

## **ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОГО ВСПЛЫТИЯ ПОДВОДНОЙ ЛОДКИ ИЗ-ПОДО ЛЬДА В ЛЕДОВОМ БАССЕЙНЕ ААНИИ**

*вед. инж. И.А. СВИСТУНОВ, ст. научн. сотр. А.В. ЧЕРНОВ,  
ст. научн. сотр. Н.А. КРУПИНА, канд. техн. наук В.А. ЛИХОМАНОВ,  
мл. научн. сотр. П.В. МАКСИМОВА*

*ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: olks@aari.ru*

Описывается уникальная технология моделирования процессов всплытия подводного объекта из-под льда, разработанная и реализованная в ледовом опытовом бассейне ААНИИ. В соответствии с поставленными задачами была изготовлена модель подводного объекта, оборудованная необходимым измерительным комплексом и сменными макетами элементов конструкции, а также спроектирован и изготовлен специальный экспериментальный стенд для обеспечения статического всплытия модели объекта из-под льда с заданной плавучестью и в заданном положении.

Результаты испытаний показали адекватность выбранной концепции моделирования и возможность ее применения для решения более широкого спектра задач.

*Ключевые слова:* ледовый бассейн, модельный эксперимент, модель подводной лодки, всплытие из-под льда.

Физическое моделирование всплытия подводных объектов из-под льда — актуальная и в то же время сложная задача, требующая оригинального технического подхода. В таких экспериментах необходимо оценить принципиальную возможность проламывания льда подводным объектом, обеспечить качественное подобие процесса всплытия и картины разрушения ледяного покрова, а также измерить ледовую нагрузку, действующую на всплывающий объект. В мировой практике известны только единичные подобные эксперименты, поэтому общепринятая методика их проведения отсутствует.

### **БАЗОВЫЕ ПРИНЦИПЫ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ЛЕДОВОМ БАССЕЙНЕ**

С форсированием природного льда, покрывающего полярные зоны планеты, связано множество инженерно-прикладных задач, направленных на освоение шельфовых месторождений, расширение транспортной морской системы в этих районах и другие нужды современной цивилизации. Особого внимания заслуживает целый комплекс актуальных задач по всплытиям подводных судов в различных ледовых условиях.

Изучение механизма взаимодействия существующих инженерных надводных и подводных объектов с ледяными образованиями сильно затруднено, как из-за большо-

го разнообразия форм последних, так и в силу изменчивости физико-механических характеристик морского льда. Анизотропность льда является основной причиной, по которой на сегодняшний день отсутствует точная аналитическая модель для расчета ледовых нагрузок на сооружения и суда. Таким образом, для адекватных исследований и оценок в данной области довлеющую роль отводят физическому моделированию в специальных ледовых опытовых бассейнах.

Экспериментально-техническая база любого ледового бассейна прежде всего должна обеспечивать проведение модельных испытаний согласно теории подобия (Седов, 1981), которая предъявляет следующие требования, как для модели испытываемого объекта (1), так и для моделируемой среды — льда (2):

$$\frac{L_n}{L_m} = \frac{B_n}{B_m} = \frac{T_n}{T_m} = \lambda, \quad \frac{V_n}{V_m} = \sqrt{\lambda}, \quad \frac{P_n}{P_m} = \lambda^3. \quad (1)$$

$$\frac{h_n}{h_m} = \lambda, \quad f_{fn} = f_{fm}, \quad \frac{E_n}{E_m} = \lambda, \quad \frac{\sigma_n}{\sigma_m} = \lambda, \quad (2)$$

где индекс  $n$  относится к натурным условиям, а индекс  $m$  — к модели;  $\lambda$  — масштабный коэффициент;  $h$  — толщина льда;  $f_f$  — коэффициент трения льда;  $E$  — модуль деформации льда;  $\sigma$  — предел прочности льда на изгиб;  $L, B, T$  — главные размерения испытываемого объекта;  $V$  — скорость движения объекта;  $P$  — массовые силы.

Для моделирования среды, в соответствии с требованием (2), в чаше бассейна по определенной технологии намораживается лабораторный (моделированный) лед, то есть лед, прочностные свойства которого уменьшены по сравнению с аналогичными характеристиками натурального природного льда. В ААНИИ имеется собственная технология приготовления такого льда, защищенная патентом № 2013101426.

Традиционными модельными испытаниями в ледовом бассейне обычно считаются те, которые связаны с оценкой критериев ледовой ходкости судов или оценкой ледовых нагрузок на стационарные сооружения (Ионов, Грамузов, 2001). Со времени открытия первого в мире опытового ледового бассейна (в 1955 г. в ААНИИ) в этом направлении накопился большой опыт проведения модельных экспериментов.

Более сложную задачу, не имеющую такого эмпирического фундамента, представляет собой физическое моделирование всплытий подводных объектов из-под льда. Реализация такого специфического эксперимента требует создания новой технологии.

Ныне действующий ледовый бассейн ГНЦ РФ ААНИИ имеет в своей архитектуре глубоководную яму, что позволило осуществить экспериментальную работу по всплытиям модели подводной лодки из-под льда на базе требований (1) и (2).

### МОДЕЛЬ ПОДВОДНОГО ОБЪЕКТА

Экспериментальная работа по исследованию всплытия подводного объекта из-под льда выполнялась в рамках ФЦП «Развитие гражданской морской техники» по заказу ЦКБ МТ «Рубин». Модель подводной лодки (ПЛ), выбранная в качестве такого объекта, в масштабе 1:50 была изготовлена в модельном цеху ААНИИ в соответствии с эскизами, предоставленными заказчиком. Для достижения заданной плавучести, размещения твердого балласта, установки измерительного оборудования и монтажа системы крепления лодки к испытательному стенду необходимо было разработать такую конструкцию модели, чтобы, с одной стороны, постоянно иметь доступ к

Главные размерения модели подводной лодки

Параметры	Величина, мм
Длина наибольшая	3232
Ширина наибольшая	272
Высота корпуса без рубки	287

внутреннему пространству модели, а с другой стороны — обеспечить полную водонепроницаемость корпуса, даже при нахождении модели под водой на глубине до 6 м. Общий вид трехмерной и физической модели ПЛ представлен на рис. 1 цвет. вклейки, ее основные размерения показаны в табл. 1.

Модель ПЛ состоит из двух основных частей, формирующих при их соединении водонепроницаемый корпус, и выступающих элементов — ограждений выдвижных устройств (ОВУ) и кормовых горизонтальных и вертикального стабилизаторов. Основной корпус предназначен для размещения твердого балласта и измерительного оборудования. С внешней стороны корпуса предусмотрено крепление для тросовой системы, а также вывод информационного кабеля.

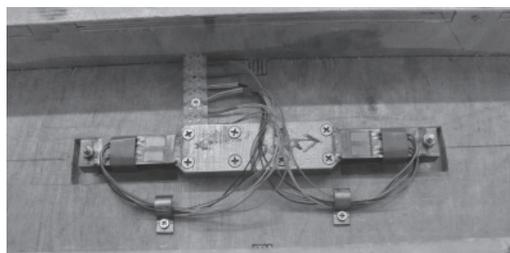


Рис. 2. Тензометрическая балка для измерения ледовых нагрузок на рубку.

Макет ОВУ модели выполнен как отдельный элемент, соединенный с основным корпусом посредством двух опор, каждая из которых связана с тензометрической балкой, расположенной внутри модели, как показано на рис. 2. Аналогичным образом закреплен макет пера вертикального руля. С помощью тензометрии измеряются усилия ото льда на указанные элементы при всплытии модели ПЛ.

На крыше макета ОВУ устанавливаются сменные макеты инденторов, отличающиеся формой и точкой закрепления по длине конструкции (рис. 3). Среди них три инденто-

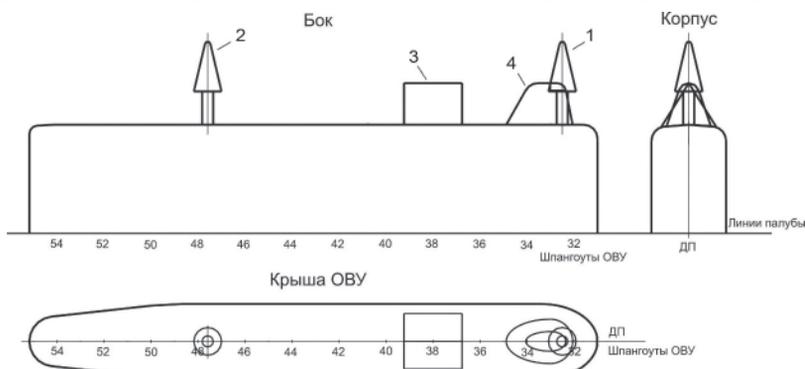
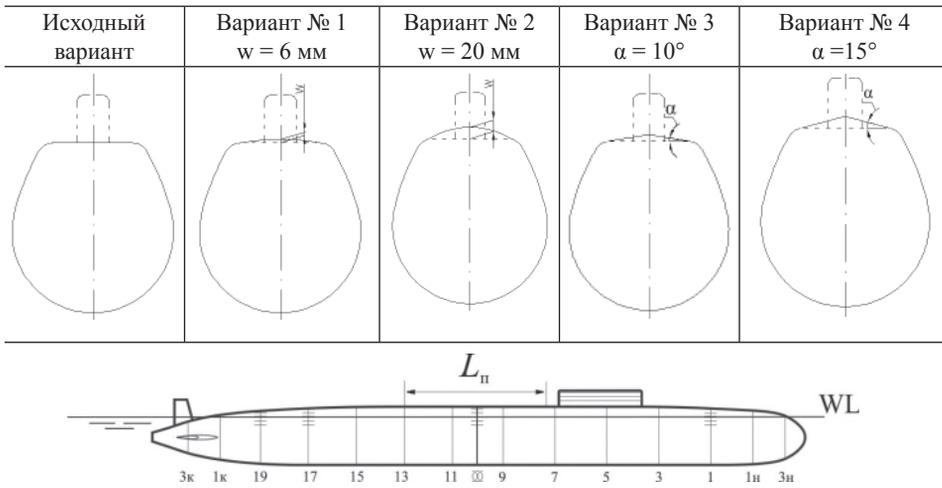


Рис. 3. Расположение инденторов на крыше ОВУ.

Варианты форм палубы надстройки



ра — № 1, 2 и 4, монтируемые в разных частях ОВУ, — предназначены для упреждающего контакта с ледяным полем, нарушающего его целостность. Индентор № 4 имитирует конструкцию, предотвращающую попадание обломков льда в вырезы в крыше ОВУ.

Для надстройки в районе цилиндрической вставки модели предусмотрены сменные макеты палуб, изменяющие исходный плоский вариант формы на цилиндрическую (с погибью) или двускатную геометрию с различными характеристиками (табл. 2). Макеты палуб являются пассивными средствами очистки палубы ото льда.

Среди измерительного оборудования внутри корпуса модели также располагается шестикомпонентный инерциальный измерительный датчик для регистрации кинематических параметров в процессе всплытия и взаимодействия со льдом. Измеряемый сигнал позволяет получить углы крена и дифферента, меняющиеся в процессе всплытия, а также составляющие вектора скорости всплытия.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Исходные данные для создания оригинальной технологии проведения эксперимента определялись кругом вопросов, среди которых ключевыми были следующие: оценка контактных усилий на ограждение выдвигаемых устройств (ОВУ) и перо вертикального руля модели ПЛ при всплытии из-под льда; оценка влияния конструкций крыши ОВУ и инденторов на величину ледовой нагрузки; оценка влияния различных по форме палуб на эффективность очистки поверхностей модели ото льда после всплытия.

Для проведения экспериментов по всплытиям модели ПЛ в ледовом бассейне была спроектирована и реализована система обеспечения погружения-всплытия подводных объектов. Экспериментальная установка, схема которой показана на рис. 4, применительно к модели ПЛ, может погружать ее на заданную глубину, регулировать силу плавучести и изменять первоначальные углы крена и дифферента.

В рамках поставленных задач с помощью экспериментального стенда смоделирован основной (статический) режим всплытия ПЛ из-под льда. Это способ всплытия, при котором происходит приледнение ПЛ на малой скорости и последующее проламывание льда путем постепенного увеличения силы плавучести.

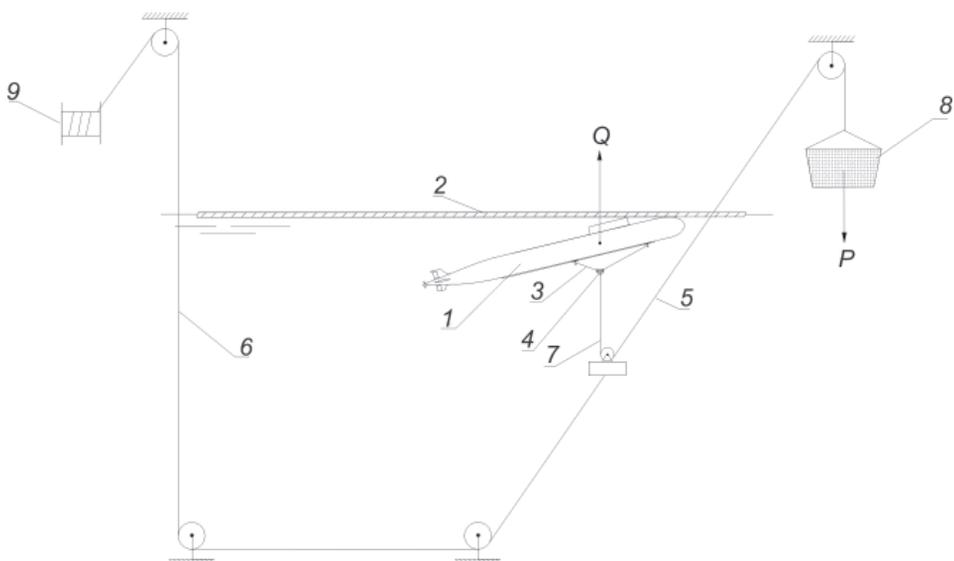


Рис. 4. Схема экспериментальной установки: 1 — модель ПЛ; 2 — поле моделированного льда; 3 — тросовая система, задающая необходимый дифферент модели; 4 — зажимное устройство; 5 — тросовая система, регулирующая запас плавучести модели; 6 — тросовая система, задающая глубину всплытия модели; 7 — плавучий блок с роликом; 8 — корзина с грузами; 9 — лебедка.

#### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для выполнения экспериментов по статическому всплытию модель ПЛ погружается в чистой воде, а на место погружения надвигается моделированное ледяное поле. Предварительно модели задается дифферент на корму, необходимый для обеспечения синхронного контакта с ледяным покровом носовой части корпуса модели и носового скругления ОВУ. Далее модель подводится к нижней поверхности ледяного поля до ее контакта в этих двух точках, как показано на рис. 5.

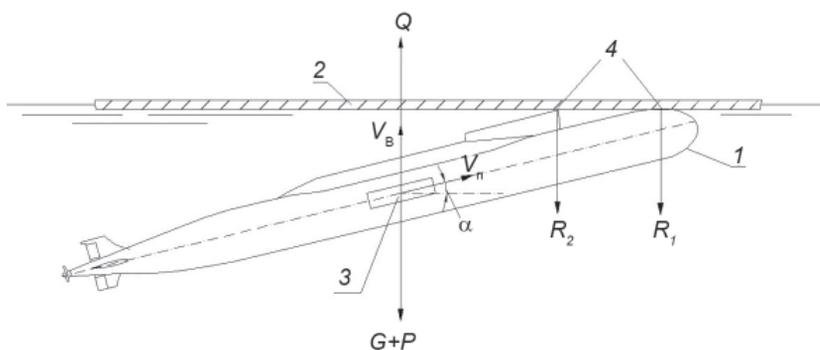


Рис. 5. Схема сил и реакций в эксперименте по статическому всплытию: 1 — модель ПЛ; 2 — поле моделированного льда; 3 — шестикомпонентный измерительный блок; 4 — точки контакта модели со льдом;  $R_1$  и  $R_2$  — элементы ледовой нагрузки;  $G+P$  — сумма постоянного веса модели и переменного (регулируемого) веса корзины с грузами;  $V_b$  и  $V_n$  — вертикальная и поступательная скорости модели;  $\alpha$  — угол дифферента.

Пошаговое освобождение корзины-противовеса от грузов с определенным интервалом времени создает избыточную плавучесть ПЛ, за счет которой увеличивается нагрузка на лед в местах контакта. При этом происходит постепенное продольное спрямление (уменьшение дифферента), приводящее к перераспределению баланса между реакциями  $R_1$  и  $R_2$  в сторону последней. Внешне это выражается образованием ледяного купола в районе взаимодействия лба крыши ОВУ, в котором в конечном счете и происходит первое разрушение ледяного покрова (рис. 6).

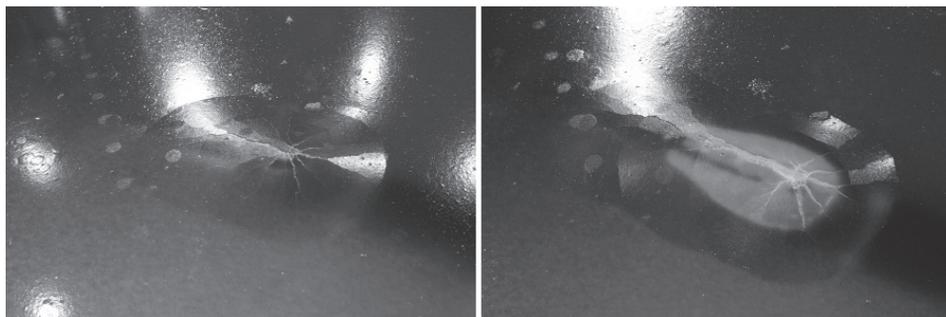


Рис. 6. Образование ледяного купола и развитие трещин внутри него.

После появления ОВУ из-под льда, при дальнейшем извлечении груза-противовеса, площадь пятна контакта со льдом увеличивается — начинает взаимодействовать исследуемый участок палубы надстройки протяженностью  $L_n$  (табл. 2), находящийся кормеее ограждения рубки. По мере спрямления модели в контакте со льдом также начинает участвовать перо вертикального руля, разрушающее лед в месте упора по механизму среза (рис. 7).



Рис. 7. Разрушение льда пером вертикального руля.

Эксперимент заканчивается после того, как модель набирает максимум собственной плавучести  $Q$ , то есть все грузы-противовесы удалены и сила  $P$  отсутствует.

#### АДЕКВАТНОСТЬ ЭКСПЕРИМЕНТА И НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В целом картина разрушения ледяного поля, наблюдаемая по завершении эксперимента, подобна натурной картине в природных ледовых условиях (<http://www.seaforces.org/usnships/ssn/SSN-760-USS-Annapolis.htm>). Для смоделированного всплытия ПЛ также характерны следующие особенности: появление продольных трещин от ОВУ вдоль палубы в сторону кормы; аналогичный механизм разрушения ледяного покрова в районе кормовых выступающих элементов; появление на поверхности льда

обширного по площади слоя воды в районе палубы надстройки со стороны бортов из-за прогиба и образования сквозных трещин в ледяном поле.

Сохраняя эти особенности, картина разрушения льда в модельном эксперименте частично меняется в зависимости от устанавливаемых вариантов макетов палуб и инденторов, а также обусловлена варьируемой толщиной моделированного льда. Визуально эти отличия выражаются главным образом в системе формирующихся трещин и степени очистки поверхностей ото льда после всплытия. Последняя определяется как отношение площади очищенной поверхности к площади покрытой льдом и выражается в процентах.

Представленная технология позволила решить задачи по определению ледовой нагрузки на выступающие элементы и оценить эффективность применения макетов для очистки поверхностей модели ото льда.

На диаграмме (рис. 9 цвет. вклейки) показаны результаты испытаний предложенных вариантов форм палуб надстройки. Диаграмма отображает необходимое количество всплытий модели во льдах различной толщины с каждым из рассматриваемых макетов до полной (95–100 %) очистки поверхностей палубы. Как видно, наибольший эффект проявляется при варианте макета с максимальной погибью (вариант № 2), обеспечивая полную очистку при первом всплытии во льдах толщинами до 22 мм, что соответствует 1,1 м натурным условиям.

Варианты макетов № 1 и 3, как и оригинальная плоская палуба, не смогли выполнить требуемую очистку после первого всплытия (при условии отсутствия крена). Состояние поверхности палубы с перспективным макетом и исходным вариантом показаны на фотографиях рис. 9.

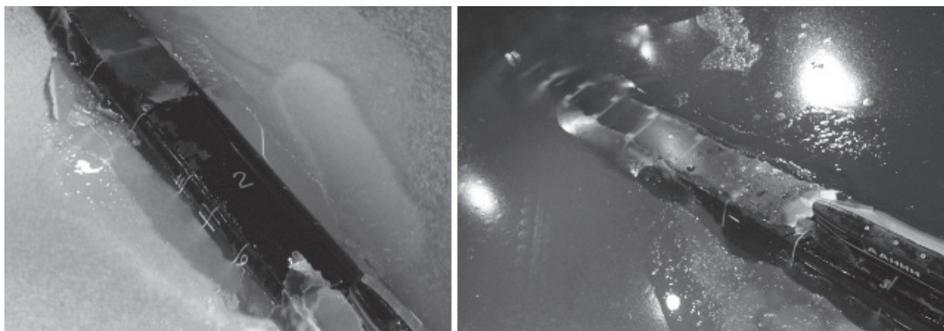


Рис. 9. Разрушение ледяного поля ( $h_m = 22$  мм) всплытием модели с разными формами палубы надстройки: слева — цилиндрическая (с погибью  $w = 20$  мм); справа — плоская (исходный вариант).

На рис. 10–11 цветной вклейки показаны графики, на которых нанесены максимальные усилия на крышу ОВУ и инденторы, при которых происходило разрушение ледяного поля заданной толщины.

Испытания показали, что использование инденторов № 2 и № 3 на ОВУ уменьшает усилие проламывания льда до 30 % в первом случае (эффект «консервного ножа») и до 40 % во втором (эффект «колуна»). Остальные инденторы (№ 1 и № 4) не дают заметного снижения нагрузки.

Стоит отметить, что индентор № 3 по сравнению с остальными макетами наиболее эффективен с точки зрения очистки крыши ограждения рубки ото льда после его

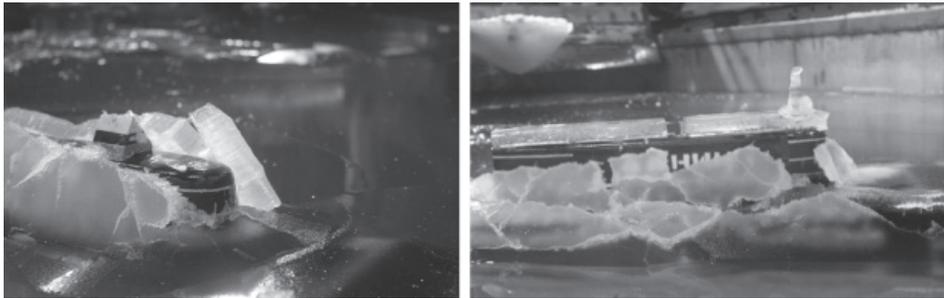


Рис. 12. Разрушение льда ОВУ с инденторами: слева — индентор № 3,  $h_m = 23$  мм; справа — индентор № 1,  $h_m = 14$  мм.

форсирования. На рис. 12 показана картина разрушения ледяного поля ограждением рубки с клиновидным макетом (слева) и индентором № 1 (справа).

На рис. 13 приведены результаты регистрации усилий на перо вертикального руля по данным около 100 экспериментов в моделированном льду толщиной от 13 до 44 мм. Как уже отмечалось выше, перо руля пробивает лед преимущественно по механизму среза (рис. 7). Это обусловлено малой площадью вступающего в контакт торца пера и, соответственно, большим давлением на нижнюю поверхность льда, а также динамическим характером взаимодействия конструкции со льдом в результате стремительного спрямления ПЛ на определенном этапе статического всплытия.

В связи с этим полученные данные имеют значительный разброс, а величина усилия пролома в некоторых случаях остается одинаковой при различных толщинах ледяного покрова.

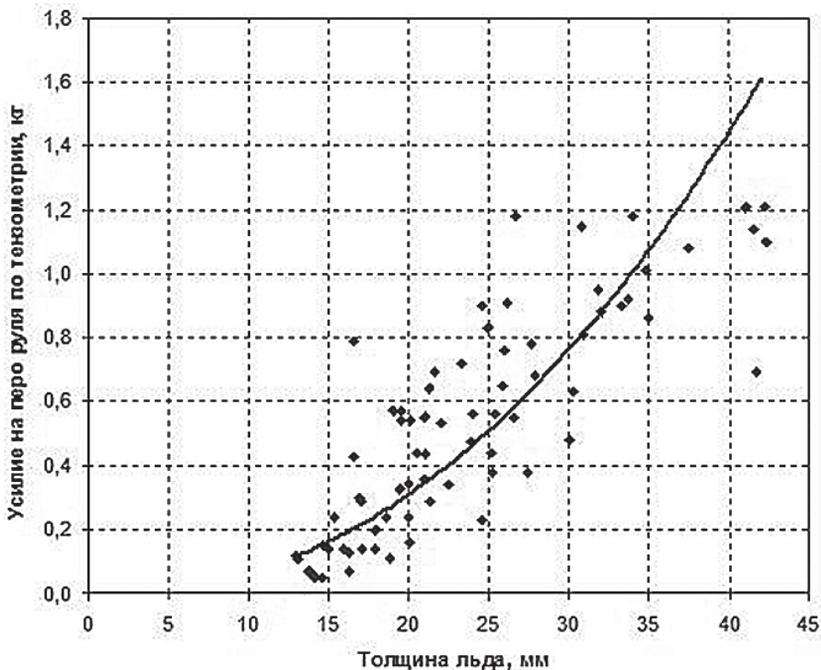


Рис.13. Ледовая нагрузка на перо вертикального руля.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная технология физического моделирования всплытий подводных объектов из-под льда позволила полностью решить требуемые задачи по статическому всплытию ПЛ. В дальнейшем эта же технология была применена для моделирования динамического всплытия (с глубины) модели, а также для статического всплытия с первоначальным креном.

Технология сохраняет свою актуальность и при испытаниях концептуально других моделей подводных объектов для решения задач, связанных с определением ледовой нагрузки на различные участки модели и оценкой эффективности пассивных средств освобождения поверхностей ото льда.

Данный опыт можно рассматривать в качестве научного и практического задела для последующих модельных экспериментов подобного рода, а полученные результаты могут быть использованы для повышения безопасности и эффективности эксплуатации ПЛ в ледовых условиях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

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

*I.A.SVISTUNOV, P.V. MAKSIMOVA, A.V. CHERNOV, N.A. KRUPINA, V.A. LIKHOMANOV*

## PHYSICAL MODELING OF SURFACING UNDERWATER OBJECT FROM UNDER THE ICE IN THE AARI'S ICE TANK

The article describes the particular solution for modeling of the underwater object surfacing from under ice developed for AARI ice tank. In accordance with the tasks underwater object model was made and equipped with the necessary measuring set and interchangeable design elements. It was also designed and built a special experimental facility for static object model surfacing from under the ice with given buoyancy and in a predetermined position.

The test results have shown the adequacy of the chosen modeling concepts and the possibility of its application for solving a wide range of applications.

*Keywords:* ice tank, model test, underwater object, surfacing from under ice.

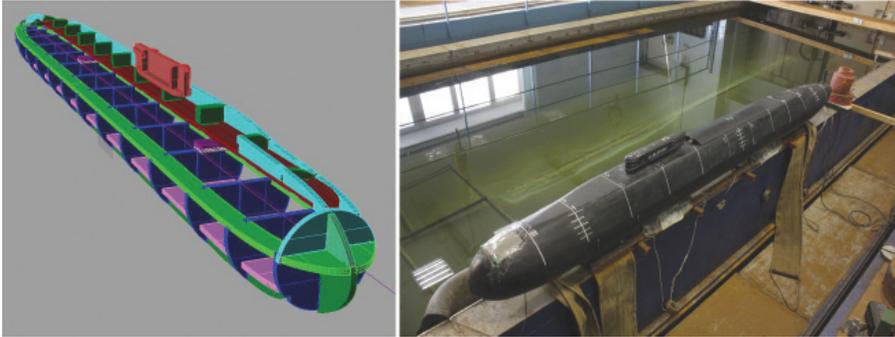


Рис. 1. Трехмерная и физическая модель ПЛ.

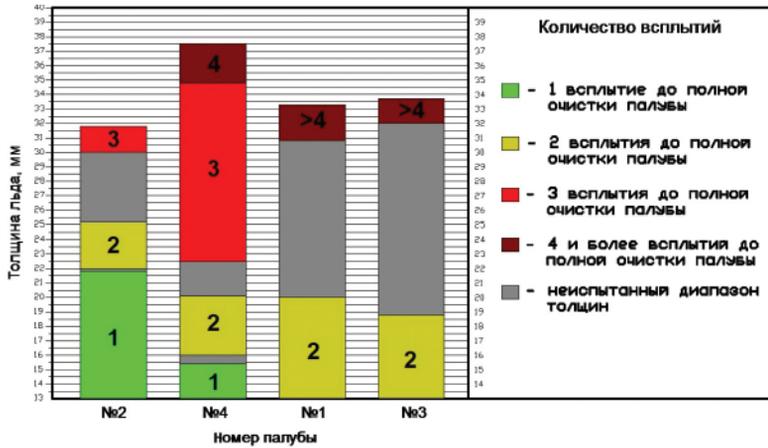


Рис. 9. Результаты экспериментов по очистке палубы.

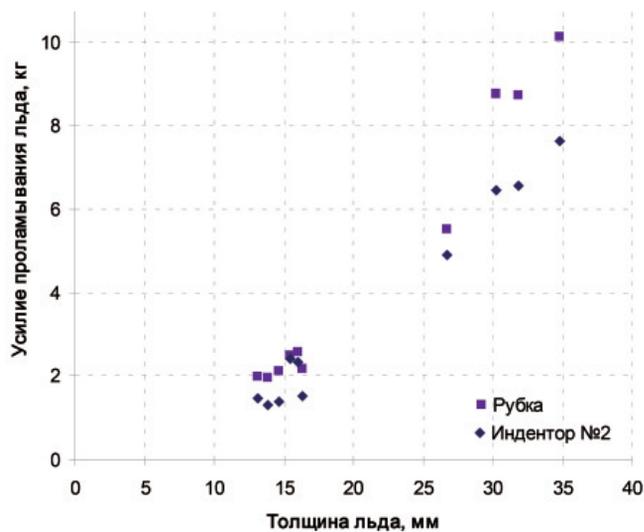


Рис. 10. Усилие проламывания льда на ОВУ и на ОВУ с индентором № 2.

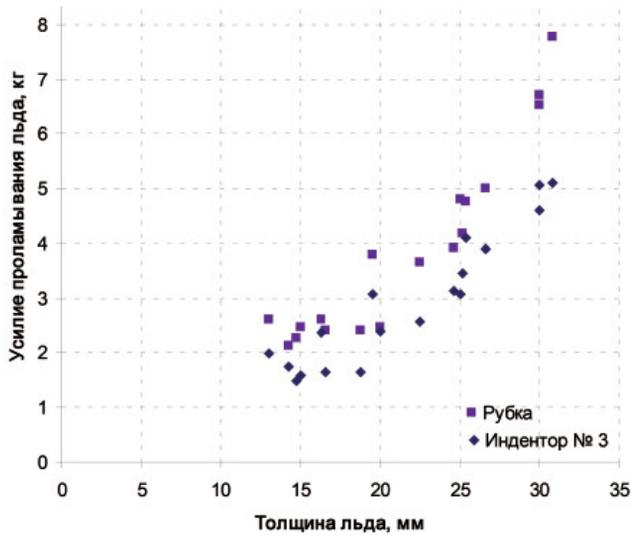


Рис. 11. Усилие проламывания льда на ОВУ и на ОВУ с индентором № 3.

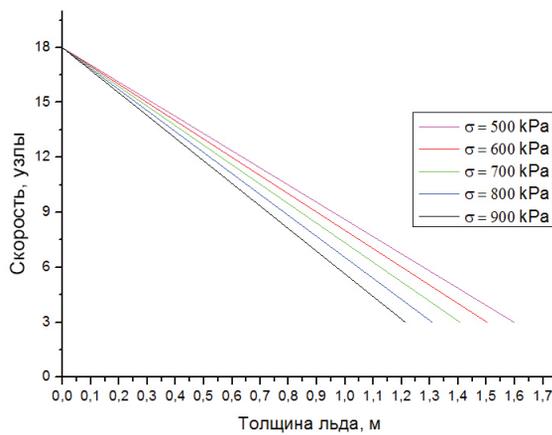


Рис. 1. Пересчет натурной кривой ледопроеходимости на другие значения прочности льда на изгиб.