

УДК 629.12.011

В.С. Антонов¹, Е.М. Грамузов², В.А. Зуев², А.Г. Ларин², Ю.М. Трапезников¹**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ ВСПЛЫТИЯ ПОДВОДНОГО СУДНА В СПЛОШНЫХ ЛЬДАХ**ЦКБ «Малахит»¹,Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²

Экстренное всплытие подводного судна из-под льда возможно при создании разрушающего лед усилия за счет продувания цистерн главного балласта. Проломное усилие зависит от толщины льда, а возможность его создания – от запаса остойчивости судна. Теоретически первая часть проблемы не получила адекватного решения и в данной работе исследуется экспериментально. Вторая часть проблемы нуждается в рациональном выборе архитектурных решений, по которым даны некоторые рекомендации. Работа направлена на безопасность экипажей подводных судов, предназначенных для эксплуатации в ледовых условиях арктических морей.

Ключевые слова: подводное судно, ледовые условия, толщина льда, проломное усилие, экспериментальные исследования, запас остойчивости, архитектурные решения.

Всплытие подводного судна в сплошном ледяном поле может осуществляться, если прикладываемое ко льду вертикальное усилие превышает проломное усилие для ледяного покрова и подводное судно не теряет остойчивость. Под всплытием в данном случае будем понимать пролом сплошного ледяного покрова заданной толщины ограждением рубки, позволяющем безопасный выход экипажа на лед или другие возможности покинуть судно. Удовлетворяющее практику решение этой задачи пока не найдено ни аналитическими, ни численными методами. Поэтому была предпринята попытка ее решения с помощью физического моделирования.

Модельные испытания проводились в специальном ледовом опытовом стенде [1].

В число измеряемых величин были включены наиболее важные факторы, характеризующие одновременно и состояние взаимодействующей со льдом конструкции. К ним относятся вертикальное перемещение штампа, деформирующего ледяной покров и контактное усилие их взаимодействия.

Непрерывная запись во времени этих величин позволяет получить диаграмму деформирования ледяного покрова $P = f(w)$, т.е. зависимость между прогибом w в месте приложения нагрузки и вертикальным усилием P . Причем наиболее полную информацию дает диаграмма, полученная при кинематическом нагружении. В этом случае на всем протяжении деформирования (вплоть до полного пролома) сила, приложенная к ледяному полю, равна реакции пластины на инициированный прогиб. По такой диаграмме можно определить и рассчитать предельные прогиб и нагрузку, энергию разрушения, интегральные упругие характеристики, энергию образования трещин и т.д.

Для решения поставленных вопросов была разработана оригинальная высокопроизводительная методика проведения опытов. Экспериментальная установка описана в [1].

Теория моделирования и пересчет модельного эксперимента на натуру осуществлялись по проверенным схемам [1, 2, 3].

В опытах разрушения льда снизу использовался штамп $\varnothing = 240$ мм, который крепился к штоку динамометра. Штамп вмораживался в ледяной покров и соединялся со штоком $\varnothing 20$ мм, который перемещался вверх при включении машины.

Сигналы датчика перемещения регистрировались программно-аппаратным комплексом. Разработанные программные комплексы включают модуль калибровки датчиков силы и прогиба, модуль автоматической записи показаний датчиков, позволяющий реги-

стрировать показания без участия экспериментатора, и модуль обработки результатов опыта, который производит, пересчет безмерных показаний АЦП к размерным величинам, а также вычисление максимума нагрузки, интегральных характеристик диаграмм разрушения (работы для полного пролома льда), вычерчивает диаграмму разрушения и экспортирует результаты обработки в текстовые файлы. Программно-аппаратный комплекс предназначен для работы в среде Windows.

Результаты испытаний (зависимость максимальных усилий и прогибов при этих усилиях от толщины льда) приведены в табл. 1 и на рис. 1.

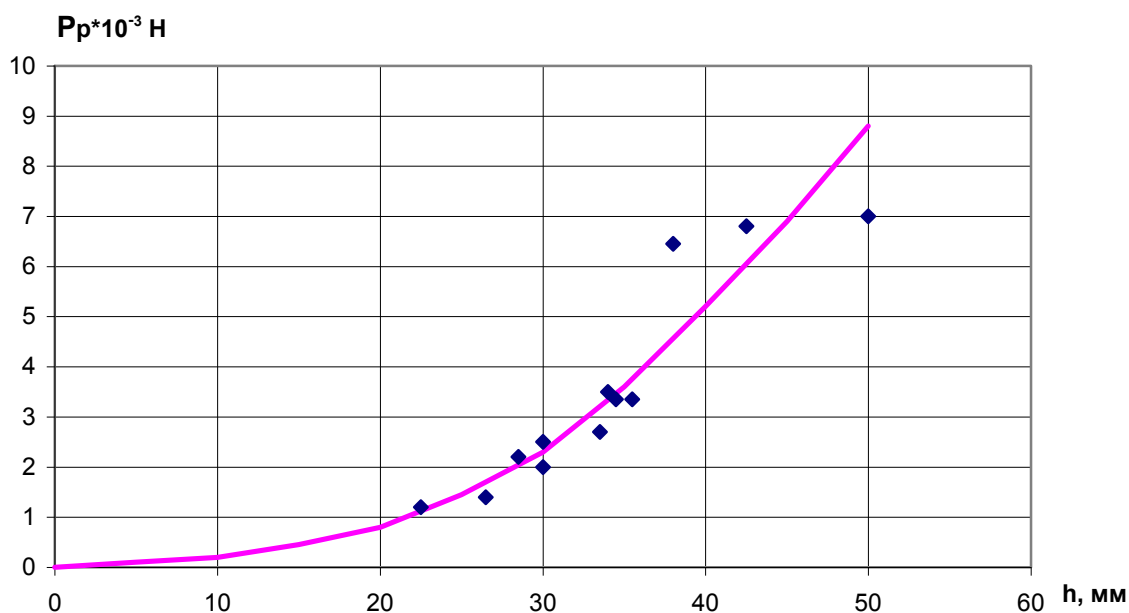


Рис. 1. Зависимость разрушающего усилия от толщины льда при разрушении снизу

Таблица 1

Результаты испытаний при проломе льда снизу

| Толщина льда, мм | Максимальное усилие, Н | Прогиб при максимальном усилии, мм | Параметр упругого основания \square , 1/м |
|------------------|------------------------|------------------------------------|---|
| 35,5 | 3350 | 18 | 0,654 |
| 55,0 | 7080 | 29 | 0,466 |
| 30,0 | 2510 | 19 | 0,734 |
| 26,5 | 1430 | 14 | 0,806 |
| 34,0 | 2700 | 19 | 0,668 |
| 30,0 | 1950 | 12 | 0,734 |
| 42,5 | 6910 | 24 | 0,565 |
| 28,0 | 2200 | 17 | 0,773 |
| 35,0 | 3460 | 29 | 0,654 |
| 22,5 | 1280 | 28 | 0,911 |
| 33,0 | 3710 | 20 | 0,683 |
| 38,0 | 6470 | 26 | 0,615 |

Методика пересчета испытаний моделей объекта с систематически изменяемыми характеристиками базируется на теории моделирования деформирования и разрушения ледяного покрова с помощью пресноводной модели льда, изложенной в [1, 2, 3].

Планирование эксперимента в полном объеме затруднено. Это связано с неизбежной

случайностью толщины ледяного поля в момент проведения испытания. Грубый прогноз толщины намораживаемого льда базируется на времени и температуре воздуха. Но случайные метеорологические факторы (влажность, давление, динамика температуры, ветер) вносят свой вклад в фактическую толщину модели ледяного покрова, которая определяется сразу после разрушения ледяной пластины. Они же вместе с аппаратными случайными погрешностями приводят к некоторому разбросу измеряемых величин и наблюдаемых картин разрушения ледяных пластин. Фактически опыты не обладают высокой степенью повторяемости.

Соотношения геометрических параметров моделей имеют необходимый диапазон изменчивости, но конкретные соотношения параметров проектируемого объекта могут не совпадать с дискретным рядом моделей. Поэтому экспериментальные данные сначала подвергаются предварительной обработке. Строятся диаграммы в координатах сила – прогиб. Численные характеристики диаграмм аппроксимируются полуэмпирическими зависимостями, учитывающими существенные факторы процесса деформирования и разрушения льда. Например, проломное усилие описывается уравнением:

$$P = k' \cdot \sigma_{И} \cdot f\left(\frac{L}{b}, \alpha \cdot \sqrt{S}\right) \cdot \beta \cdot h^2, \quad (1)$$

где $k = k' \cdot \sigma_{И}$ – коэффициент удельной энергии разрушения льда при погружении вмерзшего энерго модуля, кПа; $f\left(\frac{L}{b}, \alpha \cdot \sqrt{S}\right) = \left(1 + 0,02 \cdot \frac{L/b}{\alpha \cdot \sqrt{S}}\right)$ – коэффициент, учитывающий влияние отношения длины нагрузки к ширине нагрузки; $\beta = (1 + 1,3 \cdot \alpha \cdot \sqrt{S})$ – коэффициент, учитывающий влияние площади нагрузки; $\sigma_{И}$ – средняя прочность льда на изгиб в условиях опыта, МПа; $\alpha = \sqrt[4]{\frac{12\rho g(1-\mu^2)}{Eh^3}}$ – параметр упругого основания при изгибе ледяной пластины; E – модуль упругости льда; μ – коэффициент Пуассона для льда; ρ – плотность воды, т/м³; g – ускорение свободного падения, м/с².

Затем рассчитываются кривые для моделей с параметрами вариантов натур. На рисунках приведены экспериментальные кривые для определения проломного усилия при нагружении снизу.

Далее в заданном диапазоне проектируемого объекта, заданных его характеристиках выполняется пересчет данных на натуру.

Пересчет толщины ледяного покрова и проломного усилия выполняется по формулам:

$$h_{н} = h_{м} \lambda^{4/3} \lambda_E^{-1/3}; \quad \lambda_E = \frac{E_{н}}{E_{м}}; \quad (2)$$

$$R_{н} = R_{м} \lambda^3. \quad (3)$$

При всплытии подводного судна в надводное положение в ледовых условиях теоретически возможны следующие варианты развития событий:

- 1) ледяной покров относительно тонкий и судно разрушает его за счет силы остаточной плавучести;
- 2) ледяной покров относительно толстый и судно не может разрушить его за счет силы остаточной плавучести;
- 3) сила остаточной плавучести не может быть использована полностью из-за ограничения прочности контактирующих конструкций или опасности потери остойчивости судна.

Существо проблемы состоит в нахождении границы между первым и вторым вариантами (проблема I), и между первым и третьим вариантами (проблема II) развития событий.

Ключевым вопросом является определение зависимости разрушающего лед усилия от толщины льда с учетом его физико-механических характеристик и формы прикладываемой нагрузки.

Проведенные (описанные ранее) экспериментальные исследования позволяют с использованием методики пересчета получить искомые зависимости для различных размеров и относительных размеров судна.

Проломное усилие при всплытии судна из-под льда в зависимости от толщины льда и солености воды приведено на рис. 2 и 3.

За поверхность контакта со льдом принята площадка с размерами в плане 25×27 м. На рис. 4 и 5 приведены графики проломного усилия в случае контакта с ограждением рубки размерами 4×13 м.

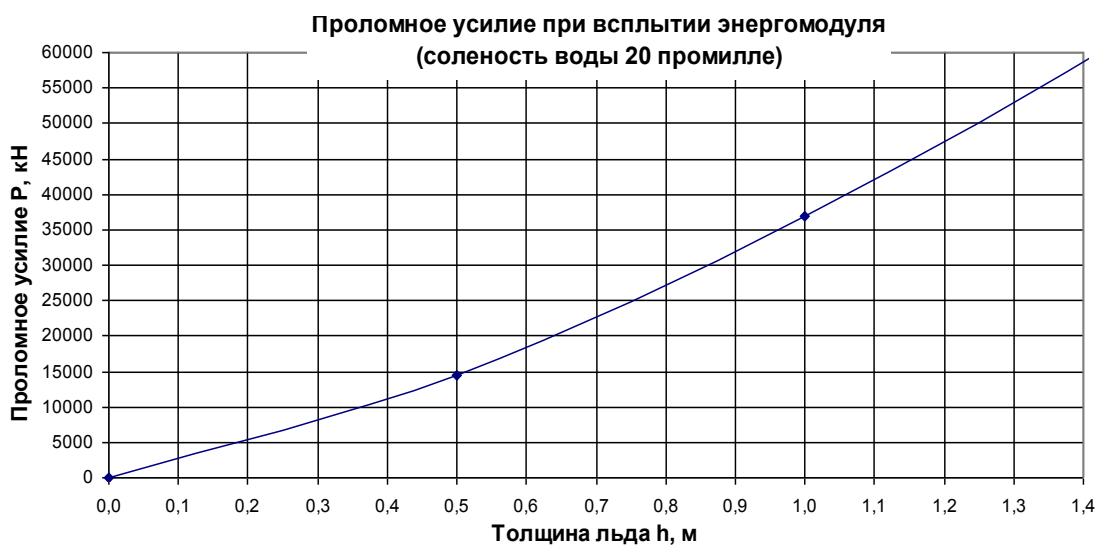


Рис. 2. Пролом площадкой размерами в плане 25×27 м

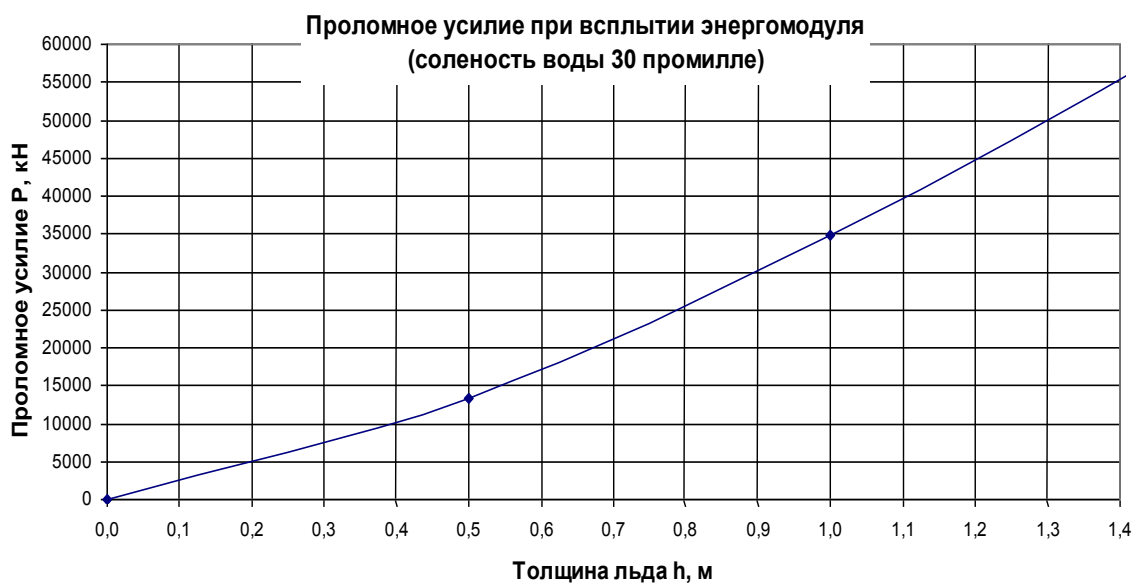


Рис. 3. Пролом площадкой размерами в плане 25×27 м

Расчеты максимальной силы приледнения без потери плавучести для ряда проектов подводных судов показали, что запас плавучести может быть использован приблизительно

на 30%. Это дает основание утверждать, что архитектура этих судов не рациональна с точки зрения всплытия в ледовых условиях.

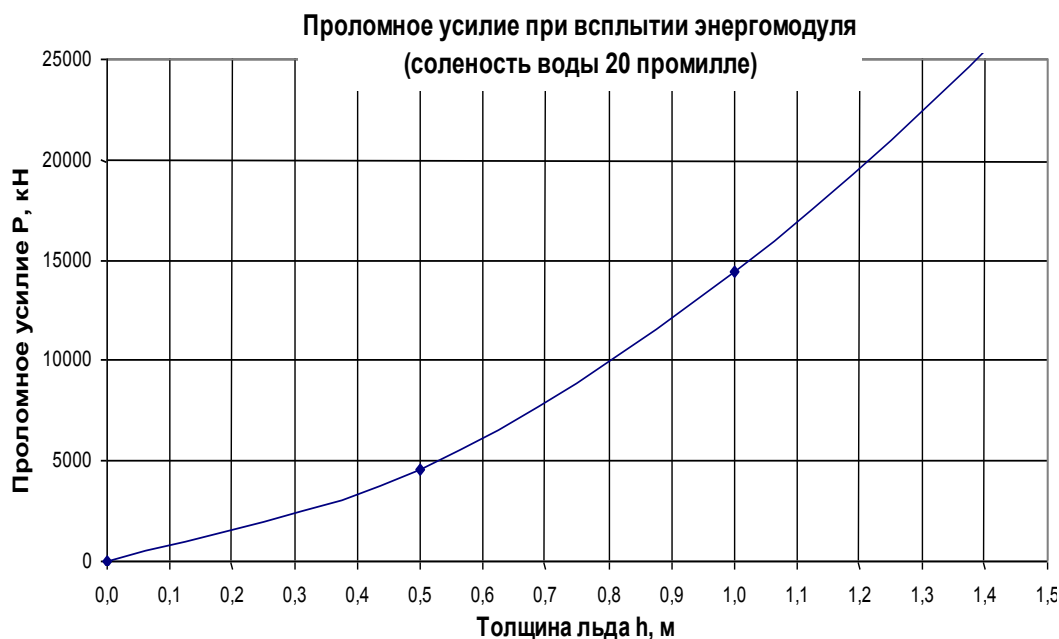


Рис. 4. Пролом ограждением рубки размерами 4×13 м

Для учета влияния ледовых условий на облик и конструктивные особенности подводного воспользуемся формулой расчета проломного усилия, полученной на основе анализа ледовых испытаний (1).

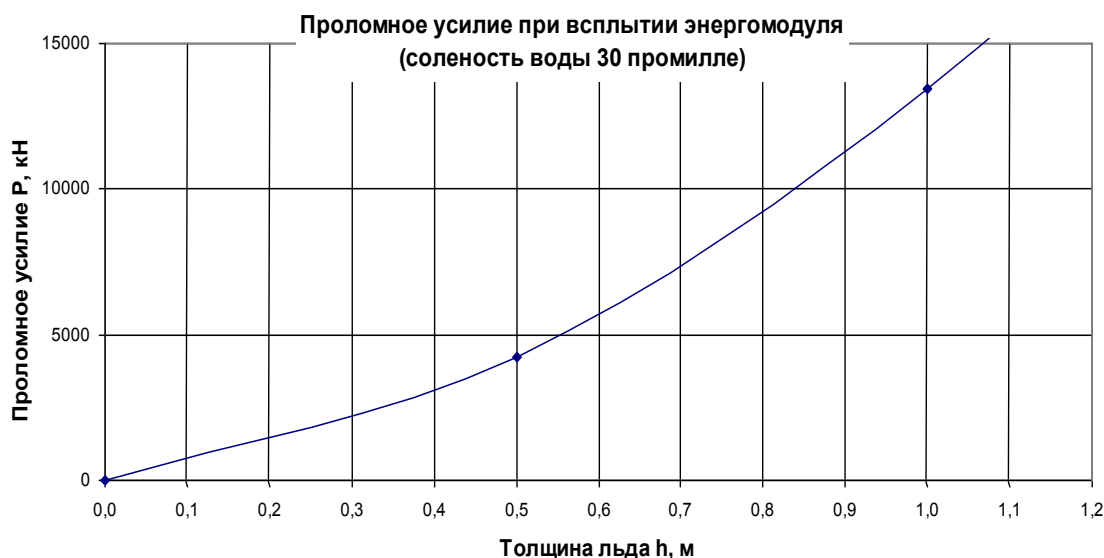


Рис. 5. Пролом ограждением рубки размерами 4×13 м

К снижению проломной нагрузки или к увеличению толщины проламываемого ледяного покрова при всплытии приводит уменьшение площади крыши ограждения рубки, а также уменьшение отношения её длины к ширине l/b .

Повысить разрушающее ледяной покров усилие при всплытии можно за счет продувания ограждения рубки. Для этого необходимо предусмотреть герметизацию крыши ограждения рубки при всплытии во льдах.

Необходимы конструктивные мероприятия по повышению разрушающего лед усилия при всплытии:

- понижение высоты ограждения рубки;
- уменьшение контактной площади крыши ограждения рубки;
- устройство специальных ледовых цистерн в верхней части корпуса, продуваемых при всплытии;
- увеличение подводной остойчивости судна.

Для некоторых рассмотренных проектов толщину проламываемого ледяного покрова, как показали расчеты, можно увеличить вдвое.

Эксплуатационная документация на подводное судно должна содержать инструкцию по эксплуатации в ледовых условиях. Необходимо контролировать соленость воды, температуру воздуха и толщину ледяного покрова.

Библиографический список

1. Антонов, В.С. Экспериментальные исследования возможности погружения подводного судна вмерзшего в лед / В.С. Антонов [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород. 2013. Вып. 4(101). С. 178–184.
2. Зуев, В.А. Средства продления навигации на внутренних водных путях / В.А. Зуев. – Л.: Судостроение, 1986 – 207 с.
3. Ионов, Б.П. Ледовая ходкость судов / Б.П. Ионов, Е.М. Грамузов. – СПб.: Судостроение, 2001. – 512 с.

Дата поступления
в редакцию 29.11.2013

V.C. Antonov¹, E.M. Gramuzov², V.A. Zyev², A.G. Larin², U.M. Trapeznikov¹

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE POSSIBILITY OF ASCENT THE SUBMARINE IN A CONTINUOUS ICE

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev²,
СКВ Malahit¹

Purpose: The work is focused on the safety of the crews of submarines designed for operation in ice conditions of the Arctic seas. This article describes the experimental data and theoretical base to investigate possibility of ascent the submarine in a continuous ice.

Design/methodology/approach: The article provides a methodology for calculating the possibility of ascent the submarine under the ice. The method is based on the theory of modeling. In order to convert to a full-scale ship used experimental data.

Findings: Emergency surfacing of the submarine beneath the ice is possible when creating failure load effort by blowing main ballast tanks. failure load depends on the thickness of the ice, and the possibility of creating a reserve of stability of the vessel. Theoretically, the first part of the problem has not been adequately resolved and in this paper we investigate experimentally. The second part of the problem needs to be a rational choice of architectural solutions, which provides some guidance.

Research limitations/implications: The size of the article doesn't allow to present detailed results of end-use measurements.

Originality/value: First studies have been conducted and the results obtained for this type of vessel.

Key words: ice cover, ice conditions, margin of stability, failure load, experimental studies, submarine, architectural solutions.