

Рис. 4. Схема усилий на тормозной тележке

Из этого условия, зная коэффициент трения  $\mu$  и угол наклона форштевня судна  $\alpha$ , можно определить угол уклона тормозных путей тележки.

Выводы:

- представленная схема взаимодействия тормозного каната и форштевня судна может быть уточнена с учетом фактических обводов судна и типа резины, принятой для оболочки каната.
- усилия навала следует задавать в зависимости от принятой длины зоны безопасности перед воротами шлюза.
- так как тормозные тележки воспринимают как горизонтальные, так и вертикальные нагрузки, наклонные пути необходимо проектировать, используя лотковую форму фундамента.

### Литература

1. Нычик, Т. Ю. Анализ аварийных ситуаций при шлюзовании судов / Журнал Государственного университета водных коммуникаций. – СПб.: Изд-во СПГУВК, 2011, вып. IV (XII). – С. 105–112.

УДК 624.124.791

### Новые направления моделирования ледяного покрова с применением композитного модельного льда GP-ice

Зуев В. А., Двойченко Ю. А., Себин А. С.

Нижегородский государственный технический университет  
им. Р. Е. Алексеева  
Нижний Новгород, Россия

*Активное использование большого количества весьма разнообразных способов моделирования ледяного покрова для оценки ледовых качеств судов в различных ледовых опытовых бассейнах свидетельствует об отсутствии единого подхода в этом вопросе. В данной статье указывается на фундаментальное противоречие, лежащее в основе упомянутых методов, и предлагается новый способ тестирования модельного ледяного поля, основанный*

*на рассмотрении фактического процесса разрушения льда. Предлагается методика использования композитного модельного льда GP-ice, показывается, что механические свойства модельного ледяного поля лежат в области значений, требуемых для обеспечения условий моделирования. Представлены результаты экспериментальных исследований, намечены направления дальнейшей работы.*

Исследование сопротивления движению судов во льдах является сложной и нетривиальной задачей, представляющей большой интерес для исследователей. Например, в [6] приведено 17 наиболее известных методов оценки ледового сопротивления ледоколов, однако ни один из них не может с достаточной для практики точностью предсказать скорость движения судна во льдах заданной толщины. Причинами этого являются: сложная совокупность различных по природе и характеру сил, действующих при взаимодействии корпуса судна со льдом и водой, достаточно трудная для математического описания форма судовой поверхности, но, по-видимому, наибольший вклад вносит недостаточная изученность процессов разрушения ледяного покрова как особой природной конструкции, а также свойств льда как специфического материала. Всё это определяет ведущую значимость роли модельного физического эксперимента в задаче прогнозирования ледовой ходкости судов.

Современные представления о ледовом сопротивлении судна [6] основаны на гипотезе о суперпозиции – разделении полного сопротивления судна во льдах на различные составляющие, не зависящие (или пренебрежимо слабо зависящие) друг от друга:

$$R = R_p + R_{obl} + R_g, \quad (1)$$

где  $R_p$  – сопротивление от разрушения ледяного покрова;  $R_{obl}$  – сопротивление, вызванное взаимодействием корпуса судна с обломками, образовавшимися после разрушения ледяного покрова;  $R_g$  – сопротивление воды движению судна.

На этом принципе основан, например, оригинальный способ определения ледового сопротивления [3]. В нём сопротивление от разрушения определяется путём проведения модельного эксперимента в сплошном естественном льду, который имеет прочностные свойства подобные натурному льду, но не имеет подобия по толщине. Затем модель прогоняют в полученных обломках льда и из найденного значения вычитают сопротивление в получившихся обломках льда (которые не подобны натурным). После этого проводят дополнительный эксперимент в плитках из полиэтилена [3] с целью определения  $R_{obl}$ . Сопротивление  $R_g$  определяют путём проведения классического эксперимента в бассейне без льда («на чистой воде»). Данный метод ничем не

уступает известным, имеет хорошую сходимость с натурными данными [10], а также является наиболее строго обоснованным из существующих.

Однако, данная методика является очень трудоёмкой, обладает значительным рядом условностей и допущений, не имеет достаточно обоснованной технологии тестирования на адекватность натуре, не позволяет совместно моделировать составляющие сопротивления (1). С целью преодоления перечисленных недостатков авторами проводится исследование, заключающееся в поиске новых направлений в моделировании ледяного покрова, одним из которых является разработка композитного материала модели льда (GP-ice).

Наиболее существенным недостатком современных физических моделей взаимодействия объектов ледотехники с ледяным покровом является некачественное обеспечение подобия процессов, приводящих к разрушению льда. Одна из причин такого положения состоит в недостаточной изученности разрушения натурального льда, малом количестве проведённых экспериментальных работ. Наиболее значимыми являются исследования [2, 9], дающие достаточно полное представление о процессе разрушения натурального льда, которое явилось продолжением экспериментов российских ученых [7, 8, 9]. Главное отличие опытов, приведённых в работе [5], от упомянутых состояло в использовании кинематического метода нагружения льда. Если ранее (силовой метод) производилось постоянное увеличение нагрузки вплоть до пролома с фиксацией проломной нагрузки [7, 8], регистрацией прогиба на момент пролома [8], то при кинематическом нагружении прогиб под нагрузкой задавался ее перемещением и фиксировалась силовая реакция ледяного покрова на данное перемещение. Это позволило получать детальную и полную характеристику процесса в виде диаграммы разрушения, на которой отображаются моменты спада нагрузки до и после достижения ей максимума.

Кроме этого, упомянутые ранние опыты производились по схеме «центральное нагружение», когда усилие прикладывается к бесконечному ледяному покрову. В последних опытах [5] разрушение производилось по схемам наиболее приближенным к реальному воздействию технических средств и сооружений на ледяной покров – по схеме прокладки канала и расширению его кромок.

При приложении вертикального усилия к бесконечному ледяному покрову происходит его деформация. Когда напряжения во льду достигают критических значений, происходит образование сети трещин – сначала радиальных, затем кольцевых. В этот момент ледяной покров, разделённый трещинами, теряет свою сплошность, но разрушения не происходит. При дальнейшем увеличении нагрузки лёд деформируется как конструкция, состоящая из отдельных блоков. Пролом ледяного покрова происходит в тот момент, когда блоки, опёртые друг на друга, разрушаются по краям от

взаимодействия друг с другом и конструкция в целом теряет свою несущую способность [2]. В этот момент происходит образование значительного числа трещин, описанию которых встречается большие трудности ввиду большого их количества.

Принимая во внимания описанный процесс разрушения ледяного покрова, становится очевидной несостоятельность методики тестирования на адекватность большей части современных физических моделей льда. Этот тест представляет собой облом консольной балки, выпиленной во льду. В результате такого опыта максимальное значение приложенной ко льду нагрузки фиксируется в тот момент, когда возникает трещина и балка отделяется от остального льда, тогда как натуральный ледяной покров сохраняет свою несущую способность ещё долгое время после появления первых трещин.

Попытки математического описания, приведённые выше, феноменологии процесса разрушения ледяного покрова встречают значительные трудности. Это обстоятельство затрудняет составление строгих критериев физического моделирования как на основе математических уравнений, так и на основе понимания физики разрушения ввиду сложности процессов, протекающих во льду.

Однако, в экспериментальных исследованиях по разрушению натурального ледяного покрова [7, 9], в том числе и в [5], замечен факт пропорциональности максимального разрушающего лёд усилия квадрату толщины льда, хорошо аппроксимирующая результаты экспериментов по схеме «центрального пролома»:

$$P = k_p h_\lambda^2, \quad (2)$$

где  $P$  – величина сосредоточенного усилия, прикладываемого к ледяному покрову;  $k_p$  – размерный коэффициент (Па), называемый «коэффициентом разрушения», связывает величину приложенного ко льду усилия с толщиной ледяного покрова.

Величина этого коэффициента оказалась достаточно стабильной (средне-квадратичные отклонения от среднего составили не более 10 %) и для схемы центрального пролома составила 1,96 МПа. Этот факт даёт возможность выделить эмпирическое условие моделирования прочности ледяного покрова, учитывая всю сложность процесса разрушения, на основе данных натурального эксперимента.

При проведении экспериментов по определению ледовой ходкости судов [6] геометрические размеры модели  $l_m$  уменьшают в  $\lambda$  раз по сравнению с натурными  $l_n$ :

$$\frac{l_n}{l_m} = \lambda, \quad (3)$$

где  $\lambda$  – геометрический масштаб моделирования.

Этому же правилу должны подчиняться в том числе и размеры ледяного покрова ( $h_n$ ) при моделировании:

$$\frac{(h_n)_n}{(h_n)_m} = \lambda \quad (4)$$

Испытания моделей судов проводят в пресной воде, а разницей плотностей природы и модели пренебрегают:

$$\rho_m = \rho_n \quad (5)$$

При этом для совместного моделирования массовых сил воды и льда стремятся, чтобы для плотности модельного и натурального льда условие (4) также выполнялось.

Тогда по условиям моделирования все силы, связанные с ускорением свободного падения (силы тяжести, силы поддержания и т.д.), уменьшаются в  $\lambda^3$  раз, т.к.  $g = const$  для природы и для модели. Учитывая (3) и (5), получим:

$$\frac{G_n}{G_m} = \frac{\rho_n V_n g}{\rho_m V_m g} = \lambda^3 \quad (6)$$

Необходимость совместного моделирования механических и массовых сил в рамках одной системы требует соблюдения одинакового для них масштаба моделирования [11] (его ещё называют условием динамического подобия объектов):

$$\frac{P_n}{P_m} = \frac{\rho_n V_n a_n}{\rho_m V_m a_m} = \lambda^3 \quad (7)$$

При проведении модельных испытаний судов на этот масштаб уменьшаются все силы механического характера, связанные с ледовым сопротивлением: силы взаимодействия обломков с судном и между собой, гидродинамические силы, связанные со льдом и судном, сила, действующая со стороны судна на ледяной покров.

Таким образом, для моделирования процесса взаимодействия судов со льдом необходимо подобрать такой материал модели льда, чтобы прикладываемые к ледяному покрову силы, вызванные перемещением судна, разрушали его в тот момент, когда они достигнут величины в  $\lambda^3$  меньшей, чем разрушающая нагрузка в натуре.

Очевидно, что это же правило должно выполняться для модельного ледяного покрова не только при взаимодействии с судном, но и с любой другой приложенной к нему механической силой и она тоже будет в  $\lambda^3$  раз меньше, чем в натуре для этой же схемы нагружения.

В связи с этим выдвигается следующее положение, основополагающее для моделирования ледяного покрова:

«Тестирование модельного ледяного покрова на предмет адекватности модели натуре должно производиться на основе опыта по пролому модельного льда по схеме центрального нагружения».

Тогда, учитывая формулу (3), основанную на данных, полученных при проведении экспериментов по разрушению натурального льда по схеме «центральный пролом», получим:

$$\lambda^3 = \frac{P_n}{P_m} = \frac{(k_p h_n^2)_n}{(k_p h_m^2)_m} \quad (8)$$

Учитывая (4), имеем требование к материалу модели ледяного покрова:

$$(k_p)_m = \frac{(k_p)_n}{\lambda} \quad (9)$$

Аналогичным образом можно показать, что для обеспечения условия моделирования прогиба под силой на момент пролома необходимо, чтобы модуль упругости модельного льда был в  $\lambda$  раз меньше, чем у натурального:

$$E_m = \frac{E_n}{\lambda} \quad (10)$$

Направления поиска материала, соответствующего условиям (9) и (10), были заложены в НГТУ им. Р.Е. Алексеева патентом [1]. В нем предлагалась модель ледяного покрова, в которой в естественный лед вмораживались полиэтиленовые гранулы, в связи с чем она получила название композитной. Включение гранул в естественный лед приводило к уменьшению его прочности из-за нарушения длинных и крупных межкристаллических связей и малой адгезией льда к полиэтилену. Кроме этого, полиэтилен имеет меньший модуль упругости и его присутствие снижает значение общего модуля деформации ледяного покрова. В совокупности это позволяло надеяться на разработку методики, позволяющей прийти к выполнению условий (9) и (10). Обобщение круга работ, посвященных этой модели, в тот период времени приведено в [3, 6].

Трудоемкость экспериментов с композитным льдом, проводимых в опытном бассейне в условиях естественного холода на открытом воздухе, зависимость от нестабильных погодных условий, обусловили малое количество опытов. Это не позволило провести достаточно объемное исследование композитного модельного льда и завершить его в полном объеме. Положение изменилось с появлением малого ледового бассейна, расположенного в термокамере [4]. Независимость от внешних условий и снижение трудоемкости позволило вновь проводить эксперименты по изучению свойств композитного льда и поиску направлений для выполнения условий моделирования.

Эксперименты проводились в ледовом бассейне с размерами 1,1×2,5 м, использовались сферические гранулы диаметром 20 мм. Температура в камере поддерживалась  $-15^0 \dots -18^0 \text{C}$ , время намораживания нужного слоя

зависело от начальной температуры воды и составляло 1–5 ч. Разрушенный модельный лед после опыта вместе с гранулами расплавлялся в воде, а в бассейн засыпалась новая порция гранул, предварительно охлажденных в камере. Это сокращало время между опытами.

Внешний вид моделированного льда показан на рис. 1, *а*. Геометрические параметры этого льда даны на рис. 1, *б*. Толщина промораживаемого слоя гранул естественным льдом  $h_1$  определяет приведенную толщину модельного льда  $h$ :

$$h = \frac{V_D + V_{h_1}}{S} \quad (11)$$

где  $V_D$  – объем сферических гранул на площади  $S$ ;  $V_{h_1}$  – объем льда между гранулами на площади  $S$ .

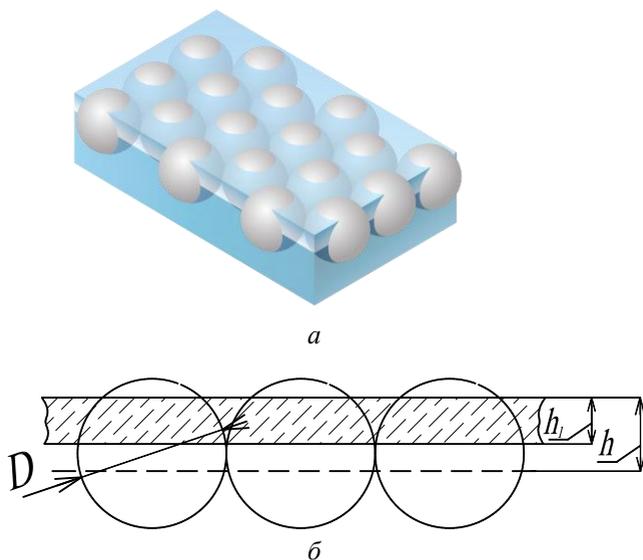


Рис. 1. Однослойная композитная модель ледяного покрова GP-ice с применением гранул  $D = 20$  мм:  
*а* – внешний вид, *б* – геометрические параметры  $h_1$  – глубина проморозки,  $h$  – приведенная толщина моделированного льда

В процессе проведения опытов по разрушению модельного льда, показанного на рис. 2, нагружение производилось с применением кинематической схемы – силовонагружатель перемещал упор в лед с постоянной скоростью 1 мм/с. Возникающее усилие измерялось с помощью тензометричес-

кого датчика и регистрировалось посредством АЦП на ПК, перемещение фиксировалось при помощи датчика резистивного типа.

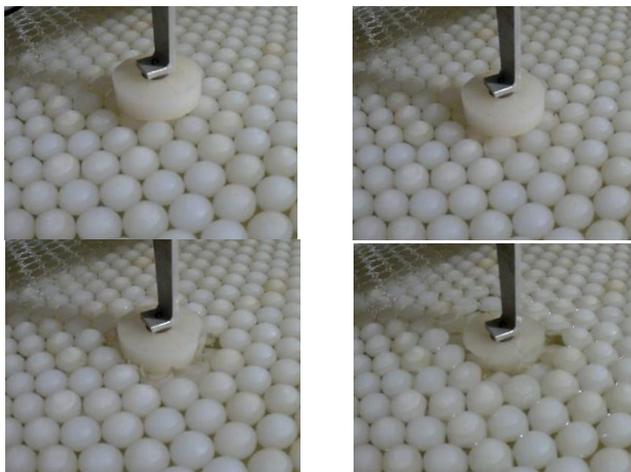


Рис. 2. Процесс нагружения ледяного покрова с последующим проломом

Типичный вид диаграмм разрушения показан на рис. 3. На диаграммах выделяются две характерные зоны – первая имеет крутой подъем и может быть интерпретирована как деформация с появлением радиальных трещин; вторая пологая часть по наблюдениям сопряжена с появлением и развитием концентрических трещин.

В результате обработки экспериментальных данных получено две группы результатов. Первая связывает силовые характеристики и величину модуля деформации модельного ледяного поля с приведенной толщиной моделированного льда. Здесь имеется в виду не модуль упругости, который трудно определить из-за сложной связи усилия и прогиба на начальном участке диаграммы, а модуль деформации, определенный по начальной части диаграммы, в которой трудно отделить начало образования радиальных трещин. Приближенное значение этого модуля определялось, как и для случая идеального покрова, по известной формуле Герца [10]. Упомянутые характеристики приведены на графиках на рис. 4. Коэффициент разрушения определялся по формуле (2). Получены формулы аппроксимации, позволяющие использовать данные экспериментов в численных расчетах.

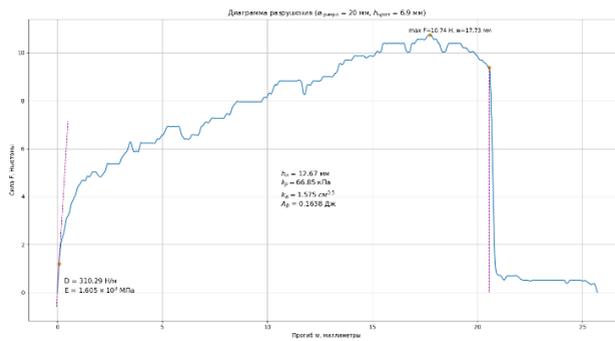
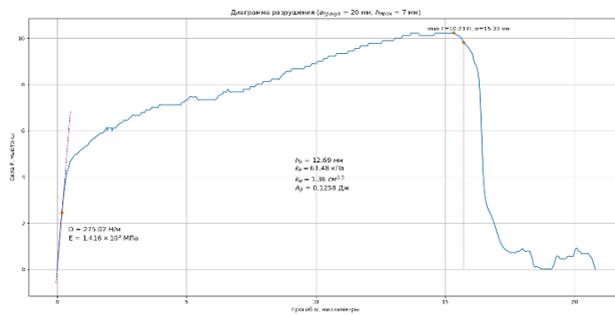
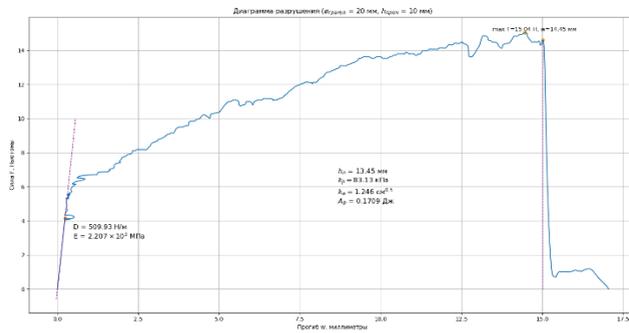


Рис. 3. Типичный вид диаграмм разрушения однослойного композитного льда из гранул 20 мм

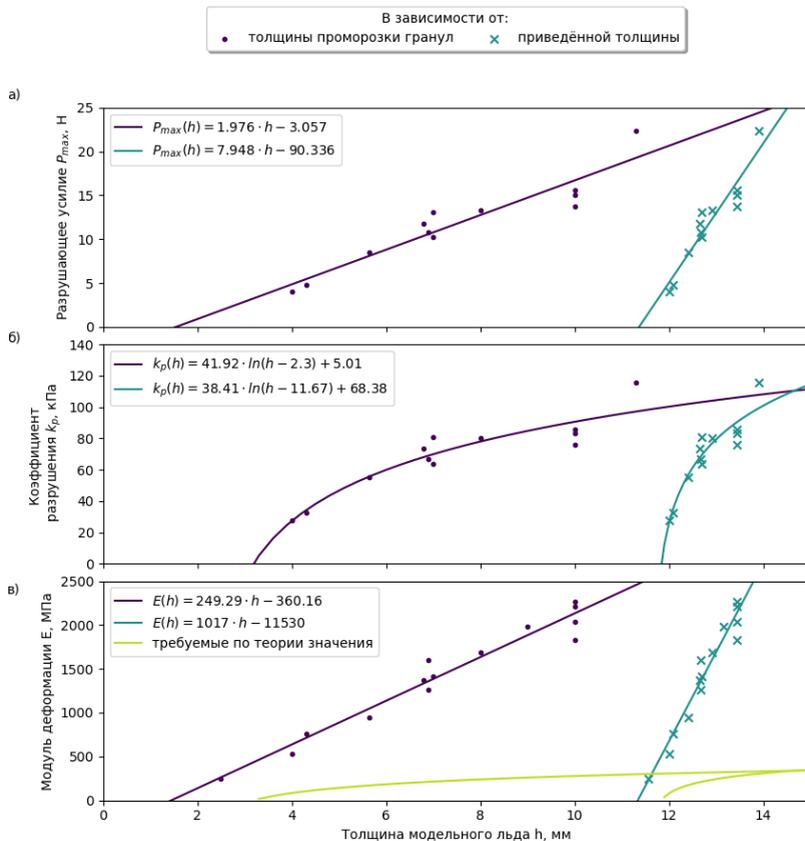


Рис. 4. Основные силовые и деформационные характеристики процесса пролома модельного композитного льда:

*a* – максимальное разрушающее усилие, *b* – коэффициент разрушения, *v* – модуль деформации

Вторая группа результатов связана с оценкой возможности использования полученных результатов с гранулами диаметром 20 мм для задачи моделирования натуральных объектов. Используя выражение (7), связывающее коэффициенты разрушения натурального и модельного ледяного покрова с геометрическим масштабом моделирования, на основе проведённых опытов по разрушению моделированного льда по схеме «центральный пролом», можно определить геометрический масштаб моделирования, соответствующей данной толщине модельного льда  $h$ , а также по (10) определить необходимые характеристики модуля деформации модельного льда для более строго

соответствия классической теории подobia. Кривые требуемых значений приведены на рис. 4, в.

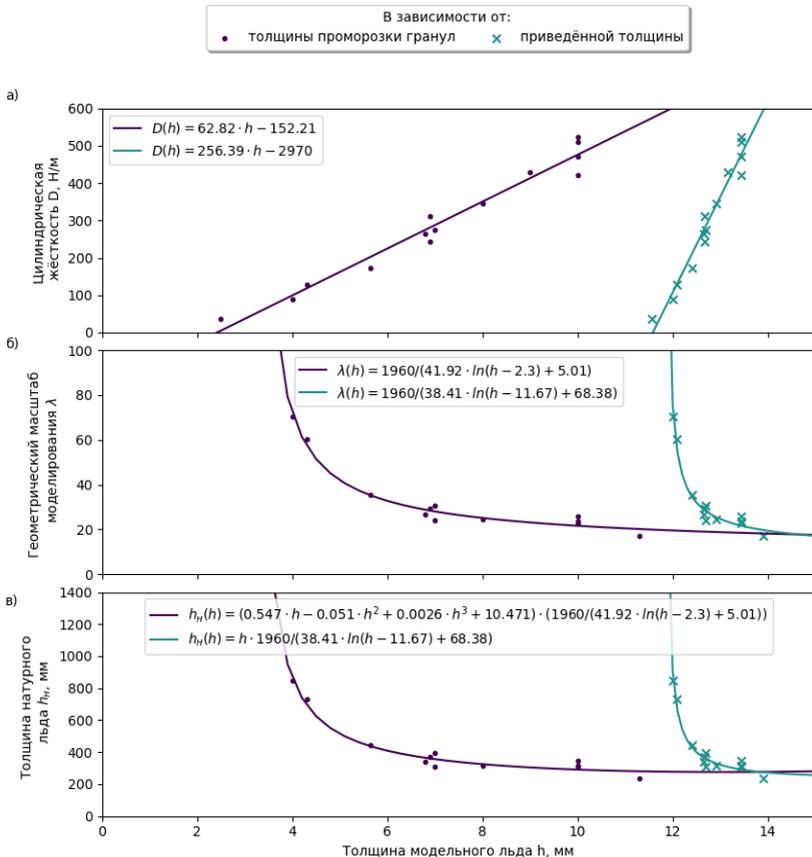


Рис. 5. Параметры моделирования натурального льда с использованием композитной модели ледяного покрова “GP-ice”:  
 а – цилиндрическая жёсткость, б – геометрический масштаб моделирования, в – толщина натурального льда

Из этих данных следует, что при использовании гранул диаметром 20 мм можно обеспечить моделирование толщины ледяного покрова до 800 мм с применением геометрического масштаба  $\lambda$  в пределах 20–70.

Данный предел  $\lambda$  недостаточен для большинства задач, связанных с взаимодействием технических средств и сооружений с натурным ледяным

покровом, однако, полученные результаты указывают на правильность выбранного подхода к применению моделированного композитного льда на основе полиэтиленовых гранул и позволяют наметить направления дальнейших исследований, к которым относятся

- использование гранул другого диаметра, начиная от 3 до 25 мм;
- применение многослойной заморозки гранул размером 3–10 мм.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00820.

### Литература

1. А.с. 1071515 СССР МПК В 63 В 9/02. Способ испытания моделей судов ледового плавания [Текст] / Зуев В. А., Грамузов Е. М., Беляков В. Б. (СССР). – 3528921; заявлено 09.11.1982; опубл. 07.02.1984, Бюл. № 5.
2. Двойченко, Ю. А. Деформация и пролом ледяного поля [Текст] / Ю. А. Двойченко // Теория и прочность ледокольного корабля: межвуз. Сб. – Горький, 1980. – С. 38–44.
3. Зуев, В. А. Средства продления навигации на внутренних водных путях [Текст] / В. А. Зуев. – Л.: Судостроение, 1986. – 207 с.
4. Зуев, В. А. Техника и технология исследований модельного льда в малом ледовом бассейне НГТУ им. Р. Е. Алексеева [Текст] / В. А. Зуев, Ю. А. Двойченко, А. С. Себин // Транспортные системы. – 2019. – № 3. – С. 39–47.
5. Зуев, В. А. Экспериментальные исследования разрушения ледяного покрова [Текст] / В. А. Зуев, Е. М. Грамузов, Ю. А. Двойченко // Вопросы теории, прочности и проектирования судов, плавающих во льдах: межвуз. сб. – Горький, 1984. – С. 4–13.
6. Ионов, Б. П. Ледовая ходкость судов [Текст] / Б. П. Ионов, Е. М. Грамузов. – СПб.: Судостроение, 2001. – 512 с.
7. Ключарев, В. Определение грузоподъемности ледяных переправ [Текст] / В. Ключарев, С. Изюмов // Военно-инженерный журнал. – 1943. – № 2–3. – С. 30–34.
8. Панфилов, Д. Ф. Экспериментальные исследования грузоподъемности ледяного покрова [Текст] / Д. Ф. Панфилов // Известия ВНИИГ. – 1960. – № 65. – С. 101–116.
9. Пролом и грузоподъемность льда [Текст] / П. П. Кобеко, Н. И. Шишкин, Ф. И. Марей, Н. С. Иванов // ЖТФ. – 1946. – № 16, вып. 3. – С. 273–276.
10. Тимошенко, С. П. Пластинки и оболочки [Текст] / С. П. Тимошенко, С. Войтковский-Кригер. – М.: Изд-во физико-математической литературы, 1963. – 635 с.

11. Эпштейн, Л. А. Методы теории размерностей и подобия в задачах гидромеханики судов [Текст] / Л. А. Эпштейн. – Л.: Судостроение, 1970. – 208 с.

12. The Experimental and Theoretical Investigations of the “GP-ice” Use in Ships Model Tests / V.A. Zuev, E.M. Gramuzov, Y.A. Dvoychenko, A. S. Sebin // Earth and Environmental Science. – 2020. – Vol. 4. – № 459. – 042071.

УДК 628.112

### **Двухуровневая скважина для забора подземных вод**

Медведева Ю. А., Ивашечкин В. В., Сацута Е. С.  
Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

*В данной статье авторами представлена конструкция водозаборной скважины с фильтрами, расположенными в два уровня, способной одновременно выполнять функции рабочей и резервной скважин, применение которой позволит снизить энергозатраты на подъем воды, уменьшить капитальные затраты на строительство и обеспечить бесперебойное водоснабжение. Также приведены зависимости для определения функции понижения напора и особенности фильтрации при работе двухуровневой скважины в напорном водоносном пласте.*

Для обеспечения бесперебойной подачи воды потребителю часто предусматривают устройство двух водозаборных скважин, основной и резервной, для обеспечения бесперебойной подачи воды водопотребителю, имеющих индивидуальные здания насосных станций, а также зоны санитарной охраны строгого режима с внешним ограждением, где устанавливается особый режим эксплуатации территории для защиты от загрязнения [1]. Такая компоновка размещения рабочей и резервной скважин предполагает значительные материальные затраты на сооружение отдельных скважин с павильонами и сетями, а также требует отчуждения значительных площадей под территории их зон санитарной охраны.

В БНТУ была предложена конструкция двухколонной двухуровневой скважины для повышения надежности и долговечности водозаборной скважины, а также снижения удельных затрат на подъем воды (рисунок 1). Скважина состоит из кондуктора 1 с затрубной цементацией 2, первого ствола, имеющего в своем составе эксплуатационную колонну 3, фильтр с рабочей частью 4 и отстойник 5, второго ствола, имеющего в своем составе эксплуатационную колонну 6, фильтр с рабочей частью 7 и отстойник 8, верхнего соединительного патрубка 9, нижнего соединительного патрубка 10,