

УДК 532.59:629.585:534.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЙ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕЗОНАНСНОГО СПОСОБА РАЗРУШЕНИЯ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА, РЕАЛИЗУЕМОГО ПОДВОДНЫМИ СУДАМИ

В. М. Козин, С. Д. Чижиумов*, В. Л. Земляк*

Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, 681005 Комсомольск-на-Амуре

* Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет,

681013 Комсомольск-на-Амуре

E-mail: vellkom@list.ru

Представлена численная модель для анализа напряженно-деформированного состояния ледяного покрова, имеющего разводья различной ширины, которое возникает под действием гидродинамических нагрузок, вызванных движением подводного судна. С использованием модели неразрушаемого льда выполнены расчеты и эксперименты, на основе которых получены зависимости амплитуды прогибов и напряжений в ледяном покрове от ширины разводья. Исследовано поведение ледяного покрова под действием волновой нагрузки.

Ключевые слова: изгибно-гравитационные волны, резонансный метод разрушения льда, резонансная скорость, подводное судно, ледовые условия.

1. В настоящее время имеется большой опыт эксплуатации на Севере атомных подводных лодок, совершающих длительные переходы подо льдом. Однако при необходимости их всплытия в сплошном ледяном покрове возможно возникновение аварийных ситуаций. Как правило, всплытие подводного судна (ПС) осуществляется статическим нагружением льда снизу за счет создания положительной плавучести путем осушения балластных цистерн. Однако такой способ всплытия имеет ряд недостатков (незначительная толщина проламываемого льда, необходимость повышения прочности конструкций корпуса, возможность потери устойчивости и др.). Для устранения этих недостатков можно использовать гидродинамические нагрузки на ледяной покров, возникающие вблизи нижней поверхности движущегося ПС. В работах [1–3] на основе модельных экспериментов такая возможность доказана.

При движении ПС под поверхностью льда в ледяном покрове образуются изгибно-гравитационные волны, амплитуда которых достигает максимума при скорости судна, превышающей так называемую горбовую скорость, соответствующую наиболее интенсивному волнообразованию при движении на свободной воде. В работе [1] также показано, что предельная толщина сплошного льда, разрушаемого резонансными изгибно-гравитационными волнами при движении ПС, в несколько раз больше, чем при статическом проломе ледяного покрова в процессе всплытия.

В работах [1, 3, 4] исследовано влияние толщины сплошного ледяного покрова на его напряженно-деформированное состояние и возможность его разрушения ПС. Однако для полного разрушения льда может потребоваться несколько проходов судна: при первом проходе образуется одна или несколько трещин, при последующих проходах происходит дальнейшее разрушение льда. В данной работе изучено влияние раскрытой продольной

трещины или разводья различной ширины на прогибы и напряжения, возникающие в ледяном покрове при движении ПС.

2. Уравнение деформаций вязкоупругой однородной пластины (ледяного покрова) под действием динамической нагрузки принимается в виде

$$D\nabla^4 w + D\tau\nabla^4 \dot{w} + \beta\dot{w} + \rho_s h \ddot{w} = p, \quad (1)$$

где w , \dot{w} , \ddot{w} — соответственно функции прогиба, нормальной скорости и нормального ускорения пластины, зависящие от координат поверхности пластины x , y и времени t ; $D = Eh^3/(12(1-\nu^2))$ — цилиндрическая жесткость; E — модуль упругости; ν — коэффициент Пуассона; ρ_s — плотность материала пластины; τ — время релаксации деформаций; β — коэффициент вязкого сопротивления; h — толщина пластины; p — поле давлений, возникающее при движении ПС.

Так как при изгибе ледяного покрова перемещения, скорости и ускорения являются малыми по сравнению с соответствующими размерами подводного объекта и параметрами его движения, используется линейная постановка задачи гидроупругости. Жидкость полагается идеальной, несжимаемой. Граничные условия на пластине снесены на ее недеформированную поверхность, а гидродинамическая нагрузка определяется по формуле

$$p = p_0 + p_{st} + p_w, \quad (2)$$

где p_0 — давление на поверхность льда как на твердую стенку при движении ПС; $p_{st} = -\rho_w g w$ — гидростатическая реакция жидкости на изгиб пластины; ρ_w — плотность жидкости; g — гравитационная постоянная. В предположении малости скоростей деформации интенсивность силы инерции жидкости, возникающей вследствие изгиба пластины, можно определить из линеаризованного интеграла Коши — Лагранжа

$$p_w = -\rho_w \frac{\partial \varphi}{\partial t}, \quad (3)$$

где φ — потенциал скорости жидкости.

В общем случае плавающая пластина взаимодействует с волнами, образующимися на свободной поверхности воды в разводье и за внешними кромками. Рассмотрен случай, когда внешние кромки удалены от источника волн (судна) на достаточно большое расстояние, где деформации незначительны, что позволяет не учитывать влияние волн на свободной поверхности за внешними кромками. В то же время при движении ПС в разводье может формироваться волна, которая, выплескиваясь и разбиваясь о внутренние кромки ледяной пластины, может оказывать влияние на ее изгиб. Во многих работах, в которых проводится математическое моделирование изгиба льда, используется линейное условие на свободной поверхности. Например, в [5] приводится численная модель для случая нагрузки, движущейся вдоль кромки льда. Однако возможность применения линейного условия необходимо исследовать в зависимости от ширины разводья, толщины льда и характера гидродинамической нагрузки, возникающей при движении ПС. Таким образом, прямое численное и физическое моделирование воздействия волн на свободную поверхность в разводье требует проведения дополнительных исследований.

Наличие разводья в ледяной пластине будем учитывать приближенно, считая, что свободная поверхность закрыта полосой пластины, модуль упругости которой на два порядка меньше модуля упругости самой пластины. Использование этого приема позволяет не вводить дополнительное граничное условие на свободной поверхности и существенно упростить моделирование.

Для того чтобы определить гидродинамическое давление p_0 , рассмотрим движение ПС с заданной скоростью $v(t)$. Поле скоростей жидкости в каждый момент времени определяется из решения краевой задачи для уравнения Лапласа:

$$\Delta\varphi(x, y, z) = 0 \quad \text{в } \Omega; \quad (4)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = v \cos(x, n) \quad \text{на } \Gamma_s; \quad (5)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0 \quad \text{на } \Gamma_w; \quad (6)$$

$$\lim_{R \rightarrow \infty} \varphi = 0, \quad \lim_{R \rightarrow \infty} \frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0 \quad \text{на } \Gamma_\infty, \quad (7)$$

где Ω — область, занятая жидкостью; $\Gamma = \Gamma_s + \Gamma_w + \Gamma_\infty$ — граница области Ω ; Γ_s — поверхность ПС; Γ_w — поверхность ледяной пластины; Γ_∞ — условная граница (часть сферы радиусом R на бесконечном удалении от судна); n — нормаль к границе жидкой среды; v — поступательная скорость ПС.

Для того чтобы определить гидродинамическое давление p_w , рассмотрим упругие деформации ледяного покрова со скоростью \dot{w} . Поле скоростей жидкости в каждый момент времени определяется из решения краевой задачи для уравнения Лапласа (4), (5), (7) с граничным условием на поверхности льда

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = \frac{\partial w}{\partial t} \quad \text{на } \Gamma_w. \quad (8)$$

Эти уравнения решаются совместно с уравнениями движения упругой пластины (1), (2). Таким образом, система уравнений (1)–(8) представляет собой постановку гидроупругой задачи.

В случае сплошного ледяного поля (пластины большой протяженности) в отсутствие существенных течений волновым демпфированием и вязким трением водной среды можно пренебречь. Тогда с учетом (2), (3) уравнение движения упругой пластины (1) можно представить в виде

$$D\nabla^4 w + D\tau\nabla^4 \dot{w} + \rho_s h \ddot{w} + \rho_w g w + \rho \frac{\partial \varphi}{\partial t} = p_0. \quad (9)$$

Численное решение уравнения (9) построено с использованием метода конечных элементов. Ледяная пластина моделируется изопараметрическими четырехугольными конечными элементами с линейной аппроксимацией узловых параметров: прогибов и углов поворота. Соответствующее уравнению (9) матричное уравнение имеет вид

$$[K]\{q\} + [C]\{\dot{q}\} + [M]\{\ddot{q}\} = \{F_0\}, \quad (10)$$

где $[K] = [K^*] + [K^w]$ — матрица жесткости, включающая матрицы жесткости пластины и упругого основания (учитывающие влияние гидростатических сил); $[C] = \tau$; $[K^*]$ — матрица коэффициентов внутреннего сопротивления; $[M] = [M^0] + [\mu]$ — матрица масс, включающая матрицы инерции упругой пластины и прилегающей жидкости; $\{q\}$ — вектор обобщенных перемещений; $\{F_0\}$ — вектор гидродинамических инерционных сил, действующих на поверхности льда при движении ПС.

Для определения гидродинамического воздействия использовался метод граничных элементов [6]. Граница между жидкостью и пластиной моделировалась четырехугольными граничными элементами с линейной аппроксимацией потенциала скорости и его нормальной производной, являющейся в соответствии с условием (8) нормальной скоростью движения границы. При этом краевые задачи (4)–(8) преобразуются к граничным интегральным уравнениям, конечно-элементный аналог которых может быть записан в виде [6]

$$[H]\{\varphi\} = [G]\{v\},$$

где $[H]$, $[G]$ — матрицы коэффициентов; $\{\varphi\}$, $\{v\}$ — векторы узловых значений функций φ и $\partial\varphi/\partial n$. Учитывая, что граничная поверхность состоит из двух частей ($\Gamma = \Gamma_s + \Gamma_w$),

последнее уравнение можно разложить на блоки:

$$\begin{aligned} [H_{ss}]\{\varphi_s\} + [H_{sw}]\{\varphi_w\} &= [G_{ss}]\{v_s\} + [G_{sw}]\{v_w\}, \\ [H_{ws}]\{\varphi_s\} + [H_{ww}]\{\varphi_w\} &= [G_{ws}]\{v_s\} + [G_{ww}]\{v_w\}. \end{aligned} \quad (11)$$

Исключая из (11) неизвестные на поверхности судна $\{\varphi_s\}$, получаем

$$\{\varphi_w\} = [H_{ww}^*]^{-1}([G_{ww}^*]\{\dot{w}\} + \{V\}), \quad (12)$$

где

$$\begin{aligned} [H_{ww}^*] &= [H_{ww}] - [H_{ws}][H_{ss}]^{-1}[H_{sw}], & [G_{ww}^*] &= [G_{ww}] - [H_{ws}][H_{ss}]^{-1}[G_{sw}], \\ \{V\} &= ([G_{ws}] - [H_{ws}][H_{ss}]^{-1}[G_{ss}])\{v_s\}. \end{aligned}$$

Нормальные силы в узлах, действующие на ледяную пластину со стороны жидкости, выражаются через значения давления в узлах с помощью вектора распределения $\{N\}$:

$$\{F_{w0}\} = \{N\}\{p\}.$$

С учетом (3), (12) гидродинамические силы в узлах пластины определяются выражением

$$\{F_{w0}\} = \{F_w\} + \{F_0\},$$

где

$$\{F_0\} = -\rho_w \frac{\partial}{\partial t} ([N][H_{ww}^*]^{-1}\{V\}), \quad \{F_w^n\} = -\rho_w [N][H_{ww}^*]^{-1}[G_{ww}^*]\{\ddot{w}\} = -[\mu]\{\ddot{w}\}.$$

В алгоритме численного интегрирования уравнения (10) по времени используется конечно-разностная схема [7], основанная на линейной аппроксимации ускорений на временном шаге.

Для реализации численной модели разработано программное обеспечение, с помощью которого в [4] получены результаты расчетов прогибов и напряжений для однородной пластины, а также исследовано влияние на них толщины пластины и скорости судна.

3. В данной работе изучено влияние ширины развода над линией движения судна на прогибы и напряжения ледяной пластины толщиной 0,5 м при относительном заглублении судна $h_0/L = 0,2$ (h_0 — глубина погружения, отсчитываемая от продольной оси симметрии корпуса). ПС представляет собой тело вращения (рис. 1) с относительным удлинением корпуса $L/B = 8$ и водоизмещением $D_n = 12\,000$ т.

Полагалось, что размеры сетки конечных элементов на поверхности ледяной пластины и размеры сетки граничных элементов одинаковы. Кроме того, учитывалась симметрия модели относительно продольной вертикальной плоскости. Расчетный шаг и параметры сеток выбирались на основе анализа сходимости результатов расчетов.

Расчетный шаг по времени выбирался в диапазоне $0,2 \div 0,4$ с в зависимости от заданной скорости судна. Поверхности судна и ледяного поля были разделены нерегулярной сеткой (см. рис. 1). Поверхность половины судна включала 280 узлов (21 поперечное сечение по 15 узлов). Размеры расчетной сетки пластины льда выбирались на основе тестовых расчетов, так чтобы на краях пластины перемещения и напряжения были на порядок меньше максимальных значений. Например, при толщине льда 0,5 м длина и полуширина расчетной сетки составляли соответственно 500 и 100 м. При этом сетка содержала 500 узлов (50 поперечных сечений по 10 узлов). Края пластины были свободны.

По максимумам динамических прогибов и напряжений ледяной пластины определялись соответствующие значения резонансной скорости ПС, обеспечивающей наибольшую эффективность силового воздействия на ледяной покров. На рис. 2, 3 приведены зависимости максимальных прогибов и напряжений от скорости движения ПС. Видно, что наличие

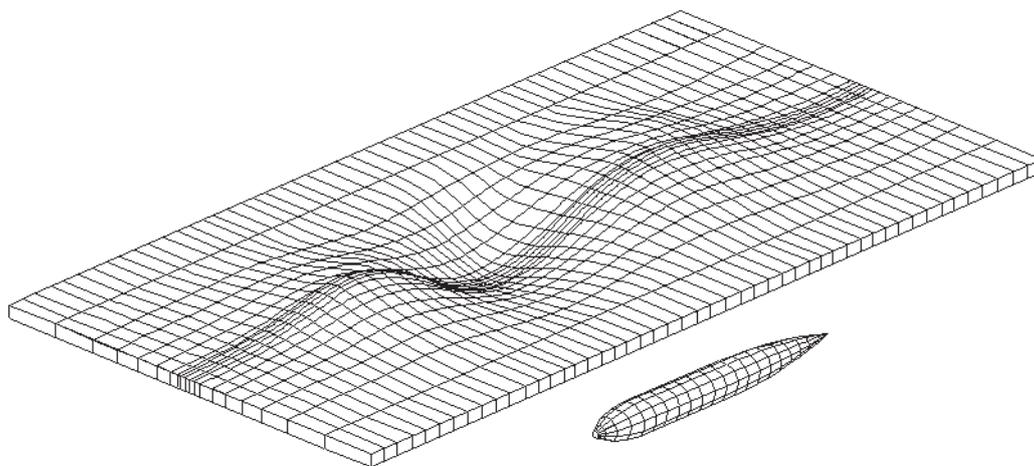


Рис. 1. Расчетная модель движения ПС

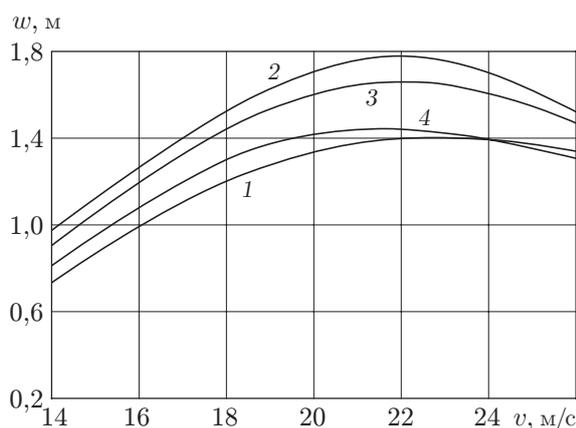


Рис. 2

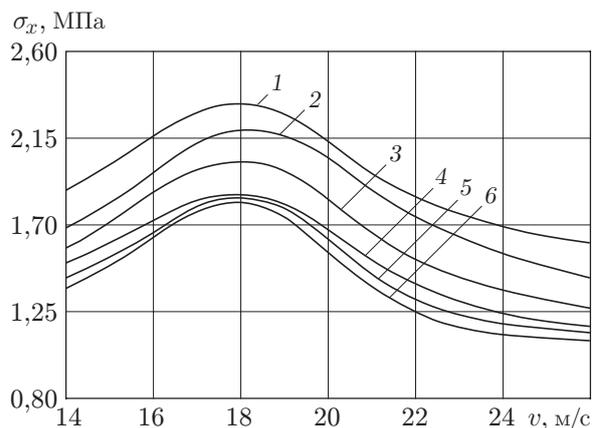


Рис. 3

Рис. 2. Зависимость максимальных прогибов от скорости движения ПС:

1 — сплошной лед; 2 — продольная трещина; 3 — разводье шириной 6 м; 4 — разводье шириной 12 м

Рис. 3. Зависимость максимальных напряжений от скорости движения ПС:

1 — продольная трещина; 2 — сплошной лед; 3 — разводье шириной 3 м; 4 — разводье шириной 6 м; 5 — разводье шириной 9 м; 6 — разводье шириной 12 м

продольной трещины или разводья практически не оказывает влияния на резонансную скорость.

Наибольшие напряжения в ледяной пластине возникали при меньшей скорости по сравнению со скоростью, при которой имели место наибольшие прогибы. Вследствие этого резонансным пикам соответствовал некоторый диапазон скоростей. Проведенные расчеты показали, что резонансная скорость возрастает с увеличением толщины льда (рис. 4).

Следует отметить, что наиболее эффективное разрушение ледяного покрова происходит в случае движения ПС с резонансной скоростью под продольной раскрытой трещиной (см. рис. 3). В этом случае во льду возникают максимальные продольные напряжения, что приводит к образованию магистральных трещин, перпендикулярных направлению движения нагрузки.

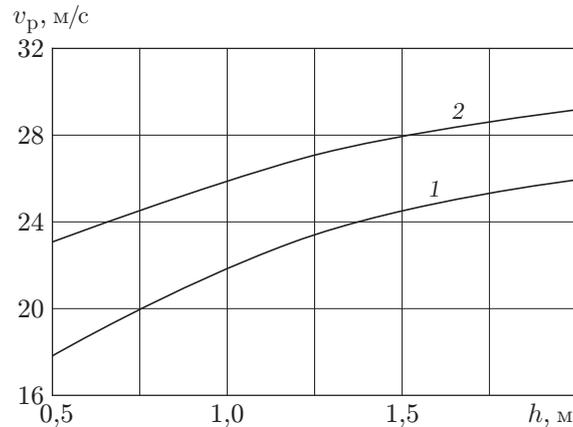


Рис. 4. Зависимость резонансной скорости от толщины льда:
1 — для прогибов; 2 — для напряжений

4. С целью подтверждения полученных теоретических результатов исследовано поведение ледяного покрова под действием волновой нагрузки с использованием модели неразрушаемого льда.

В соответствии с известной методикой моделирования изгибно-гравитационных волн в сплошном неразрушаемом льду должны выполняться следующие условия подобия [8]:

$$\lambda_E = \lambda_w = \lambda_\sigma = \lambda_h = \lambda_l, \quad \lambda_P = \lambda_l^3.$$

Здесь λ_l — геометрический масштаб; λ_E — масштаб моделирования по модулю упругости; λ_w — масштаб моделирования по прогибам; λ_σ — масштаб моделирования по напряжениям; λ_h — масштаб моделирования по толщине льда; λ_P — масштаб моделирования массовых сил.

Условия подобия для коэффициента Пуассона μ и плотности ρ_1 льда не выполняются, поскольку они оказывают несущественное влияние на результаты моделирования. При выполнении критериев Фруда и Коши скорость движения модели v_m определяется из условия

$$v_n/v_m = \lambda_l^{1/2}.$$

Параметры модельных изгибно-гравитационных волн пересчитываются на натуру по зависимостям

$$\lambda_n/\lambda_m = A_n/A_m = \lambda_l, \quad T_n/T_m = \lambda_l^{1/2},$$

где λ_n — длина натуральных волн; λ_m — длина модельных волн; A_n — амплитуда натуральных волн; A_m — амплитуда модельных волн; T_n — период натуральных волн; T_m — период модельных волн.

В модели в качестве льда использовалась листовая резина, являющаяся наиболее доступным материалом. Значение модуля упругости резины определялось в экспериментах на растяжение при различных скоростях нагружения на специальном стенде. Среднее значение модуля упругости составило $E_m = 2,5$ МПа, что позволило провести исследования в масштабе $\lambda_l = 500$, т. е. для моделирования льда толщиной 0,5 м использовалась резина толщиной 1 мм.

Для исключения влияния на изгиб резиновой пластины заливания ее водой разводье было закрыто полиэтиленовой пленкой толщиной 0,01 мм.

Эксперименты проводились в бассейне с размерами $5,0 \times 2,0 \times 0,5$ м, оснащенный буксировочной системой. Размеры модельного ледяного покрова составляли $3,0 \times 1,4$ м.

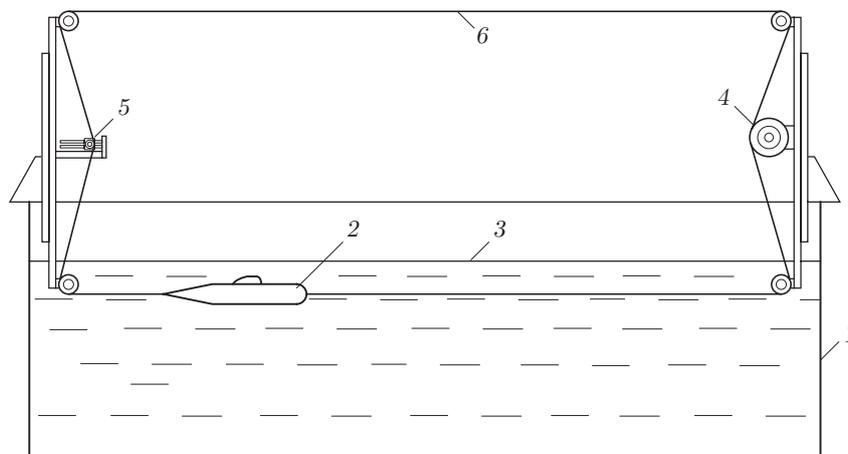


Рис. 5. Схема экспериментальной установки:

1 — чаша бассейна; 2 — модель подводного судна; 3 — модель сплошного льда; 4 — привод; 5 — натяжной блок; 6 — бесконечный буксировочный трос

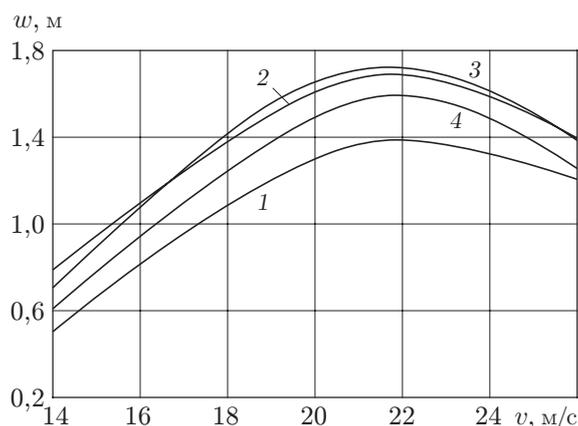


Рис. 6. Зависимость максимальных прогибов от скорости движения ПС:

1 — сплошной лед; 2 — продольная трещина; 3 — разводье шириной 6 м; 4 — разводье шириной 12 м

Схема экспериментальной установки показана на рис. 5. Модель судна геометрически подобна модели, использовавшейся в расчете. Буксировка модели осуществлялась под модельным льдом с продольной раскрытой трещиной или с разводьем различной ширины ($b_1 = 0,006$ м, $b_2 = 0,012$ м, $b_3 = 0,018$ м, $b_4 = 0,024$ м) при относительном заглублении корпуса, равном 0,2. Полученные данные были пересчитаны на натуру в соответствии с условиями подобия и масштабом $\lambda_l = 500$. На рис. 6 представлена зависимость максимальных прогибов ледяного покрова от скорости движения ПС. Из рис. 2, 6 следует, что полученные в экспериментах данные согласуются с результатами расчетов.

5. Выполненные исследования позволяют сделать вывод об эффективности математической модели изгиба ледяного покрова с учетом его неоднородностей в виде трещин и разводий в случае воздействия на лед гидродинамических нагрузок, возникающих при движении ПС. Тем не менее для учета взаимодействия ледяной пластины с волнами на свободной поверхности разводья необходимо дальнейшее уточнение математической модели путем прямого моделирования волнообразования в разводье. Погрешность, возникающая вследствие приближенного учета этого взаимодействия, с ростом ширины разводья увеличивается.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности динамического разрушения ПС ледяного покрова при его поступательном движении подо льдом. При этом для повышения эффективности разрушения рекомендуется движение ПС вдоль продольной раскрытой трещины с резонансной скоростью.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Козин В. М.** Ледоразрушающая способность изгибно-гравитационных волн от движения объектов / В. М. Козин, А. В. Онищук, Б. Н. Марьин и др. Владивосток: Дальнаука, 2005.
2. **Козин В. М.** Резонансный метод разрушения ледяного покрова: Изобретения и эксперименты. М.: Акад. естествознания, 2007.
3. **Козин В. М., Онищук А. В.** Модельные исследования волнообразования в сплошном ледяном покрове от движения подводного судна // ПМТФ. 1994. Т. 35, № 2. С. 78–81.
4. **Козин В. М.** Прикладные задачи динамики ледяного покрова / В. М. Козин, В. Д. Жесткая, А. В. Погорелова и др. М.: Акад. естествознания, 2008.
5. **Чижиумов С. Д.** Численные модели в задачах динамики судна. Владивосток: Изд-во Дальневост. ун-та, 1999.
6. **Бреббия К.** Методы граничных элементов / К. Бреббия, Ж. Теллес, Л. Вроубел. М.: Мир, 1987.
7. **Ершов Н. Ф.** Прочность судовых конструкций при локальных динамических нагружениях / Н. Ф. Ершов, А. Н. Попов. Л.: Судостроение, 1989.
8. **Козин В. М.** Моделирование изгибно-гравитационных волн в сплошном ледяном покрове // Теория и прочность ледокольного корабля. Горький: Горьк. политехн. ин-т, 1982. Вып. 3. С. 35–38.

*Поступила в редакцию 12/І 2009 г.,
в окончательном варианте — 10/VI 2009 г.*
