

УДК 624.124.791

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СУДОВ И МОРСКИХ СООРУЖЕНИЙ СО ЛЬДОМ

© 2021 г. Е. М. Грамузов<sup>а</sup>, Ю. А. Двойченко<sup>а</sup>, В. А. Зуев<sup>а</sup>, А. С. Себин<sup>а,\*</sup>

<sup>а</sup> Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
Нижегород, Россия

\*e-mail: asebin@nntu.ru

Поступила в редакцию 04.09.2019 г.

После доработки 15.09.2019 г.

Принята к публикации 18.09.2019 г.

Рассмотрены подходы к физическому моделированию льда как материала и ледяного покрова как специфического природного объекта при модельных испытаниях судов и морских инженерных сооружений в ледовых бассейнах. Выполнен анализ способов получения моделей льда частично удовлетворяющих условиям теории подобия. Показаны новые способы моделирования и получения ледяного покрова более полно удовлетворяющих методам теории моделирования.

*Ключевые слова:* ледовые опытовые бассейны, модели ледяного покрова, испытания моделей судов, теория подобия, анализ, физическое моделирование

DOI: 10.31857/S0572329921020094

**1. Введение.** Сложность процессов взаимодействия судов и сооружений со льдом не всегда позволяет составить достоверную математическую модель такого взаимодействия. Поэтому получение данных о ледовых качествах судов еще при проектировании приводит к необходимости обращаться к экспериментальным методам исследования на моделях. Сейчас в мире насчитывается более 15 работающих ледовых бассейнов, в которых проводятся испытания судов в сплошных, битых, торосистых льдах, моделируется работа буровых установок и мостовых опор в ледовых условиях с целью прогнозирования силового воздействия льда на суда и морские сооружения, исследуется работа различных устройств и систем, повышающих эффективность проведения операций во льдах.

Основной проблемой моделирования ледового сопротивления является создание физической модели льда, адекватно отображающей его взаимодействие с судами и сооружениями в натуральных условиях.

Теоретические обоснования моделирования движения судов во льдах, разработаны в середине прошлого века Ю.А. Шиманским и Л.М. Ногидом (г. Санкт-Петербург) [1, 2]. Согласно этой теории, основными критериями подобия являются:

$$\rho_n^i = \rho_m^i, \quad \rho_n^w = \rho_m^w, \quad \mu_n = \mu_m, \quad f_n = f_m, \quad \frac{h_n}{h_m} = \lambda, \quad E_m = \frac{E_n}{\lambda} \quad (1.1)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_n}{\lambda}, \quad \frac{E}{\sigma} = \text{const}, \quad Fr = \text{const}, \quad Re = \text{const}, \quad Ch = \text{const}$$

где  $\rho_n^i, \rho_m^i$  – плотность натурального и модельного льда;  $\rho_n^w, \rho_m^w$  – плотность воды природы и модели;  $E, \mu$  – модуль упругости и коэффициент Пуассона для льда;  $\sigma_m, \sigma_n$  – разрушающие лед нормальные напряжения;  $f_n, f_m$  – коэффициенты трения льда о корпус для природы и модели;  $\lambda$  – геометрический масштаб моделирования;  $h_n, h_m$  – толщина натурального и модельного ледяного покрова;  $Fr = v/\sqrt{gL}$  – число Фруда;  $Re = vL/\nu$  – число Рейнольдса;  $Ch = \rho v^2/E$  – число Коши;  $v_n, v_m$  – скорости движения природы и модели;  $\nu_n, \nu_m$  – кинематический коэффициент вязкости жидкости природы и модели.

К этим критериям также иногда добавляют критерий А.С. Аткинса [3], учитывающий трещинообразование в ледяном покрове.

$$Yn = Ch^2 \left( \frac{El}{k} \right)^{1/2} \quad (1.2)$$

где  $Yn$  – ледовое число;  $l$  – характерная длина дефектов кристаллической решетки;  $k$  – вязкость разрушения.

Полное сопротивление среды при движении судна во льдах  $R$  обычно представляет в виде:

$$R = R_d + R_{rub} + R_w \quad (1.3)$$

где  $R_d$  – сопротивление разрушения льда и трения его о корпус;  $R_{rub}$  – сопротивление обломков;  $R_w$  – сопротивление воды.

Различная природа сил, составляющих ледовое сопротивление, подчиняющихся разным законам, требует при моделировании одновременного выполнения перечисленных критериев подобия (формула (1.1)). Этого, как правило, достичь не удастся, и обычно речь идет лишь о частичном подобии.

В этой статье выполнен анализ существующего опыта, а также приведены новые подходы к физическому моделированию льда как материала и ледяного покрова как специфического природного объекта в задачах оценки воздействия льда на суда и морские инженерные сооружения.

**2. Анализ накопленного опыта моделирования ледяного покрова.** Казалось бы, материалом для имитации ледовых условий мог бы стать тонкий естественный лед, но его повышенная прочность по сравнению с требуемой теорией моделирования при сохранении геометрического подобия по толщине ( $h_m = h_n/\lambda$ ) делает его малопригодным для испытаний. В соответствии с условиями (1.1) необходимо, чтобы прочность и упругость модели льда были в масштаб раз меньше, чем у природы при сохранении постоянного отношения  $E/\sigma$ . При таком подходе модельный лед становится более пластичным, чем упругим телом, что при его разрушении приводит к несоответствию геометрии образования трещин с натурными условиями и, как следствие, к нарушению динамического подобия.

Поэтому во всем мире ведутся поиски новых моделей льда как в отношении материала, его имитирующего, так и в отношении управления его характеристиками.

К настоящему времени в мировой практике накоплен широкий опыт моделирования льда, а также создано большое количество различных видов лабораторного льда.

Первая методика ледового модельного эксперимента была разработана в ААНИИ при участии Ю.А. Шиманского, Л.М. Ногида, И.И. Позняка, В.И. Каштеляна и использовалась в первом ледовом бассейне при исследовании ходкости судов в ровных однородных сплошных льдах [1]. Ее основу составляло предположение, что силы сопротивления, не зависящие от скорости движения (прямое сопротивление), можно строго моделировать по условию Фруда, а разрушение ровного однородного сплошного льда корпусом ледокола происходит главным образом под действием изгибных

напряжений. Поэтому в качестве главного параметра, характеризующего физическую модель льда, была выбрана прочность льда на изгиб, измеренная при разрушении плавающей балки-полоски.

Однако такой метод проверки адекватности модельного льда до сих пор является основным в российских и зарубежных ледовых бассейнах.

Для обеспечения в модельном эксперименте соответствующих характеристик движения эталонной модели Лавров разработал особую методику, основанную на известном тогда свойстве льда уменьшать прочность с ростом содержания соли [4]. Суть ее заключается в том, что в воде растворяется поваренная соль до концентрации 7%. При замораживании водного раствора концентрированный солевой рассол не замерзает, а скапливается между кристаллами льда, уменьшая тем самым прочность ледяного покрова. Такая модель льда получила название «лабораторный лед Лаврова (“NaCl-ice”)). Однако, полученный таким образом моделированный лед обладает повышенной пластичностью. Из-за этого не выполняется одно из главных условий моделирования – равенство отношения предела прочности к модулю упругости у натурального и у модельного льда ( $(E/\sigma)_n = (E/\sigma)_m$ ). Это не позволяет непосредственно моделировать силы разрушения при движении ледокола.

Пересчет результатов опытов в лабораторном льду на натуру производится с помощью поправочных коэффициентов, определяемых эмпирическим путем с помощью прогона модели эталонного ледокола с известными натурными данными.

Главным недостатком модели Лаврова является невыполнение условия моделирования, заключающегося в отношении предела прочности к модулю упругости натурального и модельного ледяного покрова, что приводит к несовпадению феноменологической картины разрушения натурального ледяного покрова и модельного льда. Это не позволяет получить в опытах силы, которые в соответствии с законом моделирования Ньютона были бы в куб масштаба раз меньше натуральных. Поэтому последующие исследования были направлены на поиск новых критериев моделирования, позволяющих наиболее достоверно отражать взаимодействия корпуса судна с ледовыми образованиями, используя модель соленого льда Лаврова.

Исследования, направленные на поиск нового критерия моделирования, привели Е. Энквеста в 70-х годах прошлого века к осознанию важности критерия Коши при моделировании процесса разрушения ледяного покрова. Однако, предложенная им методика моделирования льда для бассейна WARC (сейчас Aker Arctic) [5] оказалась не очень удачной. Исследования показали, что для выполнения условия Коши необходимо использовать в модельном эксперименте лабораторный лед, динамический коэффициент трения которого о корпус модели в 2.0–2.5 раза больше натурального значения, что достигалось путем нанесения на корпус модели судна соответствующих покрытий. Подобная вариация не устраняла недостатки модели ААНИИ, но вносила дополнительную условность в проведение экспериментов.

Следующим важным этапом стал предложенный И. Шварцем новый метод и новая модель лабораторного льда [6]. Он предложил использовать при моделировании в качестве базовой характеристики льда отношение модуля упругости к пределу прочности на изгиб, что должно было обеспечить совместное выполнение критериев Фруда и Коши. Значение этого соотношения проверялось в ходе эксперимента по облому консольной балки-полоски на плаву. Этот метод получил очень широкое распространение в ледовых опытовых бассейнах. Почти все дальнейшие исследования были направлены на подбор такого материала для модели льда, который наиболее бы полно соответствовал критериям подобия метода Шварца. Однако, этот метод не позволяет достигнуть полного моделирования сил, связанных с взаимодействием тел со льдом, не позволяет уверенно предсказывать ледовое сопротивление движению судов и ледовые нагрузки на платформы. Причины этого разобраны далее при изложении опыта, полученного в этой области сотрудниками НГТУ им. Р.Е. Алексева. Тем не менее,

стоит отметить, что метод моделирования Шварца используется в настоящее время практически во всех опытовых бассейнах мира при создании новых образцов морской и речной ледотехники [7].

В гамбургском ледовом бассейне HSVA (Hamburg Ship Model Basin, Hamburg, Germany) под руководством И. Шварца были произведены специальные исследования лабораторного льда, полученного из раствора с низкой концентрацией NaCl (0.6‰) [8]. Эксперименты показали, что путем “подогрева” (“растепления”) моделированного льда непосредственно перед испытаниями (повышение температуры воздуха над поверхностью моделированного льда до 0°C за несколько часов до проведения эксперимента) можно существенно увеличить отношение модуля упругости к пределу прочности на изгиб.

Результаты этих исследований сильно повлияли на дальнейшее развитие ледового моделирования. Все бассейны, построенные после 1975 г. обладали системой «растепления», а также имели тенденцию к увеличению чаши бассейна. Однако, как показал последующий опыт, увеличение размеров бассейна не приводит к качественному улучшению и повышению надежности результатов, получаемых в модельном эксперименте. В настоящее время модельный лед Шварца используется при определении ледовых нагрузок в гамбургском ледовом бассейне HSVA [9], в большом ледовом бассейне КГНЦ (Крыловский государственный научный центр, Санкт-Петербург, Россия) и в большом ледовом бассейне ААНИИ (Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия) [7].

В 1980 г. в Канаде Г.В. Тимко после проведения серии опытов с растворами различных веществ в бассейне NRCC предложил использовать для получения модельного льда водный раствор карбамида (мочевина) [10, 11]. Однако, предложенная Тимко модель не смогла удовлетворить всем заявленным требованиям, а лишь частичное подобие свойств лабораторного и натурального льда не могло не сказаться на корректности моделирования силового взаимодействия инженерных сооружений с ледовыми образованиями [12]. Тем не менее, данная модель льда в настоящее время используется для экспериментов в ледовом опытовом бассейне IHR (Iowa Institute of Hydraulic Research, Iowa, USA), в ледовом опытовом бассейне CRREL (Cold Region Research and Engineering Laboratory, Hanover, USA), в ледовом бассейне инженерной лаборатории университета Тяньцзинь (Ice Engineering Laboratory of Tianjin University, China) [13–15].

В 1985 г. Г.В. Тимко, продолжая совершенствовать созданную им модель, опубликовал результаты исследований, где предложил использовать новый материал модели при использовании старой технологии приготовления лабораторного льда. Этот лед получил название EG/AD/S-ice. Для получения прослоек жидкой фазы в лабораторном льду использовался раствор, включающий три химических компонента: незамерзающее вещество – этиленгликоль (EG), алифатический детергент (AD) и сахар (S). Каждый компонент выполнял определенную роль в формировании характеристик льда. Однако, технология приготовления такого лабораторного льда для практического применения оказалась очень сложной, а предложенная Тимко модель даже в модернизированном виде не смогла достичь необходимого для практики подобия натуре. В настоящее время эта модель с применением дополнительных поправочных коэффициентов пересчета на натуру используется для предсказания ледовых нагрузок преимущественно канадскими и корейскими исследователями-ледотехниками: ледовый бассейн NRC-CHC (National Research Council – Canadian Hydraulics Centre, Ottawa, Canada), ледовый бассейн NRC-IOT (National Research Council – Institute for Ocean Technology, St. John's, Canada), ледовый опытовый бассейн MOERI (Marine and Ocean Engineering and Research Institute, Korea) [16–18].

К 1980-х годов был накоплен большой объем данных по трещиностойкости льда. Н. Урабе на основе законов механики хрупкого разрушения материалов сформулировал законы подобия, дополняющие законы подобия Фруда и Коши [19]. Анализ на-

турных данных по трещиностойкости льда показал, что критический коэффициент интенсивности напряжений льда зависит от абсолютной температуры, объема рассола и размеров кристаллов льда. Температуру и объем рассола моделированного льда нельзя изменять произвольно, поскольку ими определяется прочность льда на изгиб и модуль упругости, которые моделируются согласно указанным выше законам подобия. Для удовлетворения дополнительного критерия размеры кристаллов необходимо уменьшить не пропорционально масштабу модели, а по более сложной зависимости.

Технология получения моделированного льда с кристаллами заданных размеров еще не разработана, и в настоящее время нет оснований полагать, что удастся наморозить моделированный лед не только с кристаллами заданных размеров, но и с заданным распределением размеров кристаллов по толщине ледяного покрова. Эта модель не получила распространения в современных ледовых бассейнах, однако явилась первым опытом применения законов механики хрупкого разрушения в моделировании разрушения ледяного покрова.

Аткинс [3] сделал попытку учесть разрушения ледяного покрова, связанное с появлением трещин. Поэтому было предложено пересчитывать сопротивление вводя безразмерное число Аткинса, зависящее от коэффициента интенсивности напряжения.

В первой половине 80-х годов Э. Энквист и С. Мякинен в ледовом бассейне WARC (Aker Arctic) предложили новый тип лабораторного льда – тонкогранулированный лед (FG-ice) [20, 21]. Технология получения этого льда заключается в постоянном распылении над чашей бассейна солевого раствора в течение всего времени его приготовления. В результате образуется гранулированный лед, структура которого схожа с двухкомпонентным материалом лед-снег. Технология получения такого льда позволяет управлять физико-механическими свойствами лабораторного льда путем изменения концентрации распыляемого раствора и времени его распыления над поверхностью бассейна. Все исследования, проводимые после, заключались в применении технологии «распыления» к различным материалам, используемым в моделировании льда.

В 1988 г. по результатам исследований, проведенных в ледовом бассейне NKK под руководством С. Нарита, был разработан гранулированный структурированный лабораторный лед [22]. Технология приготовления этого льда схожа с технологией получения FG-ice. Принципиальная разница состоит в том, что новая модель получена путем распыления над чашей ледового бассейна раствора карбамида. В 1990 г. Э. Энквист и А. Нортала-Хойкканен [23, 24] в ледовом бассейне Aker Arctic (бывший WARC) разработали новый тип высокозернистого льда – FGX-ice. Этот лед является усовершенствованной модификацией FG-ice. Методика приготовления FGX-ice базируется на использовании техники ламинирования – создании слоев льда с различными свойствами. Лабораторный лед с заданными физико-механическими характеристиками получается за счет варьирования количеством компонентов (присадок) в распыляемом над поверхностью бассейна водном растворе. Однако, результаты испытаний моделей судов в этом лабораторном льду также не показали хорошей сходимости с натурными данными и также требовали применения специальных коэффициентов при пересчете на натуру. В настоящее время модель FGX-ice используется в ледовом бассейне Aker Arctic (бывш. WARC – Wartsila Arctic Research Center, Helsinki, Finland) [25].

Р. Ялонен и Л. Илвес из Технического университета Финляндии в 1990 г. разработали другую модель лабораторного льда – GE-ice [26]. Методика приготовления льда основана на распылении над чашей ледового бассейна мелких капель водного раствора этанола. Замерзая, капли выпадают на поверхность воды, образуя слой ледяного сала, которое является основой для дальнейшего роста льда. В настоящее время эта модель используется при исследовании ледовой ходкости и ледовых нагрузок преимущественно в опытовых бассейнах Финляндии: ледовый бассейн университета Аалто

(Aalto University) [27], ледовые бассейны университета Хельсинки – Arctic Offshore Research Center of Helsinki University of Technology [28, 29].

В 1990 г. Д.С. Спенсер и Г.В. Тимко представили новую концепцию приготовления замораживаемого лабораторного льда. Они разработали систему внедрения пузырьков воздуха в лабораторный лед во время его роста (CD-ice). Эта система позволяет управлять плотностью лабораторного льда в процессе его приготовления. Воздух внедряется в растущий слой льда с помощьюдвигающегося подводного устройства, которое проходит под нижней поверхностью льда и подает пузырьки воздуха в заданное время в заданном месте. Д.С. Спенсер и Г.В. Тимко установили, что добавление воздуха наряду с плотностью позволяет управлять и другими физико-механическими характеристиками лабораторного льда [30].

Выше приведен мировой опыт моделирования ледяного покрова кроме опыта коллектива сотрудников Нижегородского государственного технического университета (НГТУ) им. Р.Е. Алексеева. Эти данные позволяют сделать вывод, что использование (на данный момент) ледовыми опытными бассейнами той или иной модели лабораторного льда определяется не ее способностями наиболее точного моделирования разрушения естественного льда как специфического природного сооружения или практичностью и технологичностью использования, а историчностью возникновения в том или ином бассейне, научном центре. Также можно заметить, что последние наиболее существенные результаты в этой области были достигнуты Шварцем в 1975 году. Все последующие исследования были направлены на поиск такого материала лабораторного льда, который бы наиболее полно удовлетворял методу Шварца. Поиск каждого следующего материала модельного льда обуславливался существенными недостатками существующих материалов, однако с появлением новых ледовых опытовых бассейны не отказывались от старых материалов, а продолжали их активно использовать в исследовании ледового сопротивления новых образцов морской ледотехники. Это связано в первую очередь с тем, что ни один материал, используемый в настоящее время для моделирования разрушения ледяного покрова, не позволяет достичь хорошей сходимости результатов экспериментов с натурными данными, а модельные эксперименты требуют в каждом случае применения особых поправочных коэффициентов. Эти коэффициенты разрабатываются каждым бассейном отдельно на основе собственного опыта (как правило используется эталонная модель ледокола с известными натурными данными) и зависят не только от модели льда, но и от условий конкретного бассейна и даже отличаются от опыта к опыту [31].

В 1996 году ледовый комитет МКОБ (Международная конференция опытовых бассейнов) попытался собрать и обобщить опыт различных ледовых бассейнов в применении поправочных коэффициентов [32] и в 2002 году разработал рекомендации по проведению ледовых модельных экспериментов и определению ледового сопротивления [32–35]. Сущность вычисления поправочного коэффициента по методике МКОБ заключается в «подгонке» фактических толщины и прочности модельного льда на изгиб к требуемым значениям на основе проведения испытаний “эталонной” модели. Однако, определяющие составляющие этого коэффициента предлагается вычислять каждому экспериментатору эмпирически, на основе собственного опыта без строгих рекомендаций. Кроме того, этот коэффициент не учитывает разницу и особенности в использовании различных материалов лабораторного льда, а также не имеет достаточно адекватного физического обоснования и применим со всеми оговорками, строго говоря, только в достаточно частных случаях [31]. Причиной столь широкой трактовки формулы поправочного коэффициента служит большой разброс результатов модельных экспериментов, невозможность моделирования с достаточной для практики точностью с помощью существующих методов и материалов модельного льда.

В начале 1980-х годов появилось другое направление в теории и практике модельного эксперимента в ледовом бассейне, которое развивали сотрудники НГТУ им. Р.Е. Алексе-

ева (бывш. ГПИ им. Жданова) Б.П. Ионов, В.А. Зуев, Е.М. Грамузов, В.Б. Беляков, Ю.А. Двойченко, В.В. Князьков и др. Авторы полагали, что трудности, которые возникли на пути практической реализации метода И. Шварца (концепция сохранения отношения модуля упругости к пределу прочности на изгиб), имеют не методический, а принципиальный характер [36–38]. Так, предел прочности льда на изгиб далеко не полно описывает поведение льда под нагрузкой, поскольку лед после пролома еще долго сохраняет несущую способность за счет взаимодействия льдин по берегам сквозных трещин, представляя своеобразную конструкцию [39, 40]. Кроме того, попытка моделирования льда по безразмерному соотношению требует соблюдения в модельном эксперименте не только численного значения этого соотношения, но и моделирования абсолютных значений составляющих этого соотношения, что практически невозможно из-за существования масштабного эффекта [4].

**3. Моделирование с использованием естественного льда.** Поиски решения данной проблемы привели Зуева В.А., Грамузова Е.М. и др. к созданию метода, основанного на частичном подобии модельного льда натурному ледяному покрову [4, 38].

Он основан на преднамеренном соблюдении частичного подобия лишь картины разрушения ледяного покрова. Необходимым условием моделирования разрушения ледяного покрова было определено геометрическое подобие картин разрушения в плане, при выполнении которого число и расположение точек контакта льда с корпусом модели при движении соответствовало бы натуре. Подобие картин разрушения определяется подобием напряженно-деформированного состояния (НДС) пластин на упругом основании, для определения которого используется дифференциальное уравнение изгиба. В качестве материала лабораторного льда используется естественный пресноводный лед.

Подход к использованию в качестве модельной среды лабораторного пресноводного льда применялся и ранее Д. Вэнсом и О. Гримом в HSWA [41]. Однако, этот метод не нашел большого числа последователей по ряду объективных причин, связанных с отсутствием оборудования.

Тонкий лед имеет повышенную прочность [42] и, очевидно, именно поэтому получило широкое распространение мнение о невозможности его применения в качестве материала модели. Однако, при использовании такой модели льда компенсировать повышенную прочность ледяного покрова при разрушении изгибом можно меньшей толщиной, чем требуется в формуле (1.1).

Для определения дополнительных критериев подобия при проведении модельных испытаний в тонком естественном льду с сохранением геометрии образования обломков используется уравнение НДС ледяной пластины на упругом основании под действием поперечной нагрузки в безразмерном виде:

$$\frac{D}{\rho_w g L^4} \nabla^4 \bar{w} + \bar{w} = 0 \quad (3.1)$$

где  $\bar{w} = w/L$  – безразмерный прогиб;  $L$  – характерный линейный размер в плане;  $D = Eh^3/12(1 - \mu^2)$  – цилиндрическая жесткость ледяной пластины;  $E, \mu$  – модуль упругости и коэффициент Пуассона для льда;  $h$  – толщина ледяной пластины.

Из выражения (3.1) можно получить условие подобия НДС ледяного покрова натуре и модели:

$$\frac{D}{\rho_w g L^4} = idem \quad (3.2)$$

или, имея в виду, что  $\rho_n = \rho_m$  и  $g = \text{const}$ , получим:

$$\frac{D_n}{D_m} = \frac{L_n^4}{L_m^4} = \lambda^4 \quad (3.3)$$

где  $\lambda$  – геометрический масштаб моделирования.

Учитывая, что при моделировании должно выполняться условие  $\mu_n = \mu_m$ , получим:

$$\lambda_h = \frac{h_n}{h_m} = \lambda^{4/3} \lambda_E^{-1/3} \quad (3.4)$$

где  $\lambda_h, \lambda_E$  – масштабы толщины и модуля упругости льда.

Следует отметить, что анализ несущей способности, основанный на теории изгиба упругих пластин, позволяет получить лишь НДС ледяной пластины. Комплексные исследования сопротивления льда при движении ледоколов зависят не только от критических напряжений при изгибе, но и от прочности льда при срезе, смятии и др., возникающих одновременно. Однако, в работе [43] показано, что увеличение одних прочностных характеристик приводит к уменьшению других и наоборот. При этом, сопротивление льда при его разрушении ледоколом остается практически постоянным при его неизменной толщине.

К началу 1980-х годов нижегородскими учеными был накоплен достаточно большой объем данных по наблюдению за разрушением натурального ледяного покрова. Это позволило достаточно точно описать этот процесс [40]:

1) к ледяному покрову прикладывается вертикальная нагрузка, ледяной покров изгибается;

2) происходит образование первой группы радиальных трещин, частично нарушается сплошность ледяного покрова, но ледяные клинья от него не отделены;

3) происходит образование первой концентрической трещины, отсекающей ледяные клинья от основного ледяного покрова, сопротивление нагрузке сохраняется благодаря “арочному эффекту”, заменяющему изгибные напряжения на усилия распора по кромкам клиньев;

4) происходит дальнейшее развитие радиальных трещин и появление новых групп концентрических трещин;

5) далее лед сопротивляется возрастанию нагрузки, сохраняя несущую способность как конструкция; ледяные блоки, ограниченные трещинами, проворачиваются, их края сминаются, происходит образование внутренних трещин от внецентренного сжатия;

6) в результате смятия кромок и растрескивания одного из наиболее слабых блоков, он перестает сопротивляться сжатию и поддерживать соседние блоки – ледяная конструкция рассыпается, происходит пролом льда.

Предложенный метод моделирования ледяного покрова с использованием тонкого естественного льда в качестве материала модели позволяет достаточно надежно моделировать разрушение натурального льда. Однако использование такого подхода в задачах определения ледового сопротивления судов и ледовой нагрузки на инженерные сооружения сталкивается с определенными трудностями.

Данная методика основана на предположении о возможности моделирования прочности ледяного покрова с помощью пропорционального уменьшения толщины модельного льда. При этом толщина образующихся при разрушении льда обломков не соответствует требуемой для моделирования составляющей сопротивления, связанной с взаимодействием корпуса с обломками. Таким образом, совместное моделирование составляющих сопротивления льда от разрушения ( $R_d$ ) и движения в обломках ( $R_{rub}$ ) в этом способе невозможно. Наибольшее несоответствие сил сопротивления при моделировании возникает из-за сил плавучести и трения обломков о корпус, ли-



нейно зависящих от толщины льда. Инерционные составляющие, связанные с поворотом и раздвиганием льдин, а также с присоединенными массами воды, меньше зависят от толщины и площади льдин.

Поэтому для более строгого моделирования  $R_r$  и  $R_{rub}$  используется способ экспериментального разделения составляющих, требующий дополнительных испытаний в битом льду. Эти испытания могут быть и самостоятельными при определении сопротивления в битых льдах.

Большое разнообразие ледовых условий, нестабильность характеристик битых льдов делают достаточно сложным выполнение многочисленных условий, характеризующих натурную ледовую обстановку (в том числе форму и размеры отдельных льдин, их сплоченность). Поэтому в эксперименте движение судна моделируется приближенно, в некоторой условной среде с обломками льда. Условия подобия соблюдаются в отношении наиболее важных характеристик битого льда (толщины льдин, сплоченности, ширине канала, коэффициента трения льда о корпус, размеров обломков в плане, плотности).

Это дает возможность моделировать битый лед с помощью пластинок из полиэтилена высокого давления, предложенного нами ранее [44]. Пластинки могут быть квадратной или треугольной формы, одинаковых размеров, что обеспечивает повторяемость опытов. Эти опыты можно проводить в обычном (не ледовом) бассейне.

У полиэтилена высокого давления  $\rho_i = 0.91 \div 0.92 \text{ т/м}^3$ ,  $f \approx 0.12 \div 0.15$ , что соответствует условиям (1.1).

**4. О модели льда композитной конструкции “GP-ice”.** Предложенный способ моделирования взаимодействия судов и морских сооружений со льдом с разделением составляющих, хотя и позволяет быстро, достаточно надежно и с низкой стоимостью получить результаты, но он не свободен от ряда недостатков. В частности, раздельное моделирование значительно усложняет испытания, которые необходимо проводить в разных средах: в моделированном тонком естественном сплошном льду и в битом льду из плиток полиэтилена, также усложняется обеспечение требуемого коэффициента трения.

Кроме того, использование данного метода возможно только при низких скоростях движения. На больших скоростях возникает динамическая составляющая сопротивления, обусловленная толщиной (массовыми характеристиками) льда, что усложняет испытания по прогнозированию ледового сопротивления и вводит дополнительные условия.

Однако, предложенный способ можно усовершенствовать, не разделяя составляющие. Этого можно добиться, используя материал модели льда композитной структуры, представленной на рис. 1 [45].

Поверхность воды засыпается гранулами полиэтилена высокого давления. При отрицательных температурах на поверхности воды (между гранулами) намораживается тонкий слой ( $h_{freez}$ ) естественного льда, характеристики которого соответствуют условиям в отношении толщины, прочности и упругости. Диаметр гранул подобран таким образом, чтобы толщина сформировавшегося слоя полиэтилена ( $h_p$ ) после проморозки его льдом на толщину  $h_{freez}$  соответствовала бы требуемой толщине модельного льда ( $h_m$ ) по условию моделирования.

В этом случае не требуется проводить испытания в двух средах и удается выполнить требуемые условия моделирования (как указывалось ранее условия частичного подobia).

Некоторая сложность в этих испытаниях заключается в том, что относительный объем (и, следовательно, масса модели) льда в виде гранул меньше при взаимодействии с моделью, чем относительная масса льда, взаимодействующая с судном. По-

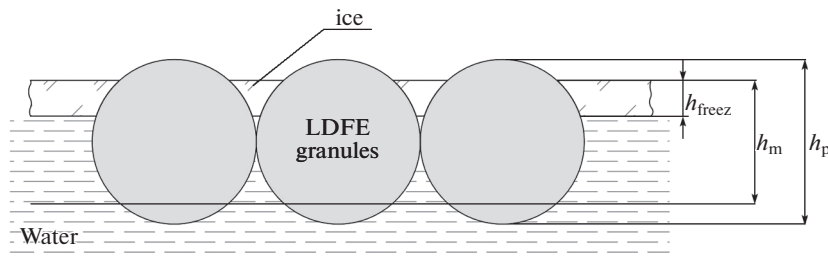


Рис. 1

этому в расчет сопротивления льда необходимо вводить коэффициент (аналогичный коэффициенту упаковки гранул, равный отношению объема гранул полиэтилена с учетом объема замороженного слоя к объему описанного вокруг них прямоугольного параллелепипеда).

Как показали наши опыты, функциональная зависимость  $E^*(h)$  для композитной структуры остается с точностью до постоянной такой же, как и для естественного льда. Прочностные свойства льда соответствуют моделированию по толщине замороженного слоя  $h_{freez}$  [46].

Модельный лед композитной структуры со стабильными характеристиками легко приготовить в открытых опытовых бассейнах в зимнее время, причем даже значительные колебания температуры воздуха практически не оказывают влияния на адгезионные свойства полиэтилена и влияют лишь на скорость роста льда.

К положительным эффектам новой технологии относится близость диаграммы разрушения композитного и естественного льда реальных толщин, что приводит к соответствию работ разрушения и геометрии обломков льда в натуральных и модельных условиях.

Метод прошел проверку в ледовом бассейне НГТУ и показал удовлетворительную сходимость результатов натурального и модельного экспериментов для речного льда [4, 47, 48].

Анализ итогов экспериментальной работы с композитным льдом с применением гранул полиэтилена высокого давления позволил сделать следующие выводы:

1) Диаграммы разрушения (зависимость усилия нагружения ледяного покрова от его прогиба под нагрузкой) лабораторного ("GP-ice") и натурального льда в безразмерных координатах практически совпадают, т.е. процессы разрушения обоих видов льда подобны. В лабораторном льду при скоростях нагружения, соответствующих скоростям движения моделей судов в бассейне, релаксационные явления не успевают проявиться, так же как и в натурном льду.

2) Плотность лабораторного льда соответствует плотности речного льда, что обеспечивает моделирование сопротивления, обусловленного преодолением сил весового характера.

3) Коэффициент трения соответствует движению корпуса судна в натурном заснеженном льду, что обеспечивает моделирование сил трения при соблюдении подобия по плотности и массовым характеристикам.

4) Изменение температуры окружающего воздуха от  $-1$  до  $-19^\circ\text{C}$  не влияет на физико-механические характеристики льда в течение 5 лет с момента изготовления гранул.

**Благодарности.** Данная работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00820.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Каשתелян В.И., Позняк И.И., Рывлин А.Я.* Сопротивление льда движению судна. Л.: Судостроение, 1968. 238 с.
2. *Шиманский Ю.А.* Теория моделирования движения судна в сплошном ледяном поле // Сб. науч. тр. ААНИИ. Т. 237. 1960. С. 29–39.
3. *Atkins A.G.* Icebreaking modelling // Journal of Ship Research. 1975. V. 19. Issue 1. P. 40–43.
4. *Ионов Б.П., Грамузов Е.М.* Ледовая ходкость судов. 2 издание, исправленное. СПб.: Судостроение, 2014. 504 с.
5. *Enkvist E.* On the ice resistance encountered by ships operating in the continuous mode of ice-breaking // The Swedish academy of engineering sciences in Finland. Helsinki, Finland, 1972. V. 24. 181 p.
6. *Schwarz J.* New Development in Modelling Ice Problems // Proc. of the POAC'77. St. John's, Nfld, Canada, 1977. V. 1. P. 45–61.
7. *Molyneux D., von Bock und Polach R.U.F.* Model Ice: A Review of its Capacity and Identification of Knowledge Gaps // Proc. of the 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Trondheim, Norway, 2017. P. 1–10.
8. *Schwarz J.* On The Flexural Strength and Elasticity of Saline Ice // Proc. of the IAHR Int. Symp. on Ice. Hanover, Germany, 1975. P. 373–386.
9. *Ziemer G., Evers K.U.* Model Tests With a Compliant Cylindrical Structure to Investigate Ice-Induced Vibrations // Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 2016. V. 138. Issue 4. P. 041501-1–041501-8.
10. *Timco G.W.* A comprasion of several Chemically-Dopes Types of Model Ice // Proc. of the IAHR Symp. on Ice. Quebec City, Canada, 1981. V. 2. P. 489–502.
11. *Timco G.W.* EG/AD/S/F new type of model ice for refrigerated towing tanks // Cold Regions Science and Technology. 1986. V. 2. P. 175–195.
12. *Timco G.W.* The mechanical properties of saline-doped and carbomide (urea) – Doped model ice // Cold Regions Science and Technology. 1980. V. 3. Issue 1. P. 45–56.
13. *Ettema R., Nixon W.A.* Ice tank tests on ice rubble loads against a cable-moored conical platform // Journal of Cold Regions Engineering. 2005. V. 19. Issue 4. P. 103–116.
14. *Huang Y.* Model test study of the nonsimultaneous failure of ice before wide conical structures // Cold Regions Science and Technology. 2010. V. 63. Issue 3. P. 87–96.
15. *Kim J.H., Choi K.S.* An Experimental Study on the Material Properties of the EG/AD Model Ice Used for Ice Model Basins // Journal of Ocean Engineering and Technology. 2011. V. 25. Issue 1. P. 49–55.
16. *Akinturk A., Jones S.J.* Ice loads on azimuthing podded // Proceedings of the OMAE04 23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Vancouver, Canada, American Society of Mechanical Engineers, 2004. P. 903–910.
17. *Jeong S.Y., Lee C.J., Cho S.R.* Ice resistance prediction for standard icebreaker model ship // Proc. of the Twentieth International Offshore and Polar Engineering Conference. Beijing, China, 2010. P. 1300–1304.
18. *Barker A., Timco G., Gravesen H., Volund P.* Ice loading on Danish wind turbines: part 1: dynamic model tests // Cold Regions Science and Technology. 2005. V. 41. Issue 1. P. 1–23.
19. *Urabe N., Yoshitake A.* Similitude Law of Ice Based on Fracture Mechanics // Proceedings of the 3rd International OMAE Symposium. 1984. V. 3. P. 178–182.
20. *Enkvist E.* The new fine-grained model ice of Wartsila Arctic Research Centre. // Wartsila report D 33. Helsinki, Finland. 1983.
21. *Enkvist E., Mäkinen S.* A Fine-Grain model ice // Proceedings of the IAHR Ice Symposium. Hamburg, Germany, 1984. V. 2. P. 217–227.
22. *Narita S., Inoue M., Kishi S., Yamauchi Y.* The model ice of the NKK ice model basin // Proceedings of the IAHR Ice Symposium. Sapporo, Japan, 1988. V. 1. P. 782–892.
23. *Enkvist E.* Ice model tests as a ship design tool // Proceedings of the IAHR Ice Symposium. Espoo, Finland, 1990. V. 1. P. 15–45.
24. *Nortalta-Hoikkanen A.* FGX model ice at the Masa-Yards Arctic Research Centre // Proceedings of the IAHR Ice Symposium. Espoo, Finland, 1990. V. 3. P. 247–259.

25. *Wilkman G., Forsén A.C., Mattsson T.* Recent advancements in ice model testing at Aker Arctic // Proc. of the 20th IAHR Int. Symp. on Ice. Lahti, Finland, 2010.
26. *Jalonen R., Ilves L.* Experience with a chemically-doped Fine-Grained model ice // Proceeding of the IAHR Ice Symposium. Espoo, Finland, 1990. V. 2. P. 639–651.
27. *von Bock und Polach R.U.F., Ehlers S., Kujala P.* Model-scale ice – Part A: Experiments // Cold Regions Science and Technology. 2013. V. 94. P. 74–81.
28. *Li Z., Riska K.* Index for estimating physical and mechanical parameters of model ice // Journal of cold regions engineering. 2002. V. 16. Issue 2. P. 72–82.
29. *Tuhkuri J., Lensu M.* Laboratory tests on ridging and rafting of ice sheets // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2002. V. 107. Issue C9. P. 8-1–8-14.
30. *Spencer D.S., Timco G.W.* CD model ice: a process to produce correct density model ice // Proceeding of the IAHR Ice Symposium. Espoo, Finland, 1990. V. 2. P. 745–755.
31. *Сазонов К.Е.* Методы коррекции экспериментальных данных по ледовой ходкости судна в модельных и натуральных условиях // Полярная механика. 2016. № 3. С. 406–416.
32. *Riska K., Kato K., Beljashov M.V. et al.* Report of the performance in ice-covered waters committee // Proc. of the 21th International Towing Tank Conference. Trondheim, Norway, 1996. V. 1. P. 212–270.
33. ITTC – Recommended procedures and guidelines. Testing and extrapolation methods ice testing resistance test in level ice. 7.5-02-04-02.1. 2002.
34. *Derradji-Aouat A., Hellman J.H., Rheem C.K. et al.* The specialist committee on ice. Final report and recommendations to the 24th ITTC // Proc. of the 24th International Towing Tank Conference. Edinburg, UK, 2005. V. 2. P. 439–470.
35. *Jochmann P., Lau M., Sazonov K.E. et al.* The specialist committee on ice. Final report and recommendations to the 27th ITTC // Proc. of the 27th International Towing Tank Conference. Denmark, Copenhagen, 2014. V. 2. P. 726–747.
36. *Грамузов Е.М.* Моделирование сопротивления льда движению судов // Вопросы теории, прочности и моделирования судов, плавающих во льдах: межвуз. сб. Горький: изд-во ГПИ, 1984. С. 38–43.
37. *Зуев В.А., Грамузов Е.М., Двойченко Ю.А.* Экспериментальные исследования разрушения ледяного покрова // Вопросы теории, прочности и проектирования судов, плавающих во льдах: межвуз. сб. Горький: изд-во ГПИ, 1984. С. 4–13.
38. *Зуев В.А.* Средства продления навигации на внутренних водных путях. Л.: Судостроение, 1986. 207 с.
39. *Двойченко Ю.А.* К вопросу о предельной деформации ледяного покрова // Теория и прочность ледокольного корабля: межвуз. сб. Горький: изд-во ГПИ, 1978. С. 47–49.
40. *Двойченко Ю.А.* Деформация и пролом ледяного поля // Теория и прочность ледокольного корабля: межвуз. сб. Горький: изд-во ГПИ, 1980. Т. 2. С. 38–44.
41. *Vance F.P.* Model testing in ice // Naval Engineers Journal. 1968. V. 80. Issue 2. P. 259–264.
42. *Лавров В.В.* Деформация и прочность льда. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 206 с.
43. *Kivisild H.R., Iyer S.H.* Mathematical and physical modelling of ice // Proc. of the IAHR Symposium on ice problems. Lulla, Sweden, 1978. Part 1. P. 379–391.
44. *Зуев В.А., Грамузов Е.М.* Новые подходы к моделированию ледовой среды при модельных испытаниях судов // Полярная механика. 2016. № 3. С. 31–42.
45. *Беляков В.Б.* Новая модель льда // Вопросы теории, прочности и проектирования судов, плавающих во льдах: межвуз. сб. Горький: изд-во ГПИ, 1984. С. 48–52.
46. *Zuev V.A., Gramuzov E.M., Appolonov E.M., Vaganov A.B.* Physical simulation of ice cover for investigation into icebreaking ship performance // International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET). 2018. V. 9. Issue 11. P. 1637–1646.
47. *Беляков В.Б.* Экспериментальные исследования ледопроеходимости судов в новой модели льда // Проектирование средств продления навигации: межвуз. сб.. Горький: изд-во ГПИ, 1986. С. 79–84.
48. *Беляков В.Б.* Исследование физико-механических свойств композитной модели льда // Вопросы проектирования судов, плавающих во льдах: межвуз. сб. Горький: изд-во ГПИ, 1988. С. 76–88.