критерии подобия:

$$\lambda_{\rho_w} = \lambda_{\rho_i} = \lambda_\mu = \lambda_f = 1, \lambda_h = \lambda^{4/3}, \lambda_v = \sqrt{\lambda}, \lambda_P = \lambda^3. \quad (20)$$

В качестве материала модели используется естественный лёд без добавок. Этот способ использует преднамеренное несоблюдение геометрического масштаба при моделировании толщины льда, жертвуя подобием массовых характеристик обломков в пользу моделирования внутренних сил упругости и предела прочности. Такой подход стал возможным при использовании экспериментального разделения полного ледового сопротивления судна на составляющие:

$$R = R_f + R_r + R_w, \quad (21)$$

где R_f — сопротивление, вызываемое ломкой сплошного ледяного поля; R_r — сопротивление обломков движению судна; R_w — сопротивление воды.

При этом сначала проводятся испытания в сплошном естественном льду, затем в полученных обломках. В результате получают сопротивление ломки льда R_f . После этого проводятся испытания в обломках льда, имитированных плитками полиэтилена высокого давления, затем на чистой воде, свободной ото льда. В результате получают полное ледовое сопротивление (21) как сумму его составляющих. Более подробную информацию об этом методе можно найти в [18, 22].

Опыт использования данной модели в различных задачах определения ледового сопротивления судов позволил говорить об эффективности данного метода не только во льдах предельной толщины, но и при других реальных скоростях движения водоизмещающих судов во льдах [23]. Таким образом, этот метод можно рассматривать как перспективный при моделировании разрушения ледяного покрова нагрузкой, движущейся с малой скоростью.

Заметим, что использование условий (20) при моделировании ледяного покрова, разрушающегося от воздействия движущейся нагрузки, по уравнению (1) приводит к невыполнению условия (14), выражающего подобие сил инерции ледяного покрова. Однако, успешность применения данного метода при испытаниях моделей ледоколов при различных скоростях движения во льду может говорить о том, что энергетические затраты, связанные с инерцией ледяной пластины, малы по сравнению с общими затратами. Отсюда можно сделать вывод, что в реальных условиях при моделировании деформации ледяного покрова с помощью уравнения (6) вторым членом, описывающим инерционные свойства льда, можно пренебречь ввиду его малости по сравнению с остальными.

Таким образом, физическое моделирование разрушения ледяного покрова от нагрузки, движущейся с малой скоростью, используя для описания НДС динамическое уравнение равновесия упругой изотропной тонкой пластинки (1), покоящейся на основании Винклера, может быть возможно с использованием условия (20) с применением в качестве материала модели тонкого естественного льда. Этот метод обладает небольшой трудоёмкостью и позволяет проводить испытания при малых масштабах моделирования в бассейнах с естественным охлаждением, что существенно уменьшает стоимость экспериментов.

3. Экспериментальные исследования

Для изучения динамических процессов, развивающихся в ледяном покрове при движении по нему распределённой нагрузки при различных скоростях движения, а также изучения границ применимости рассмотренных в предыдущем пункте положений, был предпринят ряд экспериментов. Опыты производились в ледовом бассейне НГТУ (рис. 1, а) при отрицательной температуре воздуха, лёд наращивался под действием естественного холода. Длина бассейна составляла 16 м, ширина 1,6 м, глубина чаши бассейна — 0,8 м. В качестве нагрузки использовалась платформа из пенопласта прямоугольной формы (рис. 1, б), с размерами в плане $0,6 \times 0,5$ м. Нижняя поверхность платформы была покрыта фторопластовой пленкой для уменьшения сил трения. Сама платформа имела массу 6,32 кг, и нагружалась балластом до 21 кг.

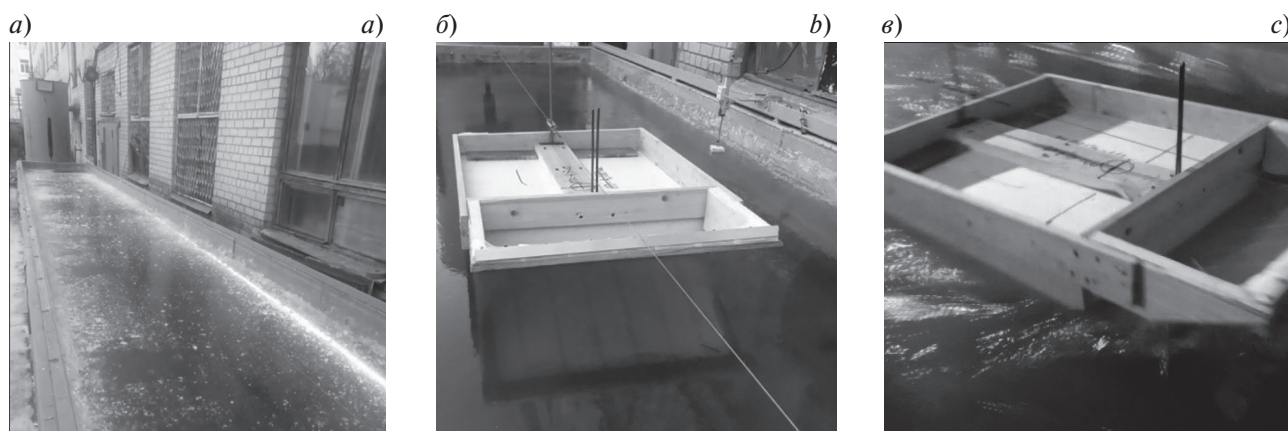


Рис. 1. Опыты по воздействию движущейся нагрузки на модельный лёд: а — ледовый бассейн НГТУ; б — движение нагрузки с малой скоростью; в — разрушение льда при скорости близкой к резонансной

Fig. 1. Experiments on investigating the action of a moving load on the model ice: а — ice tank of NNSTU; б — load movement at low speed; в — ice breaking at a speed close to resonant

Пенопласт имел необходимую плотность и твёрдость, которые с одной стороны обеспечивали полное прилегание макета к деформируемому льду и обеспечивали распределение нагрузки, а с другой стороны обеспечивалась достаточная прочность и целостность макета при проведении опытов. Макет закреплялся в буксировочную систему гравитационного типа с возможностью регистрации скорости перемещения в режиме реального времени. Буксировка модели производилась с применением буксировочного груза. Скорость движения получалась в начале опытов неравномерной из-за разной шероховатости поверхности льда. Повысить равномерность удалось путем смачивания поверхности льда водой.

Так как при естественной глубине бассейна резонанс достигался при излишне больших скоростях, был использован известный эффект уменьшения резонансной скорости с уменьшением глубины водоёма [4]. На мелководье скорость распространения изгибно-гравитационной волны, при которой достигается явление параметрического резонанса, не зависит от характеристик льда и определяется:

$$v_r = \sqrt{gH}, \quad (22)$$

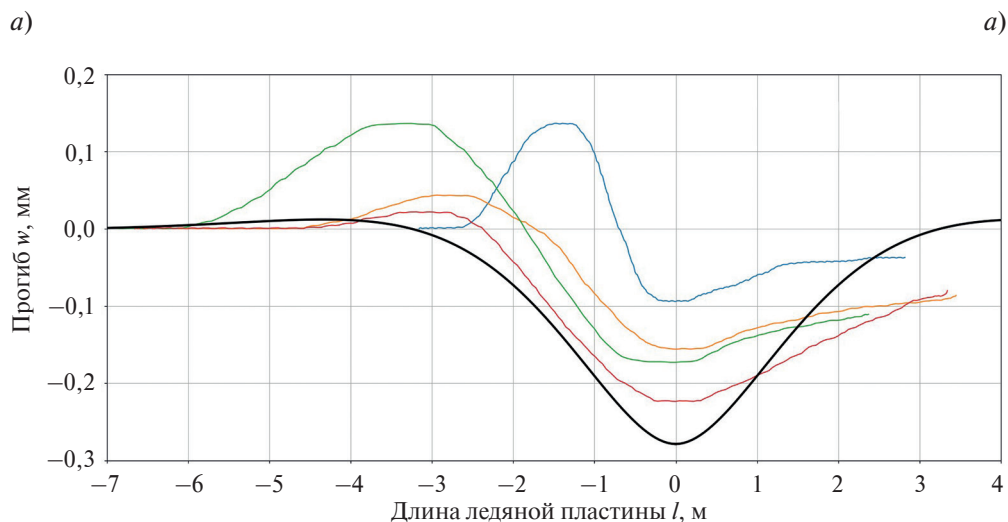
где H — глубина водоёма.

Для реализации этого эффекта был использован прием намораживания «второго дна». В бассейне сливалась вода на 0,3 м ниже стандартного уровня и производилось намораживание слоя льда толщиной 50 мм. После этого поверх льда наливалась вода до стандартного уровня. Таким образом, получался мелководный бассейн ($H = 0,3$ м), резонансная скорость в котором не превосходила 1,7 м/с. В дальнейшем на стандартном уровне намораживался ледяной слой толщиной 25 мм, по которому в дальнейшем производилось перемещение нагрузки.

После окончания процесса намораживания ледяное поле отпиливалось от бортов вдоль бассейна (исключая торцы) так, чтобы добиться свободного вертикального перемещения берегов кромок относительно стенок бассейна. Таким образом, реализовывался случай цилиндрического изгиба ледяной пластины под перемещающейся нагрузкой, т.е. распространение плоской изгибно-гравитационной волны на мелководье. После подготовки ледяного поля и закрепления датчиков на своих местах на лёд устанавливался макет с заранее определённой массой, который буксировался по нему с определённой скоростью (рис. 1, б). Вблизи торцов бассейна пропилены на 1,5 м не доводились до конца, полученный участок использовался в качестве разгонного, что вкупе с разгонными грузами позволяло добиться стационарности процесса на измерительном участке.

В опытах производилось варьирование следующих факторов: изменение скорости перемещения; изменение массы движущейся нагрузки, изменение толщины льда. Регистрировались следующие параметры: скорость движения нагрузки, получаемая с помощью штатной системы измерения скорости буксировочной системы (фотоимпульсный датчик, аналого-цифровой преобразователь), прогиб льда, записываемый во времени с помощью линейного датчика перемещения реостатного типа, установленного по середине длины бассейна.

В каждом опыте записывалась форма волны, которая вместе с нагрузкой перемещалась мимо датчика. При постоянной скорости движения нагрузки связь между временем течения процесса и линейной координатой положения текущего прогиба относительно датчика перемещений была однозначной. Полученные профили при разных нагрузках приведены на рис. 2.



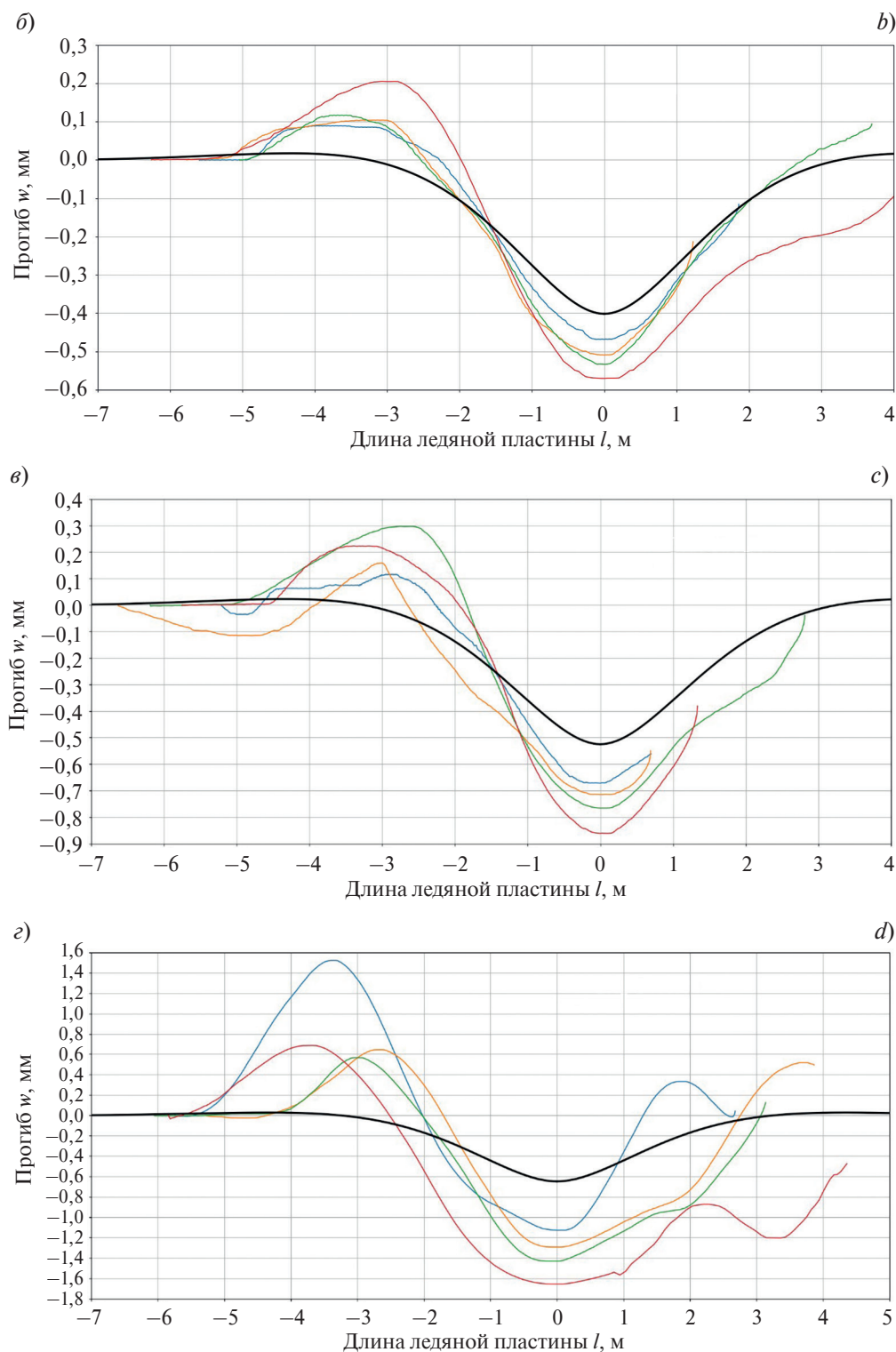


Рис. 2. Профили волн в ледяном покрове при движении нагрузки массой: *a* — 11,32 кг: — статический профиль; — скорость 0,9 м/с; — скорость 1,38 м/с; — скорость 0,72 м/с; — скорость 0,15 м/с; *b* — 16,32 кг: — статический профиль; — скорость 1,00 м/с; — скорость 0,53 м/с; — скорость 0,30 м/с; — скорость 0,25 м/с; *c* — 21,32 кг: — статический профиль; — скорость 0,5 м/с; — скорость 0,88 м/с; — скорость 0,42 м/с; — скорость 0,22 м/с; *d* — 27,32 кг: — статический профиль; — скорость 1,65 м/с; — скорость 0,8 м/с; — скорость 0,71 м/с; — скорость 0,45 м/с

Fig. 2. Profiles of waves in ice cover during the movement of a load weighing: *a* — 11.32 kg: — static profile; — speed 0.9 m/sec.; — speed 1.38 m/sec.; — speed 0.72 m/sec.; — speed 0.15 m/sec.; *b* — 16.32 kg: — static profile; — speed 1.00 m/sec.; — speed 0.53 m/sec.; — speed 0.30 m/sec.; — speed 0.25 m/sec.; *c* — 21.32 kg: — static profile; — speed 0.5 m/sec.; — speed 0.88 m/sec.; — speed 0.42 m/sec.; — speed 0.22 m/sec.; *d* — 27.32 kg: — static profile; — speed 1.65 m/sec.; — speed 0.8 m/sec.; — speed 0.71 m/sec.; — speed 0.45 m/sec.

4. Обсуждение результатов эксперимента

Для получения качественных характеристик процесса деформации ледяной пластины при движении по ней нагрузки полученные результаты сравнивались со статическими, рассчитанными теоретически для условий, совпадающих с условиями эксперимента. Ледовое поле рассматривалось как бесконечная в длину пластина, покоящаяся на упругом основании Винклера, испытывающая цилиндрический изгиб. Задача такого типа может быть сведена к решению уравнения балки-полоски на упругом основании, нагруженной сосредоточенной силой. Выражение для прогибов правой половины балки [24] было преобразовано для случая балки-полоски по рекомендациям [25] и записано для обеих половин:

$$w = -\frac{P}{b_i} \frac{\alpha}{2k} e^{-\alpha|x|} [\cos(\alpha|x|) + \sin(\alpha|x|)], \quad (23)$$

где x — координата балки; w — прогибы балки-полоски; $\frac{P}{b_i}$ — приложенное к балке-полоске усилие; P — сила тяжести, создаваемая нагрузкой; $b_i = 1,5$ м — ширина ледового поля; $k = \rho_w g = 9810$ Н/м³ — коэффициент упругого основания; $\alpha = \sqrt[4]{\frac{k}{4D}} = 0,726$ м⁻¹ — параметр балки и упругого основания; $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} = 8834$ Н·м —

цилиндрическая жёсткость пластины (получено для толщины льда $h_i = 0,025$ м); $E = 6 \times 10^9$ Па — модуль упругости льда [18]; $\mu = 0,34$ — коэффициент Пуассона для льда [18]. Результаты расчёта приведены на рис. 3, также эти кривые отмечены на графиках профилей волн изгиба льда жирными линиями (рис. 2).

Анализ результатов эксперимента (рис. 2) позволил получить взаимосвязи между длиной волны, формой чаши прогибов, массой груза и скоростью при постоянных толщине льда и глубине водоёма (рис. 4). Эти же величины также были получены при анализе теоретических графиков статических прогибов (рис. 3) и нанесены на экспериментальные (рис. 4) при нулевой скорости движения нагрузки. В тех случаях, когда в эксперименте не удалось произвести полную запись чаши прогибов, полученные значения экстраполировались до точки пересечения с уровнем спокойного состояния (отметка 0 на оси ординат графиков рис. 2). Анализ полученных зависимостей показал, что при малых скоростях движения становится заметным увеличение прогибов льда в сравнении со статикой практически во всех случаях, кроме 11,32 кг, при этом чем больше нагрузка, тем значительнее эта разница (рис. 5). Изменение площади впадины при начале движения нагрузки в сравнении со статикой, как правило, незначительно. Отношение площади впадины к площади горба перед нагрузкой резко уменьшаются при переходе от статики к движению, но уже при достижении скорости в 20–30 % от резонансной не претерпевают значительных изменений. Удалось выявить качественное различие формы

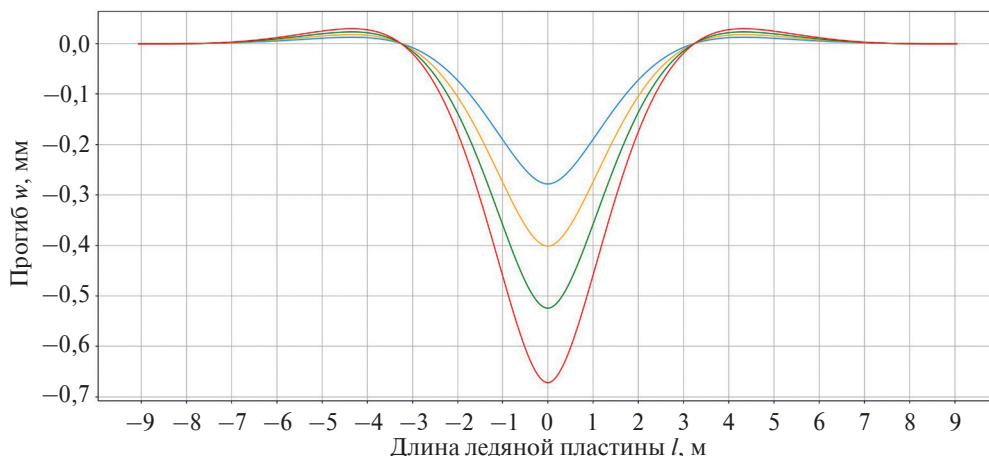


Рис. 3. Результаты расчёта статического цилиндрического изгиба ледяной пластины:

— 27,32 кг; — 21,32 кг; — 16,32 кг; — 11,32 кг

Fig. 3. The results of calculation of static cylindrical ice plate bending:

— 27.32 kg; — 21.32 kg; — 16.32 kg; — 11.32 kg

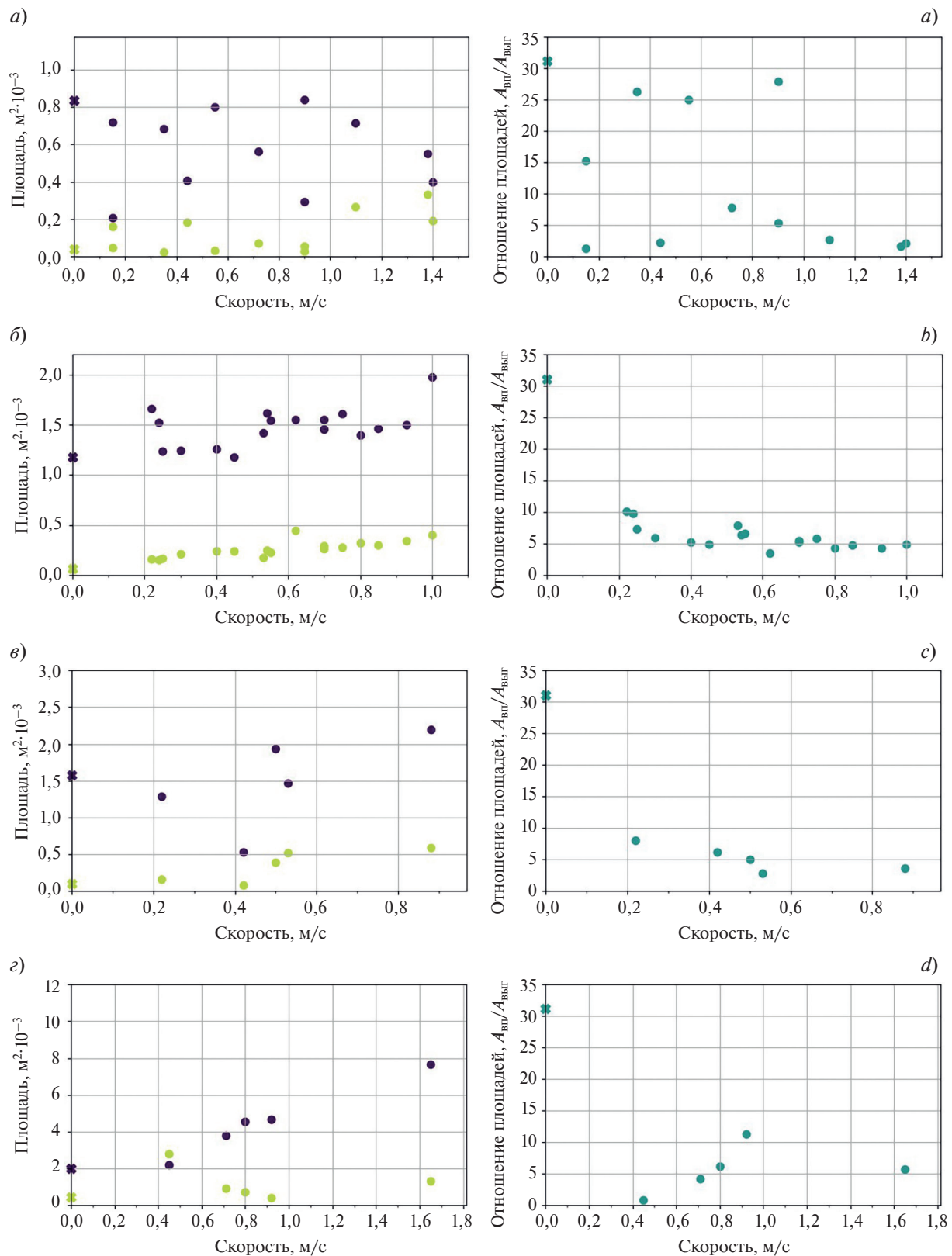


Рис. 4. Характеристики формы профиля волны для случая движения нагрузки массой: а — 11,32 кг; б — 16,32 кг; в — 21,32 кг; г — 27,32 кг; обозначения: ● — площадь выгиба $A_{\text{выг}}$; ● — площадь впадины $A_{\text{вп}}$; ● — отношение площадей $A_{\text{вп}}/A_{\text{выг}}$

Fig. 4. Characteristics of a wave profile shape for a case of a moving load weighing: а — 11.32 kg; б — 16.32 kg; в — 21.32 kg; г — 27.32 kg; legend: ● — area of outward bending A_{out} ; ● — area of the trough A_{tr} ; ● — area ratios $A_{\text{tr}}/A_{\text{out}}$

чаши прогиба от скорости движения нагрузки. При относительно малой скорости (в районе 20–30 % резонансной) форма чаши прогибов не претерпевала значительных искажений, но в отличие от статики в передней части чаши (с той стороны, в которую движется нагрузка) возникал сильный выгиб льда вверх от нулевого уровня. Высота этого выгиба составляла 20–30 % от максимального прогиба в районе приложения нагрузки, а длина выгиба была в пределах 25–30 % от длины чаши прогиба.

Выявлена устойчивая тенденция к увеличению площади этого выгиба с увеличением скорости движения нагрузки для массы груза 11,32 кг, 16,32 кг и 21,32 кг, в случае 27,32 кг площадь выгиба уменьшалась, однако, после преодоления минимума также начинала расти.

Отношение площади чаши прогибов к площади выгиба перед нагрузкой может служить мерой энергетических затрат на деформацию ледяного покрова: чем меньше этот показатель, тем больше затраты. Для каждого варианта массы нагрузки также были составлены графики изменения этого показателя в зависимости от скорости движения (рис. 4). Выявлена тенденция к его уменьшению с ростом скорости, при этом, наиболее сильное уменьшение показателя происходит на малых скоростях движения нагрузки (до 20–30 % резонансной скорости), начиная от расчётного статического случая. Очевидно, что наибольший вклад в изменение этого показателя вносит изменение площади выгиба льда перед нагрузкой.

Форма чаши в тыльной части не была симметрична передней части, симметрия наблюдалась только в некоторых опытах. Очевидно наличие взаимосвязи между изменением формы изгиба ледяной пластины и максимальным прогибом с увеличением скорости движения нагрузки (что совпадает с известными натурными экспериментальными данными [8]). Этот эффект наиболее заметен при малых скоростях движения нагрузки — до 20–30 % от резонансной скорости.

Запись прогибов во времени и фиксация скорости движения нагрузки позволила ориентировочно оценить длину перемещающейся вместе с нагрузкой чаши прогибов, которая была примерно равна длине волны цилиндрического изгиба льда — 6–7 м. Так как датчик прогиба записывал прогибы примерно в середине бассейна, на расстоянии 9 м от задней стенки бассейна, было очевидно, что на профиль начальной волны накладывалась отраженная волна. Поэтому при высоких скоростях движения нагрузки чаша прогибов не отличалась симметричностью. Особенно это было заметно при скоростях движения от 0,7 резонансной скорости до равной резонансной. Характерной особенностью изменения формы чаши стало появление внутри контура прогибов подобного полученному на малых скоростях ряда коротких волн — до четырех волн длиной 0,2 от основной чаши и высотой 0,2 от максимального прогиба. Испытания на скорости близкой к резонансной подтвердило наблюдаемое в натуре явление — резкий подъем волны над нулевым уровнем за чашей прогибов движущейся нагрузки. Профиль этой волны в каждом опыте получался новой

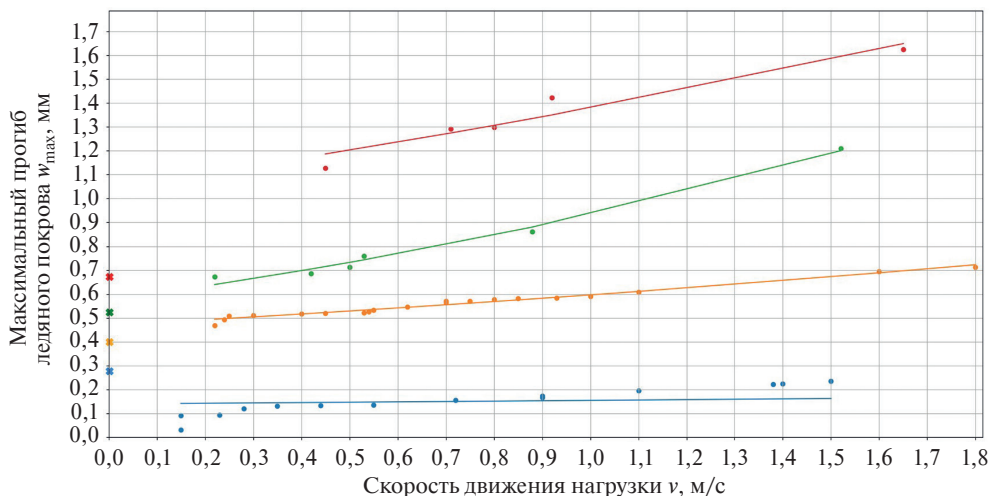


Рис. 5. Зависимость максимального прогиба льда от массы и скорости движения нагрузки:
● 27,32 кг, $w_{\max} = 1,059e^{0,264v}$; ● 21,32 кг, $w_{\max} = 0,589e^{0,452v}$; ● 16,32 кг, $w_{\max} = 0,521e^{0,100v}$; ● 11,32 кг, $w_{\max} = 0,140e^{0,100v}$

Fig. 5. Dependence of maximum ice deflection on weight and speed of load movement: ● 27.32 kg, $w_{\max} = 1.059e^{0.264v}$; ● 21.32 kg, $w_{\max} = 0.589e^{0.452v}$; ● 16.32 kg, $w_{\max} = 0.521e^{0.100v}$; ● 11.32 kg, $w_{\max} = 0.140e^{0.100v}$

формы, повторяемость отсутствовала. Очевидно, такой эффект был обусловлен отражением изгибно-гравитационной волны от торцевой стенки бассейна, возникающим достаточно произвольным образом.

Анализ экспериментальных зависимостей величин прогибов от величины нагрузки и скорости показал слабую зависимость максимального прогиба от скорости движения при скоростях свыше 20–30 % от резонансной. Особенно это мало заметно при небольшой массе движущейся нагрузки (рис. 5). В пределах статистической погрешности зависимость от скорости вплоть до резонансной отсутствует при массе нагрузки 11 и 16 кг. При массе 21 кг зависимость становится заметной и прогиб возрастает в 1,5 раза при резонансной скорости по сравнению с прогибом, возникающим при скорости 0,1 от резонансной. Наибольший эффект наблюдается, когда перемещается груз массой 27 кг. Прогиб возрастает в 2 раза на резонансе по сравнению с прогибом на малой скорости. Это совпадает с данными В.М. Козина, где также отмечается существенная зависимость резонансного прогиба от массы движущейся нагрузки [7].

5. Выводы

Показана возможность моделирования динамических явлений в ледяном покрове при движении по нему нагрузки в ледовых опытовых бассейнах с естественным охлаждением классической формы. Получен эффект выгиба поверхности льда перед перемещающейся чашей прогибов, что может послужить одним из показателей адекватности при разработки теоретических моделей и их разрешении. Выявлено увеличение чаши прогибов ледяного покрова с увеличением скорости движения нагрузки (на малых скоростях до 30 % от резонансной скорости) в сравнении со статическим случаем нагружения, рассчитанным теоретически. Показана связь уменьшения отношения площади профиля чаши прогибов к профилю выгиба льда перед движущейся нагрузкой с увеличением скорости. Этот факт указывает на теоретическую возможность резкого роста энергетических затрат на разрушение льда при увеличении скорости движения ледоразрушающего средства, когда взаимодействие со льдом уже нельзя рассматривать как квазистатическое. Более подробное изучение этого эффекта требует проведение дополнительных экспериментальных исследований при скорости движения нагрузки до 30 % от резонансной. Приведённая схема эксперимента может быть примером тестового опыта для проверки адекватности физической модели ледяного покрова в задачах динамической постановки.

6. Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ГФЕН Китая в рамках научного проекта № 20–58–53049 и при поддержке гранта Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ РФ НШ-70.2022.1.5.

Литература

1. Грамузов Е.М., Тихонова Н.Е. Обоснование проектных характеристик речных ледоколов // Труды НГТУ им. ПЕ Алексеева. Н. Новгород, 2013. № 3 (100). С. 195–199.
2. Тихонова Н.Е. Оптимизация основных элементов и формы корпуса ледокола в зависимости от ледовых условий // Труды НГТУ им. ПЕ Алексеева. Н. Новгород, 2014. № 5 (107). С. 302–308.
3. Dvoichenko Y.A., Semenova N.M. The influence of the area size and the method of transverse load application to the ice cover surface on the ice failure efficiency // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2021. Vol. 1079, N 7. P. 072020.
4. Хейсин Д.Е. Динамика ледяного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1967. 215 с.
5. Черкесов Л.В. Поверхностные и внутренние волны. Киев: Наукова думка, 1973. 247 с.
6. Squire V.A., Hosking R.J., Kerr A.D., Langhorne P.J. Moving Loads on Ice Plates. Springer Science & Business Media, 1996. Vol. 45. 244 p.
7. Козин В.М. и др. Прикладные задачи динамики ледяного покрова. М.: Академия естествознания, 2008. 329 с.
8. Иванов К.Е., Песчанский И.С. Грузоподъемность ледяного покрова и устройство дорог на льду. Ленинград: Главсевморпуть, 1949. 181 с. (Труды Арктического научно-исследовательского института Главного управления Северного Морского пути при Совете министров СССР; Т. 23).
9. Nevel D.E. Moving loads on at floating ice sheet. Research report (Cold Regions Research and Engineering Laboratory (U.S)). 1968. Vol. 261. 13 p.
10. Зуев В.А., Лу Ян, Двойченко Ю.А., Себин А.С. Подходы к оценке разрушения ледяного покрова при движении над ним нагрузки с малой скоростью // Транспортные системы. Н. Новгород, 2020. № 3 (17). С. 41–47.

11. Жесткая В.Д. Численное решение задачи о движении нагрузки по ледяному покрову // Прикладная механика и техническая физика. 1999. Т. 40, № 4. С. 243–248.
12. Козин В. М., Погорелова А.В. Влияние вязкостных свойств льда на прогиб ледового покрова при движении по нему нагрузки // Прикладная механика и техническая физика. 2009. Т. 50, № 3. С. 147–157.
13. Reddy J.N. Theory and analysis of elastic plates and shells. CRC press, 2006. 547 p.
14. Ландау Л.Д., Лифшиц Л.Д. Теоретическая физика. Том VI. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 736 с.
15. Эпштейн Л.А. Методы теории размерностей и подобия в задачах гидромеханики судов. Л.: Судостроение, 1970. 208 с.
16. Каשתелян В.И., Позняк И.И., Рывлин А.Я. Сопротивление льда движению судна. Л.: Судостроение, 1968. 238 с.
17. Грамузов Е.М., Двойченко Ю.А., Зув В.А., Себин А.С. Моделирование ледяного покрова при прогнозировании взаимодействия судов и морских сооружений со льдом // Известия Российской академии наук. Механика твёрдого тела. 2021. № 2. С. 51–62. doi:10.31857/S0572329921020094
18. Ионов Б.П., Грамузов Е.М. Ледовая ходкость судов. 2 издание. СПб.: Судостроение, 2013. 504 с.
19. Двойченко Ю.А. Себин А.С., Зув В.А. К вопросу о моделировании ледяного покрова с использованием композитной модели льда // Труды Крыловского государственного научного центра. 2019. № S2. С. 59–62. doi:10.24937/2542-2324-2019-2-S-I-59-62
20. Sebin A.S., Dvoichenko Y.A. The New Areas of the Ice Cover Modeling Using the Composite Model Ice “GP-ice” // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1079, N 7. P. 072017.
21. Зув В.А., Рабинович М.Е., Грамузов Е.М., Двойченко Ю.А. К вопросу о моделировании движения судна в сплошном ледяном поле // Теория и прочность ледокольного корабля: межвуз. сб. Горький, 1978. С. 22–25.
22. Зув В.А. Средства продления навигации на внутренних водных путях. Л.: Судостроение, 1986. 207 с.
23. Zuev V.A., Gramuzov E.M., Dvoichenko Y.A., Sebin A.S. The Experimental and Theoretical Investigations of the “GP-ice” Use in Ships Model Tests // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2020. Vol. 459, N 4. P. 042071.
24. Давыдов В.В., Маттес Н.В., Сиверцев И.Н. Учебный справочник по прочности судов внутреннего плавания. М.: Речной транспорт, 1958. 755 с.
25. Папкович П.Ф. Труды по строительной механике корабля. В 4 т. Т. 3. Сложный изгиб стержней и изгиб пластин. Л.: Судпромгиз, 1962. 527 с.

References

1. Gramuzov E.M., Tikhonova N.E. Justification of design characteristics of river icebreakers. *Transactions of the NNSTU n.a. R.E. Alekseev*. 2013, 3 (100), 195–199 (In Russian).
2. Tikhonova N.E. Optimizing of the basic elements and shell architecture of an icebreaker depending on the ice conditions. *Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*. 2014, 5 (107), 302–308 (In Russian).
3. Dvoichenko Y.A., Semenova N.M. The influence of the area size and the method of transverse load application to the ice cover surface on the ice failure efficiency. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021, 1079, 7, 072020.
4. Hejsin D.E. Ice cover dynamics. *Leningrad, Gidrometeoizdat*, 1967. 215 p. (In Russian).
5. Cherkasov L.V. Surface and Internal Waves. *Kiev, Naukova Dumka*, 1973. 247 p.
6. Squire V.A., Hosking R.J., Kerr A.D., Langhorne P.J. Moving loads on ice plates. *Berlin, Springer Science & Business Media*, 1996, 45. 244 p.
7. Kozin V.M., Zhestkaya V.D., Pogorelova A.V., Chizhiumov S.D., Lzhabrailov M.P., Morozov V.S., Kustov A.N. Applied problems of ice cover dynamics. *Moscow, Akademiya Estestvoznaniya*, 2008. 329 p. (In Russian).
8. Ivanov K.E. Load capacity of the ice cover and the construction of roads on the ice. *Leningrad, Glavsevmorput*, 1949. 182 p. (In Russian).
9. Nevel D.E. Moving loads on at floating ice sheet. Research report (Cold Regions Research and Engineering Laboratory (U.S)), 1968, 261. 13 p.
10. Zuev V.A., Lu Yang, Dvoychenko Yu.A., Sebin A.S. Approaches to estimating the ice cover crushing during load moving above it with a low speed. *Transportnye Sistemy*. 2020, 3 (17), 41–47 (In Russian).
11. Zhestkaya V.D. Numerical solution of the problem of the load movement on the ice cover. *Prikladnaya Mekhanika i Technicheskaya Fizika*. 1999, 40, 4, 243–248 (In Russian).
12. Kozin V.M., Pogorelova A.V. Effect of the viscosity properties of ICE on the deflection of an ICE sheet subjected to a moving load. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2009, 50, 3, 484–492.
13. Reddy J.N. Theory and analysis of elastic plates and shells. *CRC press*, 2006. 547 p.
14. Landau L.D., Lifshicz L.D. Theoretical physics. Volume VI. Hydrodynamics. *Moscow, Nauka*, 1986. 736 p. (In Russian).

15. Epstein L.A. Methods of the dimensions and similarity theory in problems of ship hydromechanics. *Leningrad, Sudostroeniye*, 1970. 208 p. (In Russian).
16. Kashtelyan V.I., Poznyak I.I., Ryvlin A.Y. Ice resistance to ship movement. *Leningrad, Sudostroeniye*, 1968. 238 p. (In Russian).
17. Gramuzov E.M., Dvoichenko Yu.A., Zuev V.A., Sebin A.S. Ice cover modeling in predicting the interaction of ships and offshore structures with ice. *Mechanics of Solids*. 2021, 56, 2, 179–188. doi: 10.3103/S0025654421020084
18. Ionov B.P., Gramuzov E.M. Ice propulsion of ships. 2nd edition. *St. Petersburg, Sudostroeniye*, 2013. 504 p. (In Russian).
19. Dvoichenko Yu.A., Zuev V.A., Sebin A.S. On application of composite ice model in ice sheet simulation. *Transactions of the Krylov State Research Center*. 2019, S2, 59–62. doi:10.24937/2542–2324–2019–2-S-I-59–62
20. Sebin A.S., Dvoichenko Y.A. The new areas of the ice cover modeling using the composite model ice “GP-ice”. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021, 1079, 7, 072017.
21. Zuev V.A., Rabinovich M.E., Gramuzov E.M., Dvoichenko Yu.A. On modeling of the ship movement in level ice field. *Teoriya i Prochnost' Ledokol'nogo Korablya: mezhvuz. sb. Gorky*, 1978, 22–25 (In Russian).
22. Zuev V.A. Means of prolonging navigation on inland waterways. *Leningrad, Sudostroeniye*, 1986. 207 p. (In Russian).
23. Zuev V.A., Gramuzov E.M., Dvoichenko Y.A., Sebin A.S. The experimental and theoretical investigations of the “GP-ice” Use in Ships Model Tests. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020, 459, 4, 042071.
24. Davydov V.V., Mattes N.V., Sivercev I.N. Study guide on the strength of inland navigation vessels. *Moscow, Rechnoj Transport*, 1958. 755 p. (In Russian).
25. Papkovich P.F. Works on the construction mechanics of the ship. In 4 volumes. Vol. 3. Complex bending of rods and plates. *Leningrad, Sudpromgiz*, 1962. 527 p. (In Russian).