

УДК 539.3:532.59

© В. Л. Земляк¹, А. В. Погорелова², В. М. Козин², Н. О. Баурин¹

¹Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема, г. Биробиджан

²Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре
vellkom@list.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ КОРПУСА ПОДВОДНОГО СУДНА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ИЗГИБНО-ГРАВИТАЦИОННЫМИ ВОЛНАМИ

Представлено экспериментальное и теоретическое исследование влияния особенностей формы корпуса подводного судна (относительного удлинения и водоизмещения) на эффективность разрушения ледяного покрова изгибно-гравитационными волнами. Эксперименты проводились в опытовом ледовом бассейне размерами $L \times B \times H = 10 \times 3 \times 1$ м с использованием моделей подводных судов в масштабе 1:100. Модель ледяного покрова приготавливалась путем намораживания льда заданной толщины естественным холодом. Для проведения опытов была спроектирована и изготовлена необходимая оснастка и сформирован измерительный комплекс для регистрации колебаний модельного льда. В процессе буксировки моделей определялась скорость их движения, и записывались профили взволнованной поверхности льда. В ходе экспериментов анализировалась кривизна возбуждаемых изгибно-гравитационных волн, т. е. отношение прогибов к длине волны и возможность полного разрушения ледяной пластины. В теоретической части работы использовались ранее полученные аналитические интегральные зависимости для расчета прогибов плавающей упругой пластины при прямолинейном нестационарном движении тонкого почти осесимметричного тела вблизи поверхности раздела вода-пластина. Достоверность расчетов подтверждена путем сопоставления результатов с данными экспериментов разрушения естественного льда изгибно-гравитационными волнами. Полученные результаты показывают, что волнообразование в ледяном покрове и эффективность его разрушения существенно зависят от относительного удлинения и водоизмещения погруженного тела, а также скорости его перемещения и глубины погружения.

Ключевые слова: подводное судно, лед, изгибно-гравитационные волны.

V. L. Zemlyak¹, A. V. Pogorelova², V. M. Kozin², N. O. Baurin¹

¹Sholom-Aleichem Priamursky State University, Birobidzhan, Russia

²Institute of Machining and Metallurgy, FEB RAS, Komsomolsk-on-Amur, Russia
vellkom@list.ru

STUDY OF INFLUENCE OF THE SUBMARINE VESSEL'S FORM ON THE EFFECTIVENESS OF THE ICE COVER FAILURE BY FLEXURAL-GRAVITY WAVES

The paper is devoted to the experimental and theoretical research of the influence of peculiarities of the form of a submarine vessel (depending on its lengthening and displacement) on the efficiency of breaking ice cover by flexural-gravity waves. The experiments were carried out in a natural fresh-water pond with the following parameters $L \times B \times H = 10 \times 3 \times 1$ m using model underwater vessels (a scale of 1:100). The model ice cover of necessary thickness was prepared by natural freezing. The necessary equipment was designed and made for the experiments to be carried out and a measuring complex for registration of deflections of model ice was formed. By towing the model SV its velocity was determined and the profiles of deflections in the ice cover were registered. In the course of experiments the curve caused by flexural-gravity waves was studied, namely the attitude of deflection to the lengths and amplitudes and the possibility of complete destruction of the ice plate. In the theoretical part of the work previously received analytical integral dependence is referred to, to calculate the deflection of the floating plate with rectilinear unsteady motion of a slender and almost axisymmetric body near the water surface. The authenticity of calculations is proved by the comparison of the results with experiments data of ice breaking by flexural-gravity waves. The results show that wave formation in the ice cover and the efficiency of its destruction essentially depend on relative lengthening and displacement of an underwater body as well as on the speed of its motion and the depth of its immersion.

Key words: flexural-gravity waves, ice, elastic plate, critical velocity.

На сегодняшний день существует большое количество работ, посвященных теоретическим и экспериментальным исследованиям движения нагрузки по ледяному покрову [1, 2]. Однако проблема возникновения изгибно-гравитационных волн (ИГВ) при движении погруженного твердого тела вблизи нижней поверхности льда изучена недостаточно. Из последних теоретических работ стоит отметить работы [3, 4]. В работе [5] показана возможность разрушения естественного льда изгибно-гравитационными волнами от движения модели подводного судна (ПС) с относительным удлинением $L/B = 8$ (где L — длина судна, B — ширина судна) и полным подводным водоизмещением равным $D_n = 6000$ т после пересчета на натуру. Ранее в работах авторами исследовалось влияние неоднородностей в виде продольной трещины и разводий различной ширины [6], а также глубины акватории на эффективность всплытия подводных судов в ледяном покрове [7, 8].

С практической точки зрения было бы актуально провести исследования возможности разрушения ледяного покрова изгибно-гравитационными волнами от движения моделей подводных судов находящихся в эксплуатации.

Целью работы является исследование влияния особенностей формы корпуса подводных судов на эффективность разрушения ледяного покрова изгибно-гравитационными волнами.

Экспериментальные исследования

Для проведения экспериментов было изготовлено три упрощенных модели в виде эллипсоидов вращения (сфероидов) существующих подводных судов в масштабе $\lambda_1 = 1:100$ с сохранением их основных параметров — относительного удлинения и водоизмещения. Объем выступающих частей был распределен по всему объему изготовленных моделей (рис. 1). Модели имели следующие характеристики: модель № 1 имела $L = 1.6$ м, $B = 0.12$ м и соответствовала субмарине с водоизмещением $D_n = 18\,000$ т (проект 667 БДРМ); модель № 2 — $L = 1.385$ м, $B = 0.165$ м и соответствовала субмарине с водоизмещением $D_n = 24\,000$ т (проект 949 А); модель № 3 — $L = 1.12$ м, $B = 0.14$ м и соответствовала субмарине с водоизмещением $D_n = 12\,000$ т (проект 971).

Экспериментальные исследования движения моделей подводных судов проводились в ледовом бассейне лаборатории «Ледотехники» Приамурского государственного университета имени Шолом-Алейхема (Россия, г. Биробиджан) (рис. 2) [9]. Длина бассейна 10 м, ширина 3 м, а уровень воды в чаше бассейна составлял не менее 1 м. Масштаб моделирования $\lambda_1 = 1:100$ выбирался исходя из размеров ледового бассейна, при этом длина бассейна обеспечивала выход на стационарный режим движения моделей судов (от 4.2 до 5.6 м в зависимости от длины моделей). Ширина была достаточной для исключения влияния отраженных от боковых стенок канала волн на основную волновую систему [10].

Для проведения экспериментов была спроектирована и изготовлена необходимая оснастка и сформирован измерительный комплекс для регистрации колебаний модельного льда. В процессе буксировки модели определялась скорость ее движения, и записывались профили взволнованной поверхности льда. Для записи колебаний модельного льда использовались бесконтактные лазерные датчики LAS-Z компании WayCon (Германия). Профили ИГВ записывались с помощью программы Test.viewer 2.34 (рис. 3). Программа сохраняла полученный массив данных в файл формата Excel. Необходимая информация для определения параметров ИГВ (величина прогиба и длины волны) бралась из массива данных. Движение моделей осуществлялось с помощью сервопривода СПШ20 компании Сервотехника (Россия) (рис. 4). Скорость перемещения моделей ПС определялась

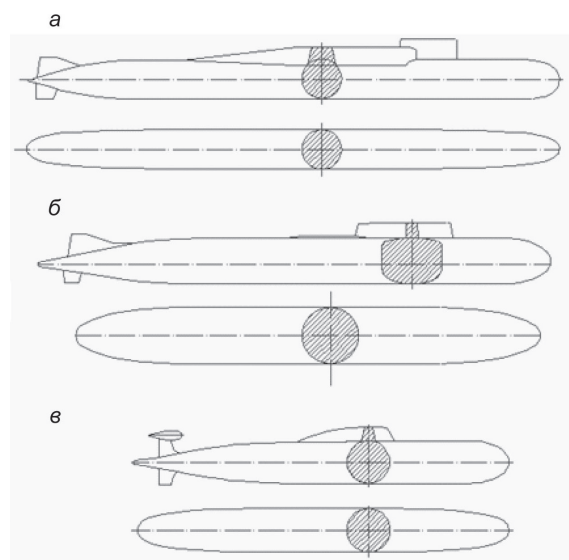


Рис. 1. Схемы моделей подводных судов.

- a* — модель № 1 (проект 667 БДРМ);
- б* — модель № 2 (проект 949А);
- в* — модель № 3 (проект 971).



Рис. 2. Общий вид ледового бассейна.

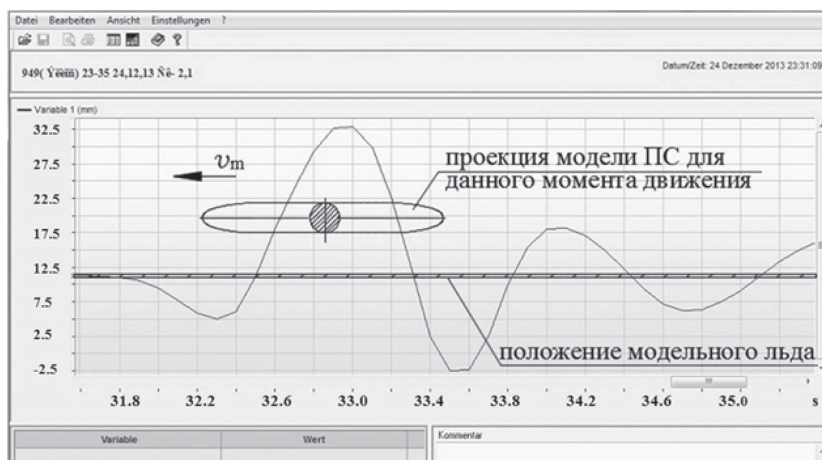


Рис. 3. Профиль ИГВ (изображение профиля волны перевернуто).

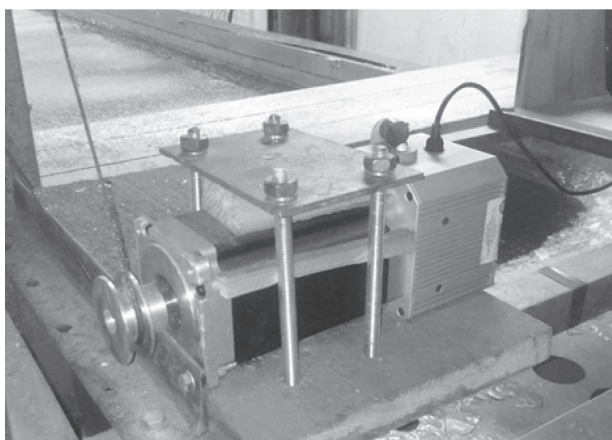


Рис. 4. Сервопривод СППШ20.

ем различных моделей льда, для каждой из которых имеются соответствующие условия подоби́я. Обычно моделирование выполняют с частичным выполнением условий подоби́я [5]:

с помощью двух оптоэлектрических датчиков П-образной формы, устанавливаемых на расстоянии 1 м друг от друга вдоль траектории движения моделей над буксировочным тросом и фиксирующим интервал времени, за который модели преодолевали это расстояние. Буксировочная система позволяла проводить испытания моделей при скоростях до 2.7 м/с в режиме установившегося движения. Конструктивно система была выполнена в виде двух рам, устанавливаемых по разные стороны бассейна и оснащенных подвижными балками с блоками проводки бесконечного буксировочного троса (рис. 5).

Моделирование естественного ледяного покрова может осуществляться с использованием

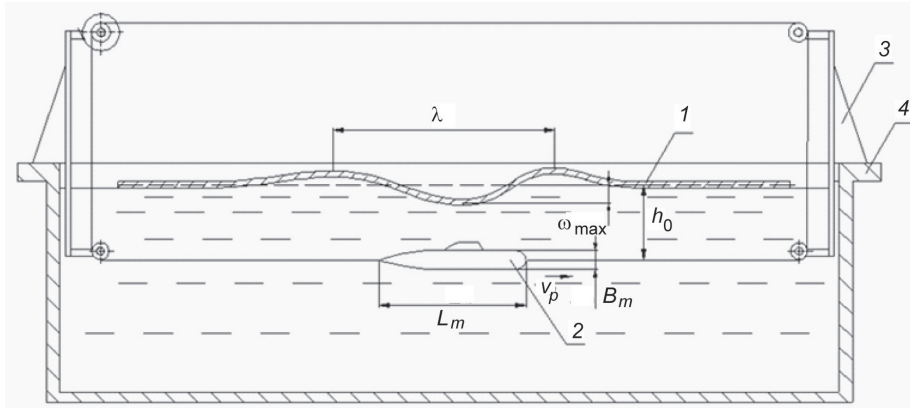


Рис. 5. Схема буксировочной системы.

1 — модельный лед; 2 — модель подводного судна; 3 — стойки буксировочной системы с блоками проводки бесконечного буксировочного троса; 4 — чаша бассейна.

$$\lambda_E = \lambda_\sigma = \lambda_w = \lambda_h = \lambda_1,$$

где λ_E — масштаб моделирования по модулю Юнга; λ_σ — масштаб моделирования по напряжениям; λ_w — масштаб моделирования по прогибам; λ_h — масштаб моделирования по толщине льда; λ_1 — геометрический масштаб.

Требования условий подобия в отношении коэффициента Пуассона ν и плотности ρ модельного льда также должны выполняться.

Модель судна геометрически подобна натурному судну, а их водоизмещения пропорциональны кубу модуля геометрического масштаба

$$L_n/L_m = \lambda_1, D_n/D_m = \lambda_1^3,$$

где L_n — длина натурного ПС; L_m — длина модели ПС; D_n — водоизмещение натурного ПС; D_m — водоизмещение модели ПС.

Скорость движения модели u_m определяется условием подобия

$$u_n/u_m = \lambda_1^{1/2},$$

где u_n — скорость движения натурного ПС.

Параметры модельных ИГВ следует пересчитывать на натуру согласно соотношениям для длины и прогиба льда

$$\lambda_n/\lambda_m = w_n/w_m = \lambda_1,$$

где λ_n — длина натуральных ИГВ; λ_m — длина модельных ИГВ; w_n — прогиб натурального льда; w_m — прогиб модельного льда.

Модель ледяного покрова приготавливалась в ледовом бассейне намораживанием естественного льда заданной толщины (3 мм) естественным холодом при температуре воздуха $t = -(9-15)^\circ\text{C}$. При использовании естественного льда в качестве модельного толщина моделируемого ледяного покрова будет пересчитываться на натуру по следующей зависимости:

$$h_n = h_m \lambda_1^{4/3} ([\sigma_u]_n / [\sigma_u]_m)^{-1/3},$$

где h_n — толщина натурального льда; h_m — толщина модельного льда; $[\sigma_u]_n$ — предел прочности натурального льда на изгиб; $[\sigma_u]_m$ — предел прочности модельного льда на изгиб.

Определение изгибной прочности модельного льда производилось экспериментально, путем испытания консолей на плаву в соответствии с рекомендациями работы [11], для этого использовался намораживаемый модельный лед толщиной $h_m = 3$ мм. Консоли П-образной формы габаритами $l \times b = 15 \times 45$ мм приготавливаются в модельном льду путем выпиливания по штампу вращающимся инструментом Dremel. Усилие, затрачиваемое на разрушения консоли, определялось с помощью электронного динамометра Mark-10 (USA) (рис. 6).

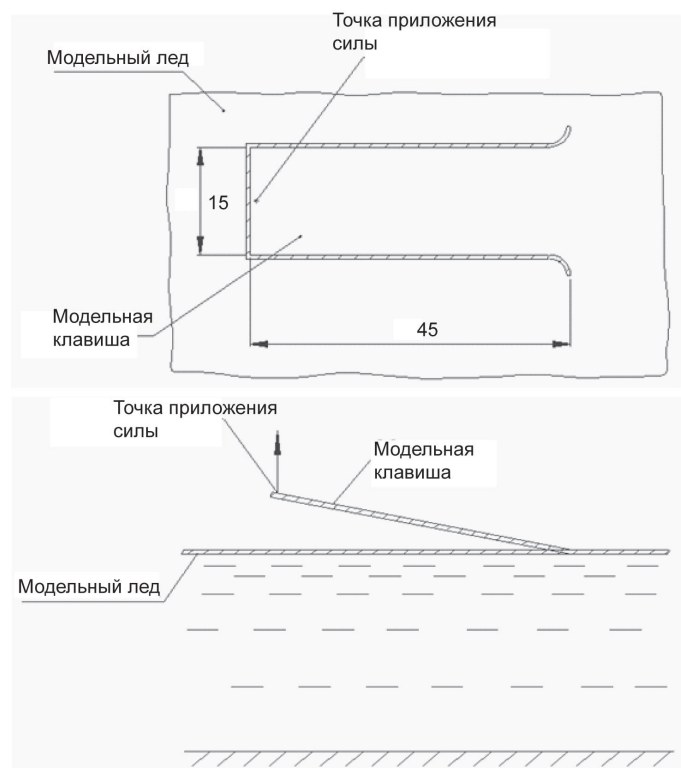


Рис. 6. Схема определения изгибной прочности модельного льда.

Известно, что при моделировании морского льда с помощью пресноводного $E_n < E_m$, (где E_n — модуль Юнга натурального морского льда; E_m — модуль Юнга модельного пресноводного льда) однако соотношение E/σ_u для морского и пресноводного льдов практически не отличается. Соблюдение этого условия при моделировании льда чрезвычайно важно [12].

Чтобы картина трещинообразования была видна более ярко, после формирования модельного поля лед посыпался тонким слоем снега.

В качестве критерия разрушения модельного льда использовался коэффициент α , показывающий зависимость между углом наклона ледяной пластины и ее разрушением.

Рассматриваемая зависимость была установлена эмпирически в экспериментальной работе [5]. При этом проводились серии модельных экспериментов по разрушению натурального ледяного покрова различной толщины при помощи моделей подводного судна и судов на воздушной подушке. И для движения нагрузки по льду, и для движения погруженного тела было получено, что в случае, когда величина коэффициента α превышает значение 0.04, происходит полное разрушения льда и раскрытие трещин. Значение α определялось по формуле

$$\alpha = 2\pi w_m / \lambda_m.$$

Так как значение критерия полного разрушения получено для пресноводного льда, то его использование для оценки разрушения морского льда не совсем корректно. Однако если учесть, что прочность и трещиностойкость морского льда ниже чем пресноводного, то значение α для морского льда должно быть несколько меньшим.

Модельные эксперименты проводились при скоростях $u_m = 1.6$ – 2.3 м/с и глубине погружения $d_m = 0.2$ м и толщине модельного льда $h_m = 3$ мм, что после пересчета на натуру равно соответственно $u_n = 16$ – 23 м/с, $d_n = 20$ м и $h_n = 2$ м.

Основные результаты экспериментов показаны на рис. 7. На рис. 7, б представлены результаты по определению значения коэффициента α в зависимости от скорости движения моделей подводных судов.

Из рис. 7, б видно, что при перемещении моделей № 2, 3 с критической скоростью равной порядка $u_m = 2.1$ м/с формировались изгибно-гравитационные волны наибольшей интенсивности,

что приводило к полному разрушению ледяного поля (рис. 8, а, б) и раскрытию трещин. Стоит отметить, что достаточно эффективное разрушение льда происходило при движении моделей № 2 и 3 как с меньшими, так и с большими скоростями (рис. 8, в). Разрушение льда изгибно-гравитационными волнами от движения модели № 1 было наименее эффективно, что связано со значительно величиной отношения $L/B = 13.3$ (рис. 8, з).

Полученные эксперименты показали, что наибольшей ледоразрушающей способностью должны обладать подводные лодки пр. 949А, так при движении модели № 2, соответствующей по своим основным характеристикам после пересчета на натуру этим субмаринам, наблюдалось не только полное разрушение и потеря несущей способности льда, но и измельчение льдин (рис. 8, б).

Теоретические исследования

Ввиду сложности и больших временных затрат на проведение модельных экспериментов была выполнена серия теоретических расчетов для определения оптимальных соотношений длины и ширины рассматриваемых субмарин.

Для теоретических исследований влияния формы субмарины на параметры генерируемых изгибно-гравитационных волн будем моделировать судно горизонтальным цилиндрическим телом с затупленными торцами, основными характеристиками которого являются его длина L и площадь поперечного сечения Ω . Введем обозначение R , где $\Omega = \pi R^2$. Для теоретических исследований воспользуемся аналитическими формулами расчета прогиба ледяного покрова, полученными ранее в работе [13]. Напомним, что в работе субмарина моделировалась системой источник-сток, движущейся в жидкости близи ее поверхности. Ледяной покров моделировался тонкой упругой пластиной. Жидкость принималась как идеальная несжимаемая, движение жидкости потенциальное. Для расчетов принимались следующие значения основных параметров ледяного покрова и жидкости:

$$\rho = 900 \text{ кг/м}^3; \rho_1 = 1000 \text{ кг/м}^3; \nu = 1/3; E = 5 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2,$$

где ρ_1 — плотность воды.

Для моделей субмарин, аналогичных ранее использовавшимся в модельных экспериментах, принимались следующие характеристики, с учетом масштаба моделирования: для модели № 1 — $L = 160$ м, $2R = 11.8$ м; для модели № 2 — $L = 138.5$ м, $2R = 16.5$ м; для модели № 3 — $L = 112$ м, $2R = 14$ м.

На рис. 9 представлены значения коэффициента α в зависимости от скорости движения субмарин на глубинах $d = 20\text{--}30$ м под ледяным покровом толщины $h = 1\text{--}2$ м. Из графиков видно, что теоретические результаты для толщины льда 2 м (рис. 9, а, кривые 2, 4, б) хорошо согласуются с экспериментальными результатами рис. 6. Отметим, что значение коэффициента α зависит от размеров субмарины, толщины ледяного покрова и глубины погружения. Теоретически полученное превышение коэффициента α величины 0.04 соответствует полному разрушению ледяного покрова в модельном эксперименте. Таким образом, использование условия $\alpha > 0.04$ в качестве критерия разрушения ледяного покрова апробировано экспериментально.

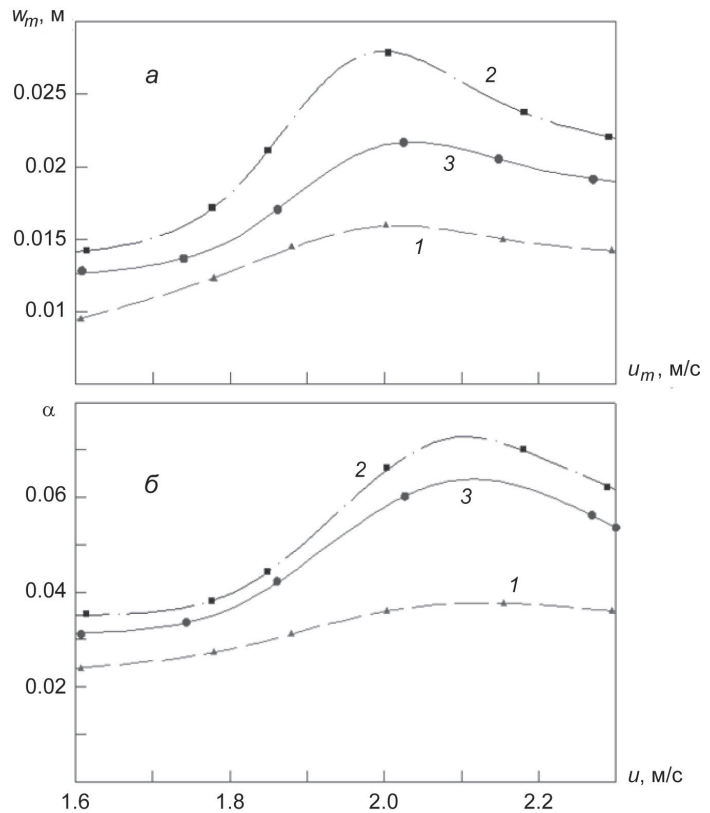


Рис. 7. Прогибы модельного льда (а) и значение коэффициента α (б) в зависимости от скорости движения моделей ПС. 1 — модель подводного судна № 1; 2 — модель подводного судна № 2; 3 — модель подводного судна № 3.

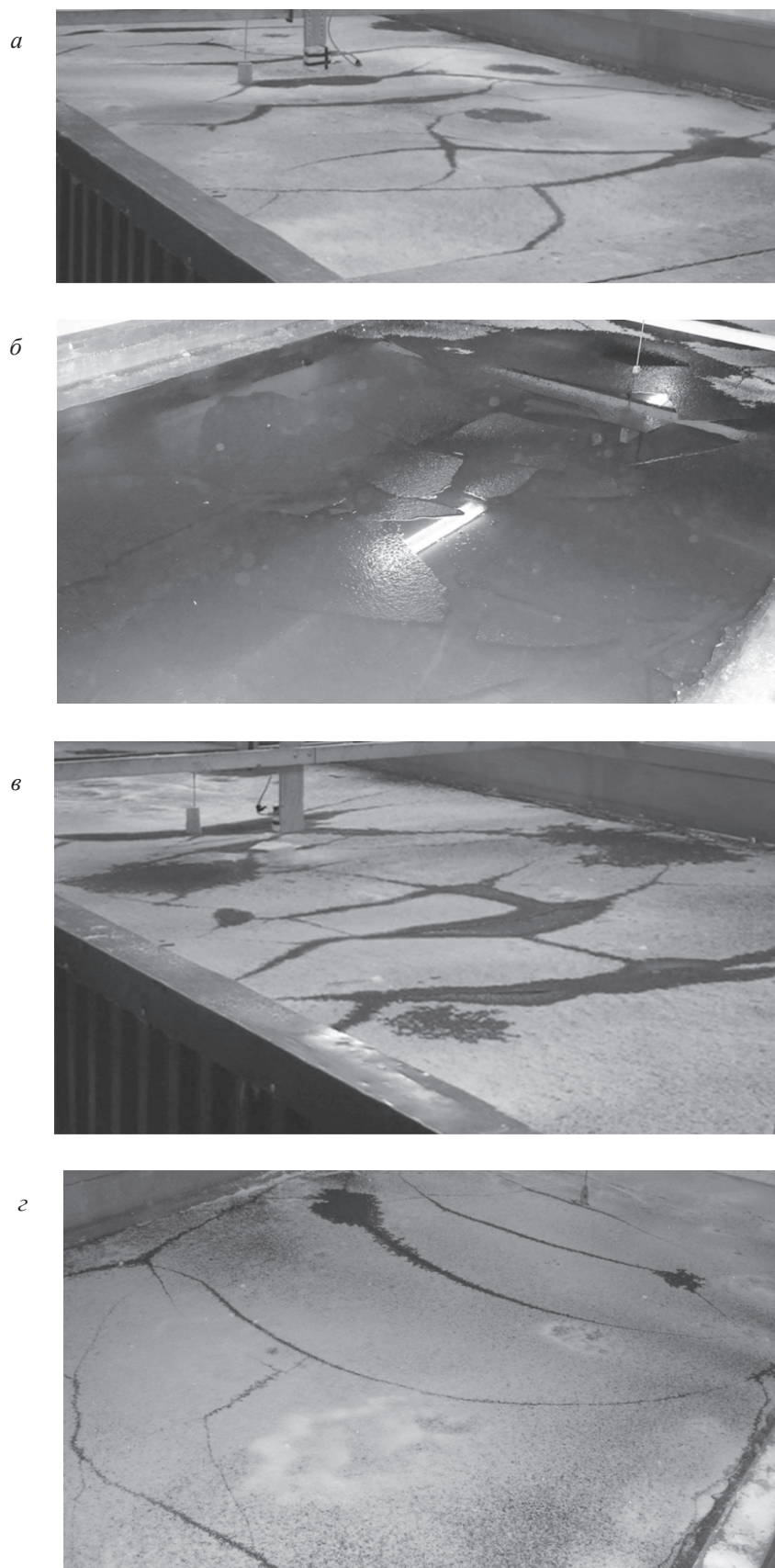


Рис. 8. Характер разрушения ледяного покрова $h_m = 3$ мм.

а — прохождение модели № 3 со скоростью $u_m = 2.03$ м/с; *б* — прохождение модели № 2 со скоростью $u_m = 2.1$ м/с;
в — прохождение модели № 2 со скоростью $u_m = 1.83$ м/с; *г* — прохождение модели № 1 со скоростью $u_m = 2.3$ м/с.

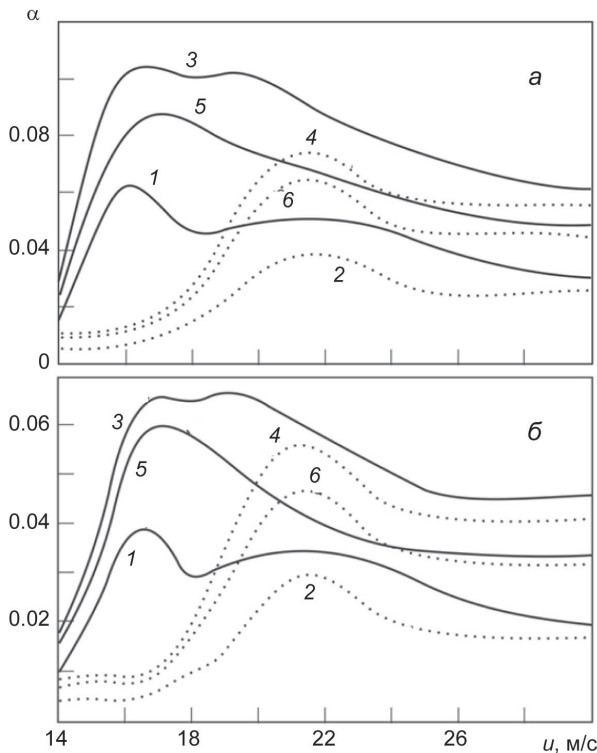


Рис. 9. Значение коэффициента α в зависимости от скорости движения субмарин при глубине погружения $d = 20$ м (а) и $d = 30$ м (б). Сплошные линии $h = 1$ м; точечные линии $h = 2$ м. 1, 2 — модель № 1; 3, 4 — модель № 2; 5, 6 — модель № 3.

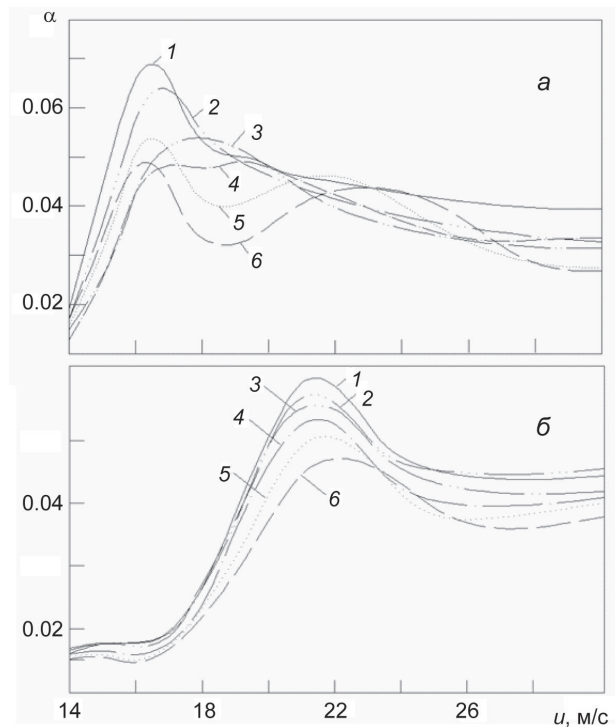


Рис. 10. Значение коэффициента α в зависимости от скорости движения субмарин при $2R = 14$ м и глубине погружения $d = 30$ м. а — толщина льда $h = 1$ м; б — $h = 2$ м. 1 — $L = 80$ м; 2 — $L = 100$ м; 3 — $L = 120$ м; 4 — $L = 140$ м; 5 — $L = 160$ м; 6 — $L = 180$ м.

Проанализируем влияние длины субмарины на коэффициент α при неизменной площади поперечного сечения. На рис. 10, соответственно, для толщины ледяного покрова $h = 1$ и 2 м представлены теоретические зависимости коэффициента α от скорости для модели № 3, $d = 30$ м и разных значениях длины субмарины. Анализируя полученные данные можно сделать вывод, что наибольший разрушительный эффект для ледяного покрова $h = 1$ м достигается при длине судна 80 м и скорости перемещения 16 м/с, а для ледяного покрова $h = 2$ м — при длине судна 100 м и скорости 22 м/с. Таким образом, максимальных значений коэффициент α достигает при скоростях, близких к значению минимальной фазовой скорости распространения изгибно-гравитационных волн в пластине $u_{\min}$ [14].

$$u_{\min} = 2(Dg^3/27\rho)^{1/8},$$

где $D = Eh^3/12(1 - \nu^2)$; g — ускорение силы тяжести.

Значения $u_{\min}$, вычисленные по данной формуле, для ледяной пластины толщиной $h = 1$ м и $h = 2$ м равны, соответственно, 15.9 и 20.7 м/с.

Заметим, что на кривых 4–6 рис. 10, а имеется два локальных максимума. Появление второго максимума обусловлено тем, что при большом расстоянии между носом и кормой субмарины волновые возмущения от них хорошо согласуются с гравитационными возмущениями, при этом увеличивается гравитационная составляющая изгибно-гравитационной волны. Первый максимум коэффициента α регистрируется в точке над субмариной, второй — в точке за субмариной.

Экспериментально и теоретически проанализировано влияние формы субмарины на возможность разрушения ледяного покрова при ее движении вблизи поверхности раздела лед–вода.

Получены следующие результаты.

1. Экспериментально проанализирована возможная ледоразрушающая способность субмарин различных проектов, находящихся в эксплуатации, с использованием их упрощенных моделей. Установлено, что основными факторами, влияющими на ледоразрушающую способность изгибно-гравитационных волн, являются отношение L/B субмарины, скорость ее перемещения и величина глубины погружения.

2. Теоретически получено, что изменение длины субмарины при условии неизменной площади поперечного сечения неоднозначно влияет на возможность разрушения ледяного покрова. Так, для модели судна № 3 для толщины ледяного покрова 1 м наибольший разрушительный эффект достигается при длине судна 80 м, а для толщины ледяного покрова 2 м — при длине судна 100 м.

3. Полученные теоретические данные хорошо согласуются с результатами модельных экспериментов.

Работа выполнена в рамках проекта № 487 задания на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания вузу № 2014/422.

Литература

1. Squire V. A. Synergies between VLFS Hydroelasticity and Sea Ice Research // Int. J. Offshore Polar Eng. 2008. V. 18, N. 4. P. 241–253.
2. Squire V. A., Hosking R. J., Kerr A. D., Langhorne P. J. Moving Loads on Ice Plates. Kluwer: Academic Publishers, 1996.
3. Стурова И. В. Движение погруженной сферы в жидкости под ледяным покровом // Прикладная математика и механика. 2012, Т. 76, № 3. С. 406–417.
4. Коробкин А. А., Костилов В. К., Макаренко Н. И. Движение эллиптического цилиндра под ледовым покровом // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Математика, механика, информатика. 2012. Т. 12, № 4. С. 76–81.
5. Козин В. М., Онищук А. В., Марьин Б. Н. Ледоразрушающая способность изгибно-гравитационных волн от движения объектов. Владивосток: Дальнаука, 2005. 191 с.
6. Козин В. М., Чижиумов С. Д., Земляк В. Л. Исследования влияния ледовых условий на эффективность резонансного метода разрушения ледяного покрова, реализуемого подводными судами // Прикладная механика и техническая физика. 2010. Т. 51, № 3. С. 118–125.
7. Козин В. М., Земляк В. Л. Безопасность всплытия подводного судна в сплошных льдах в условиях мелководья // Безопасность жизнедеятельности. 2010. № 10. С. 6–9.
8. Земляк В. Л., Козин В. М., Петросян Г. В. Исследование возможности всплытия подводных судов в ледяном покрове при ограниченной глубине акватории // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. 2013. Т. 13, № 2. С. 51–65.
9. Земляк В. Л., Курбацкий Д. А., Баурин Н. О. Лаборатория «Ледотехники» // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. 2013. Т. 12, № 1. С. 75–84.
10. Войткунский Я. И. Справочник по теории корабля. Л.: Судостроение. 1985. 584 с.
11. Степанюк И. А. Технологии испытаний и моделирования морского льда. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 2001. 78 с.
12. Lewis J. W. Recent Development in Physical Ice Modeling // Offshore Technol. Conf. Houston. 1982. Vol. 4. P. 493–498.
13. Погорелова А. В., Козин В. М., Земляк В. Л. Движение тонкого тела в жидкости под плавающей пластиной // Прикладная механика и техническая физика. 2012. Т. 53, № 1. С. 32–44.
14. Хейсин Д. Е. Динамика ледяного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1967. 216 с.

Статья поступила в редакцию 22.05.2014 г.