

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛЕДОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СУДОВ В КОМПОЗИТНОЙ МОДЕЛИ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА

А.С. Себин, К.Д. Блинов, Ю.А. Двойченко (Нижний Новгород)

**Введение.** Прогнозирование ледового сопротивления судна – весьма важная задача, стоящая перед инженером еще на начальной стадии создания проекта. От успеха ее решения зависит не только стоимость конечного продукта, но его способность выполнять свои функции. Наиболее надежным инструментом, отвечающим реальным потребностям проектанта, является физический модельный эксперимент в ледовом опытовом бассейне. Тем не менее точность проводимых экспериментальных исследований движения судна в сплошных льдах не в полной мере отвечает современным потребностям по целому ряду причин [1]. Наиболее эффективным решением этой проблемы является разработка новых подходов к моделированию ледяного покрова.

Одним из наиболее перспективных направлений исследований является композитная модель, составленная из гранул полиэтилена высокого давления (ПВД). Впервые этот материал лабораторного льда был предложен сотрудниками Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева (НГТУ) [2], однако исследовательский интерес был в основном сосредоточен на варианте, составленном из нескольких слоев не до конца замороженных мелких гранул. Несмотря на некоторые положительные результаты [3], достичь полного подобия физической картине взаимодействия судна со льдом не удалось.

Данная работа посвящена исследованию другого варианта композитного льда (рис. 1), составленного из одного слоя более крупных гранул сферической формы, замороженных тонким слоем пресноводного льда. Этот вариант наиболее перспективен и может быть лишен недостатков предыдущего.

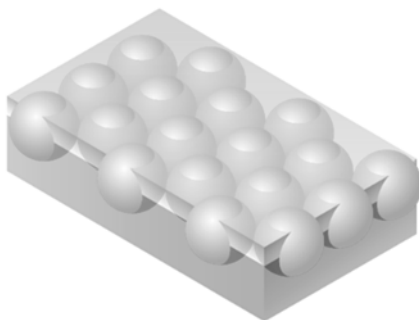


Рис. 1. Композитная модель льда, составленная из одного слоя крупных гранул, замороженных тонким льдом

**Моделирование ледового сопротивления.** Движение судна через сплошное ледовое поле – комплексный физико-механический процесс, сопровождающийся действием системы сил сложной конфигурации на обшивке судна при взаимодействии со льдом, внутри ледового поля при его разрушении, между обломками разрушенного льда, а также между обломками и неразрушенным ледовым полем. Известные к настоящему времени математические модели этого процесса реализованы в весьма приближенном виде, поэтому при определении критериев подобия, как правило, руководствуются общими соображениями относительно физической природы действующих сил.

Исходя из особенностей физической картины взаимодействия судна со сплошным ледяным покровом, полное сопротивление судна определяют по формуле [1]:

$$R_{полн} = R_p + R_{обл} + R_с, \quad (1)$$

где  $R_с$  – сопротивление воды;  $R_{обл}$  – сопротивление, вызванное действием обломков льда;  $R_p$  – сопротивление разрушения ледяного покрова.

В расчетах сопротивлением воды, как правило, пренебрегают ввиду его малости по сравнению с остальными, а при физическом моделировании используют экспериментальное разделение полного сопротивления на составляющие, проводя отдельно испытания на чистой воде по стандартной методике, а затем вычитая измеренные значения из результатов, найденных в ледовом бассейне, получая таким образом чистое ледовое сопротивление [4]. Экспериментальное разделение сопротивления движению в обломках и сопротивления ломке ледового поля реализовано только в методе Зуева–Грамузова [1], однако наибольший интерес представляет их совместное моделирование. Это связано с тем, что заключительные этапы процесса разрушения, когда имеет место пиковая нагрузка, а также ее дальнейший спад, связаны с выламыванием, отделением и притапливанием обломков, что затрудняет однозначное выделение этих составляющих.

При движении судна наблюдаются колебания величины ледового сопротивления, что связано как с цикличностью взаимодействия с ледовым полем, так и хаотичностью процессов разрушения и взаимодействия с обломками. Кроме этого, особую роль играют силы гравитационной природы, все это влечет за собой необходимость организации динамически подобных модельных испытаний. Это требование относится как к модели судна, так и модели льда. Важность одновременного моделирования инерционных и гравитационных сил нашла свое отражение в следующих условиях, обладающих основополагающим значением при проведении испытаний:

$$\lambda_l = \lambda; \lambda_p = 1; \lambda_a = 1; \lambda_t = \sqrt{\lambda}; \lambda_v = \sqrt{\lambda}; \lambda_p = \lambda^3; \lambda_A = \lambda^4, \quad (2)$$

где  $\lambda_l$  – геометрический масштаб;  $\lambda_p$  – масштаб плотностей;  $\lambda_a$  – масштаб ускорений;  $\lambda_t$  – масштаб времени;  $\lambda_v$  – масштаб скоростей;  $\lambda_p$  – масштаб сил;  $\lambda_A$  – масштаб механической работы.

Главным образом эти силы определяют сопротивление движению судна в обломках, в то время как сопротивление разрушению определяется в основном силами другой природы. Эта разница в механизмах их формирования позволяет говорить о двух динамических системах: «взаимодействие судна с обломками» и «взаимодействие судна с неразрушенным льдом», составляющих вместе систему «движение судна в сплошных льдах» (1).

Из теории подобия следует, что для моделирования сложной системы необходимо не только подобие сходственных подсистем, но и подобие общих их компонентов, с помощью которых эти подсистемы связаны [5, 6]. Эта связь реализуется в том, что обломки, в которых движется судно, являются следствием разрушения ледового поля, т.е. конечным состоянием первой системы и исходным второй. Соответствие параметров льда и параметров судна при моделировании обеих систем определяется условиями (2), которые должны быть для них одинаковыми. Другим важным требованием является подобие геометрии обломков, получаемых при разрушении. Различные модели ледяного покрова могут иметь отличающуюся картину трещинообразования, но при этом в процессе их разрушения судном может затрачиваться одно и то же количество энергии. Таким образом, из двух энергетически подобных вариантов моделей льда предпочтение следует отдать той, результатом разрушения которой будут геометрически подобные в плане обломки, контроль за этим параметром должен осуществляться экспериментаторами визуально.

Использование композитной модели ледяного покрова конструкции, приведенной на рис. 1, не позволяет выполнить подобие формы обломков по толщине. Тем не менее,

из анализа сил, определяющих эту составляющую сопротивления, следует, что основными параметрами, влияющими на ее величину помимо ускорений, являются плотности льда, гранул и воды, а также объем модельного льда [1]. Удельная масса ПВД, из которого изготовлены гранулы, соответствует пресноводному льду ( $\rho_{sp} = \rho_{л} = 0,919 \text{ т/м}^3$ ), что обеспечивает выполнение первой группы условий. Объем обломков при подобии размеров в плане может быть охарактеризован приведенной толщиной, носящей в данном случае «виртуальный» характер, но соответствующей условиям (2). Она может быть представлена как отношение объема композитного льда в опытовом бассейне к площади его зеркала:

$$h_{np} = h_{fr} + \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \left[ \frac{R}{3} \left( 4 + \frac{(h_1 + h_{fr})^3 - h_1^3}{R^3} \right) - \frac{2h_1 h_{fr} + h_{fr}^2}{R} \right], \text{ при } h_{fr} \in [0; 2R - h_1], \quad (3)$$

где  $h_{fr}$  – глубина проморозки слоя гранул;  $R$  – радиус гранулы сферической формы;  $h_1$  – выступающая над поверхностью льда часть гранулы. Если в качестве материала гранул используется ПВД, а жидкости – пресная вода, из которой между гранулами образуется пресноводный лед, то эта высота может быть определена:

$$h_1 = 10^{-3} \cdot (191,2\sqrt{3} + 18,45) R \approx 349,6 \cdot 10^{-3} R \quad (4)$$

Кроме вышеперечисленных параметров при движении судна в сплошных льдах также важную роль играют силы трения (льдин о корпус и друг с другом) [7]. Классически они рассматриваются подчиняющимся закону Кулона–Амонтона, а значит, для их моделирования достаточно подобрать такой материал модели льда, у которого коэффициенты трения будут равны натурным значениям:

$$\lambda_f = 1, \quad (5)$$

где  $\lambda_f$  – масштаб коэффициентов трения.

При моделировании взаимодействия судна со сплошным ледовым полем основное внимание должно уделяться подобию разрушения последнего. Феноменология этого процесса сложна и не имеет точного математического описания. Поэтому в качестве определяющих параметров будем использовать диаграммы разрушения, полученные при крупномасштабных опытах по разрушению ледяного покрова [8], а для определения условий моделирования – метод функционального подобия [5, 9].

Он основан на кибернетическом подходе, когда сам процесс определения критериев подобия рассматривается как поиск правил, на основе которых устанавливается соответствие между информационными моделями объектов. Процессы разрушения и натурального, и модельного ледяного покрова представляются в виде черных ящиков, структура связей внутри которых не определена, а значит, и подобие структур, представляемых математическими уравнениями, установить невозможно, но при этом подобному воздействию судна соответствует подобная реакция льда, т.е. моделируется лишь функция ледяного покрова как препятствия на пути судна, на преодоление которого нужно затратить определенное (подобное) количество энергии.

В малом ледовом опытовом бассейне НГТУ было проведено исследование процесса разрушения композитного ледяного покрова, составленного из одного слоя гранул сферической формы диаметром 20 мм. Во время экспериментов проводилось нагружение ледового поля вплоть до его полного разрушения по схемам «центральный пролом» и «прокладка канала» аналогично [8], фиксировались диаграммы разрушения в осях «прогиб–сила». Затем измерялись силовые и энергетические параметры этих диаграмм, которые ставились в соответствие натурным таким образом, чтобы выполнялись условия (2). В результате были получены зависимости (рис. 2), называемые «кривые подобия», представляющие собой условия моделирования, при которых

та или иная характеристика диаграммы разрушения (в данном случае – максимальное значение силы  $F_{max}$  и полная работа разрушения  $A_{tot}$ ) подобна натурной.

Как видно из рис. 2, эти кривые не совпадают друг с другом, что указывает на невозможность одновременного моделирования силовых и энергетических характеристик процесса разрушения композитного льда данной конструкции, в том числе при различных схемах проведения эксперимента. В настоящее время нет единого мнения о том, какой из перечисленных параметров является определяющим при движении судна. Традиционным для моделирования является силовой подход [7], однако рядом других авторов [1, 10] указывается, что наиболее правильной характеристикой ледоразрушающих средств являются энергетические затраты. Кроме этого, не установлена стандартная схема тестового опыта при проведении крупномасштабных экспериментов по полному пролому ледяного покрова. Все это не дает возможности заранее отдать предпочтение моделированию по тому или иному параметру, что приводит к необходимости проведения верификационных опытов по буксировке моделей судов с известным ледовым сопротивлением.

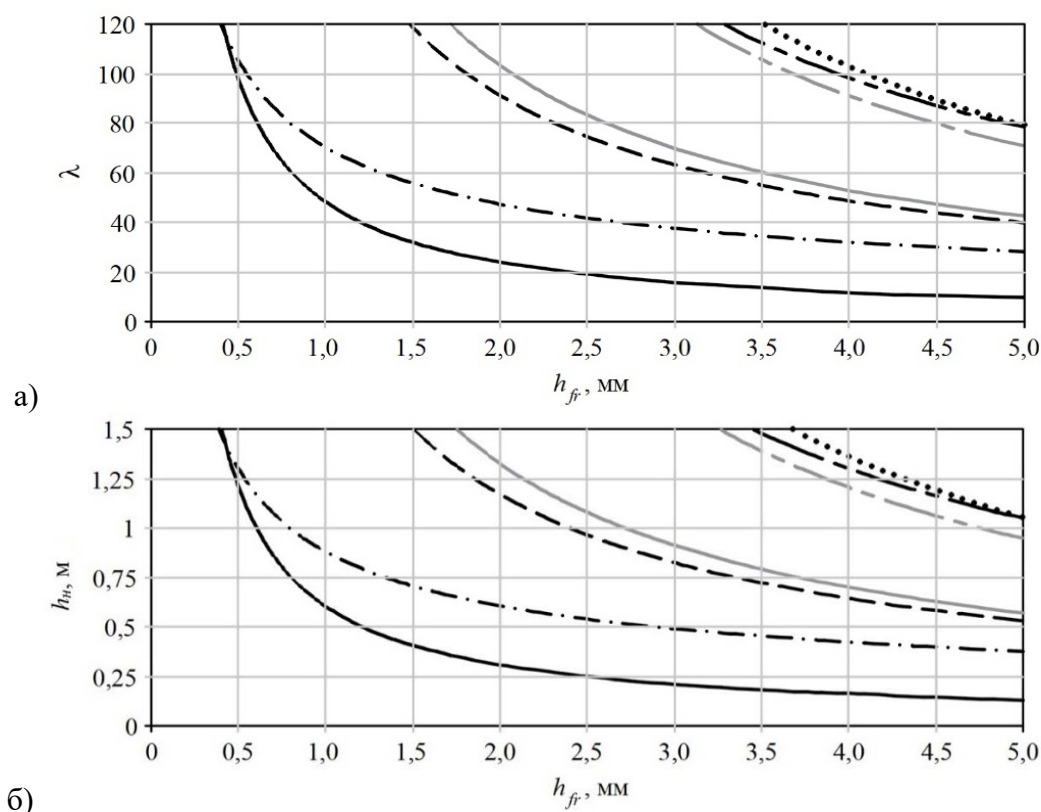


Рис. 2. Кривые подобия:

$h_{fr}$  – глубина проморозки слоя полиэтиленовых гранул;  $\lambda$  – число, равное геометрическому масштабу модели;  $h_n$  – толщина натурального льда;  $F_{max}$  – пиковое значение нагрузки, измеренной в опыте по пролому ледяного покрова;  $A_{tot}$  – суммарная работа, затраченная на его разрушение; условия, при которых следующие параметры процесса разрушения льда подобны натурным: —  $A_{tot}$  при центральном проломе; - - -  $F_{max}$  и — —  $A_{tot}$  в 1-м цикле прокладки канала; . . .  $F_{max}$  и — · —  $A_{tot}$  во 2-м цикле прокладки канала; — - —  $F_{max}$  и — —  $A_{tot}$  в 3-м цикле прокладки канала в модели относительно всех опытов по прокладке канала в натурном льду

**Модельные испытания.** В качестве эталона использовались модели ледокола пр 21900 «Санкт-Петербург», диаграмма ледопроеходимости которого, построенная по результатам ледовых испытаний [11], приведена на рис. 3. В целях проведения настоящего исследования было изготовлено две модели этого судна в масштабах 1:100 и 1:75. Эксперименты проводились в ледовом опытовом бассейне НГТУ с естественным охлаждением, размерами чаши 16×1,6×0,8 м, оборудованном буксировочной системой гравитационного типа. Перед началом опытов подготавливалось модельное поле льда по технологии, повторяющей опыты в малом бассейне. Для этого в воду высыпались полиэтиленовые гранулы сферической формы диаметром 20 мм, которые затем разравнивались до состояния, соответствующего наиболее плотной упаковке кругов на плоскости. Опыты проводились в холодное время года на открытом воздухе. После промерзания гранул на требуемую глубину модель запрягалась в систему и проводился эксперимент (рис. 4). По завершении прохода модели измерялась толщина намороженного слоя льда между гранулами в различных точках бассейна по курсу движения.

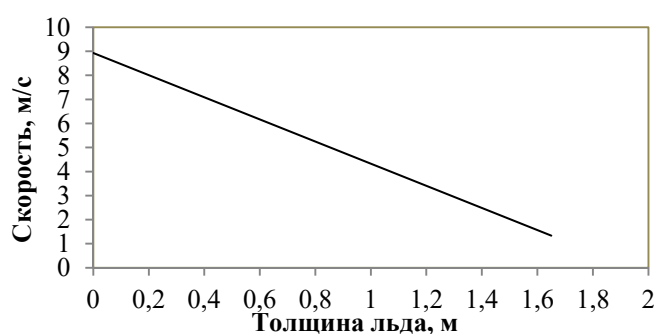
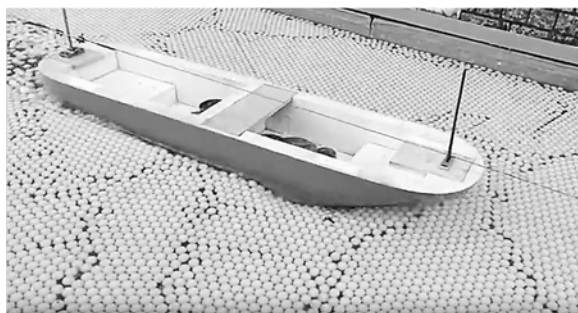
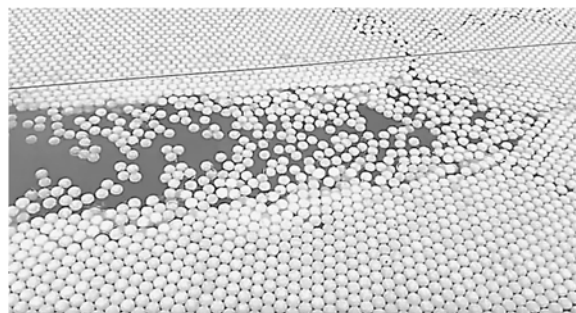


Рис. 3. Диаграмма ледопроеходимости ледокола «Санкт-Петербург»

При проведении эксперимента отмечалась схожесть общей феноменологии наблюдаемых процессов с натурной. Лед при движении модели покрывался сетью радиальных и кольцевых трещин, затем обломки выламывались и подворачивались под корпус. Эти процессы наблюдались как в районе форштевня, так и по бортам в районе носового заострения ватерлинии. Размеры в плане обломков, находящихся в канале, образовавшемся после прохода судна, соответствуют наблюдаемым при движении натурального судна. Тем не менее отмечались единичные случаи отделения гранул от обломков и перемещения их из своих гнезд. Эти случаи не носили такого же массового характера, как при испытаниях Беякова в мелких гранулах [3], и происходили, по-видимому, уже после процесса переворачивания в момент прохождения обломка под днищем корпуса. Это позволяет надеяться на незначительное влияние этого эффекта на измеряемую величину ледового сопротивления, а дальнейшее совершенствование формы гранул и конструкции композитного льда может позволить полностью избавиться от этого явления.



а)



б)

Рис.4. Модельные испытания:

а – фрагмент испытаний; б – канал, образующийся после прохода модели

Проводилась запись скорости движения модели в режиме реального времени, а также величины установленного буксировочного груза. Результаты экспериментов представлены на рис. 5 в виде кривых ледопроеходимости двух моделей. Эти графики имеют вид, несколько отличный от классического. По горизонтальной оси вместо толщины льда отложена глубина проморозки гранул, так как именно она определяет прочностные характеристики, в то время как толщина льда моделируется в основном гранулами, форма которых во всех опытах оставалась неизменной, а значит, приведенная толщина лабораторного льда практически не изменялась. Также на графике были отложены участки кривой ледопроеходимости натурального судна, пересчитанные в соответствующем масштабе по формулам (2), а толщина льда преобразована в толщину проморозки по формуле (3) с учетом геометрических параметров исследуемой конструкции композитного льда.

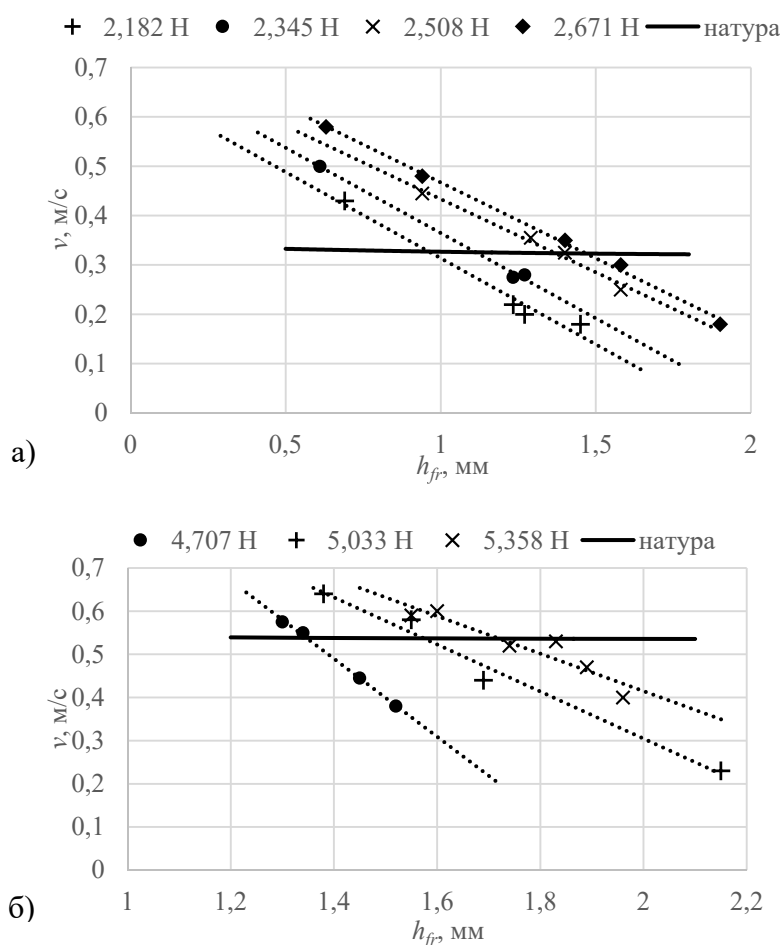


Рис. 5. Диаграммы ледопроеходимости моделей ледокола пр. 21900 в композитном льду, выполненные в масштабах:

$a - 1:100, б - 1:75;$

●, ♦, +, x – сопротивление движению модели;

— пересчитанный в соответствующем масштабе участок диаграммы ледопроеходимости натурального судна

Далее были проведены эксперименты по определению сопротивления воды движению моделей (рис. 6). Для этого после прохода судна в сплошном льду из образовавшегося канала были извлечены обломки композитного льда. Канал также был несколько расширен с целью избежать навала модели на кромку ледового поля. Результаты представлены на рис. 7 в виде кривых сопротивления.

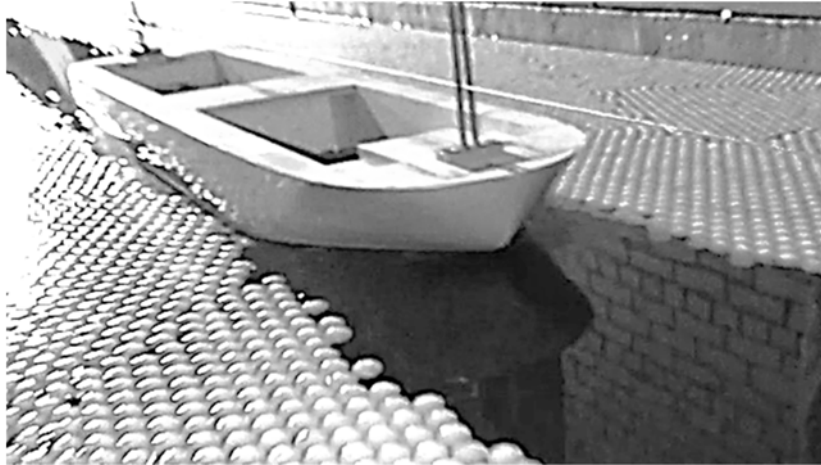


Рис. 6. Фрагмент модельных испытаний ледокола «Санкт-Петербург» пр. 21900 в канале, свободном ото льда

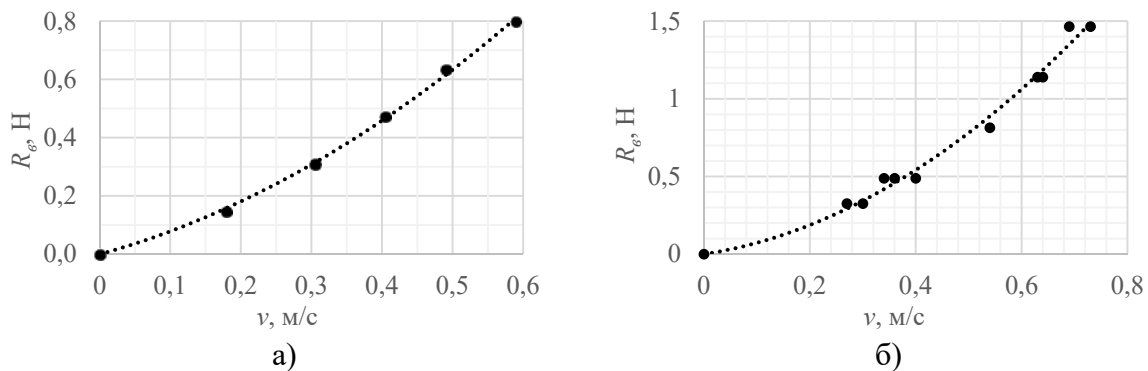


Рис.7. Сопротивление воды движению модели ледокола «Санкт-Петербург» пр. 21900, выполненной в масштабе:  
а – 1:100, б – 1:75

**Определение параметров моделирования ледового сопротивления.** Кривые подобия, представленные на рис. 2, иллюстрируют условия, при выполнении которых тот или иной параметр диаграммы разрушения композитной модели будет подобен натурным. Графики, представленные на рис. 5, отражают информацию о движении модели ледокола как некоего тела определенной формы в композитном льду соответствующей конструкции. Для того, чтобы сделать выводы об условиях моделирования ледового сопротивления, необходимо провести процедуру верификации. Одним из способов выявления искомых параметров служит сопоставление полученных экспериментальных данных с результатами натурных исследований (рис. 3).

Нанесем кривую ледопроеходимости натурального судна на графики, полученные при буксировочных испытаниях в бассейне (рис. 5). Точками их пересечения будет отмечено совпадение условий движения натурального судна и модели – скорость при соответствующей толщине льда. Сравнив силу тяжести буксировочного груза при этих условиях с упором, развиваемым движителями натурального судна, пересчитанным в соответствующий масштаб по (2), можно будет определить характеристики модели, при которых подобны всех три параметра движения судна во льдах. По-видимому, описанная методика является наиболее правильным способом верификации условий моделирования, однако ее применение ограничивается низкой

степенью изученности работы движителей ледоколов. Авторам данной работы не известно ни об одном систематическом экспериментальном исследовании реального сопротивления натурального корпуса судна. В настоящее время любые выводы об упоре, развиваемом винтами судна, движущегося в сплошных льдах, могут носить лишь гипотетический характер и основаны либо на расчетных, либо на других физических моделях, также не прошедших обоснованную процедуру верификации.

Принимая во внимание указанные оговорки, попытаемся определить упор, развиваемый винтами ледокола «Санкт-Петербург» при движении, соответствующем диаграмме ледопроеходимости (рис. 3), используя «метод для морских ледоколов», изложенный в [1]. Согласно этому подходу, устойчивость движения судна в сплошных льдах достигается при выполнении равенства:

$$R_{полн} - P_e = 0, \quad (6)$$

где  $P_e$  – упор, создаваемый движителями судна, может быть определен:

$$P_e = P_{ш} - k_e v, \quad (7)$$

где  $P_{ш} = 1,72 \times 10^6$  Н – тяга на швартовых ледокола «Москва» по данным [12], построенного по тому же проекту, что и «Санкт-Петербург»;  $k_e = 61,5 \times 10^3$  кг/с – коэффициент падения тяги винтов транспортного судна СА-15.

Сопротивление движению судна в сплошных льдах с произвольной скоростью определяется без учета сопротивления воды как сумма:

$$R_{полн} = R_1 + R_2 + R_4 + R_{ск}, \quad (8)$$

где  $R_1$  – сопротивление разрушению льда форштевнем и бортами;  $R_2$  – сопротивление притапливанию и поворачиванию льда;  $R_4$  – сопротивление цилиндрической вставки;  $R_{ск}$  – скоростная составляющая.

Результаты расчета по описанной методике для условий, соответствующих диаграмме ледопроеходимости (см. рис. 3), приведены на рис. 8. Как видно из графика, расчет сопротивления дал несколько завышенные значения, а характер падения тяги не вполне соответствует теоретическим представлениям. Тем не менее порядок полученных величин, по-видимому, соответствует действительности.

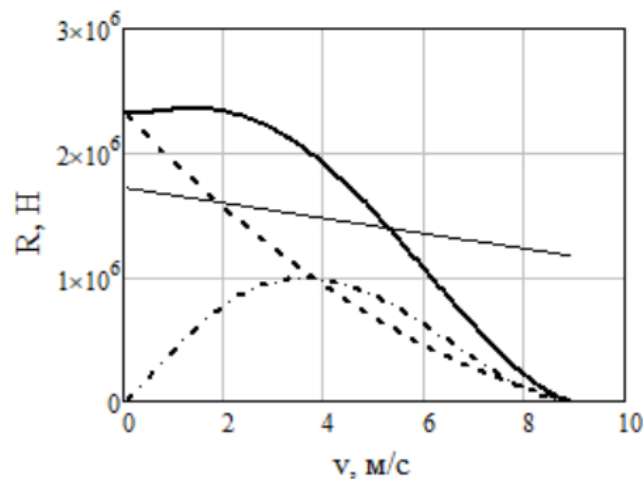


Рис. 8. Расчетные значения сопротивления движению ледокола «Санкт-Петербург» с параметрами, соответствующими кривой ледопроеходимости:

- сопротивление, рассчитанное по методу для морских ледоколов из [1];
- ... составляющая, не зависящая от скорости; -.-.- скоростная составляющая;
- упор винтов, рассчитанный по методу для морских ледоколов из [1]



На следующем этапе совместим кривые сопротивления, полученные на моделях из точек пересечения натурной и модельных диаграмм ледопроеходимости (рис. 5) и из результатов расчета. Так как расчет проводился для чистого ледового сопротивления, то для корректного сравнения необходимо из полученных экспериментальных значений вычесть сопротивление воды движению судна (рис. 7), согласно (1). Получившиеся графики приведены на рис. 9. Точки пересечения расчетных и экспериментальных кривых соответствуют ситуации, когда модель судна при движении с подобной скоростью в сплошных льдах подобной толщины испытывает подобное сопротивление. Нанесем эти точки на кривые подобия композитного льда (см. рис. 2), результат представлен на рис. 10.

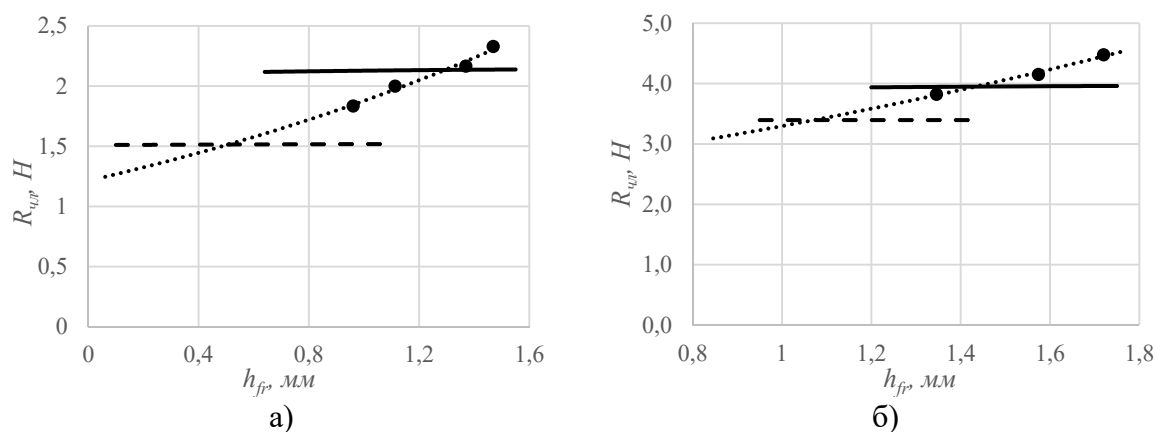


Рис. 9. Экспериментальные и расчетные кривые чистого ледового сопротивления моделей ледокола «Санкт-Петербург» в масштабе:  
 $a - 1:100$ ,  $b - 1:75$ ;

● – точки пересечения кривых ледопроеходимости моделей и натурного судна (рис. 5Рис.); ..... аппроксимация этих точек; — участок кривой ледового сопротивления по (8) и - - - кривой тяги по (7), пересчитанные в масштабе

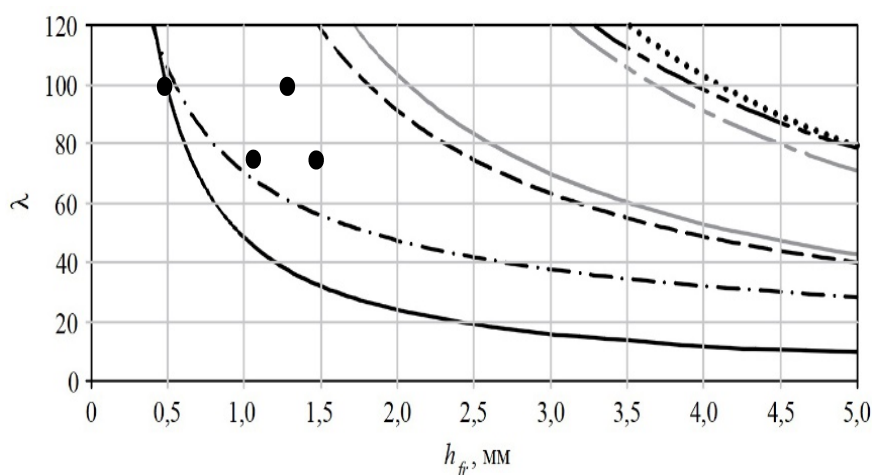


Рис. 10. Кривые подобия (см. рис. 2) с нанесенными результатами экспериментов по буксировке моделей ледокола «Санкт-Петербург» (см. рис. 2)

Всего было получено 4 точки: верхняя пара на рис.10 соответствует модели в масштабе 1:100, нижняя пара – 1:75; левая пара точек – результат пересечения

экспериментальных данных с кривой падения тяги, определенной по (7), правая пара – пересечения экспериментальных данных с кривой сопротивления, определенной по (8).

Из рис. 10 видно, что все точки тяготеют к левой группе кривых, соответствующей таким параметрам композитного льда, когда полная энергия, затрачиваемая на разрушение ледяного покрова по схеме «прокладка канала», определенная как полная площадь диаграммы разрушения, подобна натуре. По-видимому, подобие силовых характеристик диаграмм не является определяющим условием подобия движения судна в сплошном льду, а опыт по схеме «центральный пролом» в недостаточной мере характеризует этот процесс.

### **Заключение**

Проведенное исследование показало, что при определении условий моделирования ледового сопротивления судна с помощью композитной модели ледяного покрова, составленной из одного слоя гранул ПВД сферической формы диаметром 20 мм, следует отдать предпочтение энергетическим характеристикам, полученным в опыте по схеме «прокладка канала». Вместе с этим, точность получаемых результатов может быть ограничена несколькими факторами.

Во-первых, это недостаточное количество натуральных данных по разрушению ледяного покрова. Хотя имеющиеся результаты и позволили сделать некоторые выводы, количество проведенных опытов явно недостаточно и ограничивается только двумя циклами приложения нагрузки. Также остается открытым вопрос о необходимом числе этих циклов в одной серии. При этом имеющиеся данные были получены на пресном льду, в то время как в качестве эталона выступил морской ледекол.

Во-вторых, полностью отсутствуют данные о развиваемом упоре натурального судна во льдах, что в принципе не позволяет дать окончательный ответ о качестве моделирования, а применявшиеся расчетные методики известны своей низкой точностью по сравнению с физическим экспериментом. Используемые в настоящем исследовании натурные данные [11] были получены на льду 2-балльной разрушенности с весьма низкой изгибной прочностью (250 кПа).

Таким образом, представленные результаты следует рассматривать как предварительные, в основном предлагающие методику исследования. Окончательный ответ об адекватности использования того или иного параметра при моделировании ледовой ходкости судов может быть дан только после всестороннего исследования ледового сопротивления различных корпусов судов в различных моделях льда и сравнении полученных результатов.

### **Информация о финансовой поддержке**

Представленные исследования выполнены при финансовой поддержке РФФ в рамках проекта научных исследований № 22-19-00376 «Экспериментально-теоретическое исследование полуэмпирических моделей взаимодействия судов со льдом».

### **Литература**

1. **Ионов Б.П.** Ледовая ходкость судов / Б. П. Ионов, Е. М. Грамузов. СПб.: Судостроение, 2001. 512 с.
2. **Беляков В.Б.** Новая модель льда // Вопросы теории, прочности и проектирования судов, плавающих во льдах: Межвузовский сборник. 1984. С. 48–52.
3. **Беляков В.Б.** Экспериментальное исследование ледопроеходимости судов в новой модели льда // Проектирование средств продления навигации: Межвузовский сборник. 1986. С. 79–83.
4. ИТТС – Recommended Procedures and Guidelines. Resistance Tests in Ice. 7.5-02-04-02.01. ИТТС, 2017.

5. **Веников В.А.** Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики): учеб. пособие для вузов. Изд. 2-е, доп. и перераб. М.: Высшая школа, 1976. 479 с.
6. **Назаров А.Г.** О механическом подобии твердых деформируемых тел (к теории моделирования). Ереван: Изд-во АН Арм. ССР, 1965. 218 с.
7. **Каштелян В.И.** Сопротивление льда движению судна / В. И. Каштелян, И. И. Позняк, А. Я. Рывлин. Л.: Судостроение, 1968. – 239 с.
8. **Зуев В.А.** Экспериментальные исследования разрушения ледяного покрова / В. А. Зуев, Е. М. Грамузов, Ю. А. Двойченко // Вопросы теории, прочности и моделирования судов, плавающих во льдах: межвуз. сб. 1984. С. 4–13.
9. **Себин А.С.** Обоснование подходов к физическому моделированию разрушения ледяного покрова в задачах исследования взаимодействия судов со льдом на основе метода функционального подобия / А. С. Себин, Ю. А. Двойченко // Транспортные системы. 2021. № 3 (21). С. 28–38.
10. **Богородский В.В.** Разрушение льда: методы, технические средства / В. В. Богородский, В. П. Гаврило, О. А. Недошивин. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 232 с.
11. Исследование ледовой ходкости ледокола «Санкт-Петербург» в Карском море / Е. М. Апполонов, В. А. Беляшов, К. Е. Сазонов [и др.] // Судостроение. 2011. № 4. С. 9–12.
12. **Ионов Б.П.** Проектирование ледоколов / Б. П. Ионов, Е. М. Грамузов, В. А. Зуев. СПб.: Судостроение, 2013. 512 с.