

УДК 532.526.2

УВЕЛИЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЗОНАНСНОГО МЕТОДА РАЗРУШЕНИЯ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ПРИ ОДНОВРЕМЕННОМ ДВИЖЕНИИ ДВУХ СУДОВ НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ

В. М. Козин^{*,**}, В. Л. Земляк^{***}, Е. Г. Рогожникова^{**}

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

** Амурский гуманитарно-педагогический государственный университет,
681000 Комсомольск-на-Амуре, Россия

*** Приамурский государственный университет им. Шолом-Алейхема,
679015 Биробиджан, Россия

E-mails: kozinvictor@rambler.ru, vellkom@list.ru, steinbbockh@mail.ru

Исследована возможность увеличения эффективности резонансного метода разрушения ледяного покрова за счет использования интерференции изгибно-гравитационных волн, возникающей при одновременном движении нескольких судов на воздушной подушке.

Ключевые слова: резонансный метод, ледяной покров, разрушение, изгибно-гравитационные волны, интерференция, суда на воздушной подушке.

DOI: 10.15372/PMTF20170220

Введение. Суть резонансного метода разрушения ледяного покрова амфибийными судами на воздушной подушке (СВП) изложена в работах [1, 2] и заключается в возбуждении в ледяном покрове резонансных изгибно-гравитационных волн (ИГВ). В работе [3] приведены зависимости для расчета напряженно-деформированного состояния ледяного покрова в случае движения по нему распределенной нагрузки при различных граничных условиях и законах движения нагрузки. Нестационарное прямолинейное движение СВП рассматривалось в работе [4]. В [5] исследовано движение нагрузки по ледяному покрову при переменной глубине бассейна в случае двумерной задачи. Работы [6, 7] посвящены изучению плоской задачи о влиянии периодической внешней нагрузки на колебания полубесконечной упругой пластины и полосы. В [8] обобщены результаты исследований движения нагрузок по ледяному покрову. В [9] теоретически изучено стационарное и нестационарное движение нагрузки по ледяному покрову, в [10] экспериментально исследовались деформации ледяного покрова при движении по нему нагрузки.

В большинстве работ рассматривалось движение одиночной нагрузки. Однако при выполнении ледокольных работ одного СВП может оказаться недостаточно для разрушения ледяного покрова заданной толщины в конкретных условиях. В таких случаях эффективность ледокольных работ можно увеличить за счет одновременного использования нескольких судов, а именно за счет интерференции возбуждаемых ими ИГВ. При этом при

Работа выполнена в соответствии с заданием на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности (проект № 487) в рамках базовой части государственного задания вузу № 2014/422.

© Козин В. М., Земляк В. Л., Рогожникова Е. Г., 2017

движении судов фронтом наиболее интенсивное разрушение ледяного покрова будет происходить позади них на расстоянии, приблизительно равном $\lambda_p/4$ (λ_p — длина резонансных ИГВ [1]), а при движении судов кильватерным строем — за последним судном [1, 10, 11].

Данная работа посвящена исследованию деформирования ледяного покрова при движении по нему двух нагрузок. Предварительные экспериментальные исследования, проведенные с крупномасштабными моделями и реальными СВП, показали перспективность такого подхода [2].

1. Теоретические зависимости. Теоретические исследования влияния расположения СВП на параметры возбуждаемых ими ИГВ проводились на основе решения дифференциального уравнения малых колебаний плавающей вязкоупругой пластины под действием внешней нагрузки, которое можно записать в виде [4]

$$\frac{Gh^3}{3} \left(1 - \tau_\varphi u \frac{\partial}{\partial x}\right) \nabla^4 w + \rho_2 g w + \rho_1 h u^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \rho_2 u \frac{\partial \Phi}{\partial x} = -q.$$

Здесь $G = 0,5E/(1 + \nu)$ — модуль упругости льда при сдвиге; ν — коэффициент Пуассона; h — толщина ледяного покрова; τ_φ — время релаксации деформаций; w — прогиб льда; ρ_1 , ρ_2 — плотности льда и воды; g — ускорение свободного падения; u — скорость движения нагрузки; q — система перемещающихся давлений; Φ — потенциал движения жидкости, удовлетворяющий уравнению Лапласа $\Delta \Phi = 0$.

Выражение для величины w получено в виде

$$w(x, y) = \frac{4q_0}{\pi^2 \rho_2 u^2} \int_0^\infty \lambda^2 \operatorname{th}(\lambda H) \int_0^\lambda \frac{\cos(y\sqrt{\lambda^2 - \alpha^2}) \sin(\alpha L/2) \sin(B\sqrt{\lambda^2 - \alpha^2}/2)}{\alpha(\lambda^2 - \alpha^2)(\xi^2 + \eta^2)} \times \\ \times (\cos(\alpha x) \xi + \sin(\alpha x) \eta) d\alpha d\lambda,$$

где

$$\eta = \frac{Gh^3 \lambda^5 \operatorname{th}(\lambda H) \alpha \tau_\varphi}{3\rho_2 u}, \quad \xi = -\frac{Gh^3 \lambda^5 \operatorname{th}(\lambda H)}{3\rho_2 u^2} - \frac{g\lambda \operatorname{th}(\lambda H)}{u^2} + \frac{\rho_1 h \alpha^2 \lambda \operatorname{th}(\lambda H)}{\rho_2} + \alpha^2,$$

q_0 — интенсивность нагрузки; L , B — длина и ширина области приложения нагрузки; H — толщина слоя воды.

2. Экспериментальные и теоретические исследования. Возможность использования полученных зависимостей при исследовании деформированного состояния ледяного покрова подтверждена путем сравнения результатов теоретических расчетов и экспериментальных данных, полученных для упругих пленок [12, 13] и естественного ледяного покрова в ледовом бассейне Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. На рис. 1 показано состояние ледяного покрова после прохождения двух нагрузок фронтом. Масштаб моделирования ИГВ 1 : 50 в ледовом бассейне был выбран исходя из его размеров $10 \times 3 \times 1$ м. При длине бассейна $L = 10$ м обеспечивался выход на стационарный режим движения моделей нагрузки [14]. Опыты проводились при толщине слоя воды 80 см и толщине намораживаемого слоя льда 0,3 см.

Для определения суммарных теоретических прогибов ледяного покрова при движении по нему двух нагрузок использовались зависимости

$$w_k(x, y) = w(x, y) + w(x + L_x, y), \quad w_f(x, y) = w(x, y) + w(x, y - L_y), \quad (1)$$

где L_x — расстояние между нагрузками при движении кильватерным строем; L_y — расстояние между нагрузками при движении фронтом.

В качестве нагрузки использовалась модель СВП “Мурена”, параметры которой имели следующие значения: $l_m = 0,60$ м, $b_m = 0,26$ м, $m = 2,84$ кг. Ледяной покров в ледовом

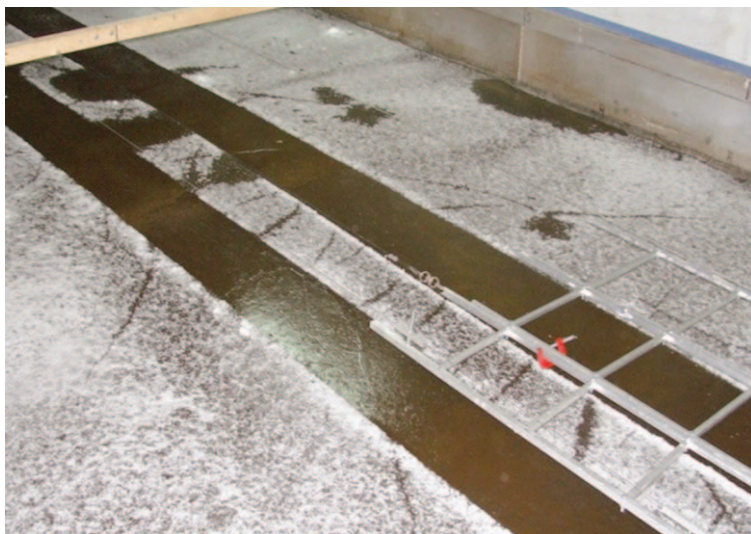


Рис. 1. Характер разрушения слоя льда толщиной $h_m = 0,003$ м после прохождения моделей СВП массой $m_m = 2,84$ кг (расстояние между СВП $L_y = 0,25$ м, резонансная скорость $u_m = 1,7$ м/с)

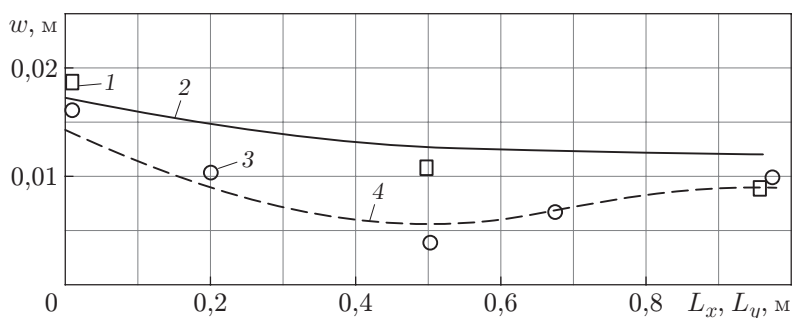


Рис. 2. Экспериментальные (1, 3) и расчетные (2, 4) зависимости прогиба ледяной пластины от расстояния между нагрузками:
1, 2 — движение фронтом, 3, 4 — движение кильватерным строем

бассейне создавался путем намораживания льда в естественных условиях при температуре воздуха $t = -9 \div -16$ °С.

Расчеты выполнены для полученных экспериментально прогибов w , параметры льда имели следующие значения: $\rho_1 = 900$ кг/м³, $h = 0,5$ м, $H = 50$ м, $E = 10^9$ Н/м².

На рис. 2 видно, что результаты теоретических исследований удовлетворительно согласуются с результатами экспериментов.

Также была проведена серия экспериментов в бассейне размерами $5,0 \times 1,8 \times 0,6$ м Амурского гуманитарно-педагогического государственного университета [11]. Масштаб моделирования 1 : 500 был выбран с учетом модуля Юнга пластины в соответствии с методикой моделирования, изложенной в работе [12], при этом длина бассейна также обеспечивала выход на стационарный режим движения модели нагрузки.

Проведена серия опытов, позволивших оценить влияние одновременной работы двух нагрузок на коэффициент деформирования ледяного покрова k , представляющий собой отношение максимального прогиба льда при движении двух нагрузок w_2 к максимальному прогибу при прохождении одиночной нагрузки w_1 , при котором происходит полное разрушение ледяного покрова:

$$k = w_2/w_1.$$

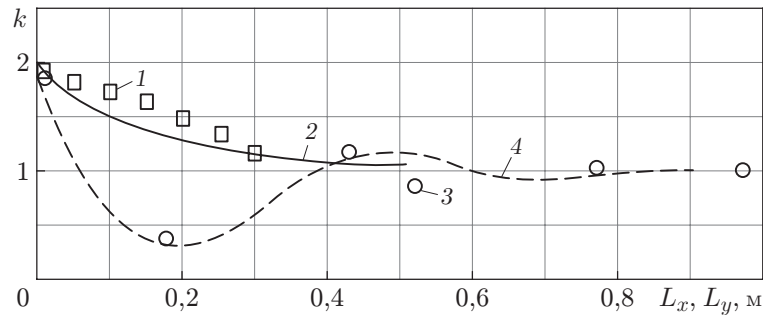


Рис. 3. Экспериментальные (1, 3) и расчетные (2, 4) зависимости коэффициента деформирования ледяного покрова k от расстояния между нагрузками: 1, 2 — движение фронтом, 3, 4 — движение кильватерным строем

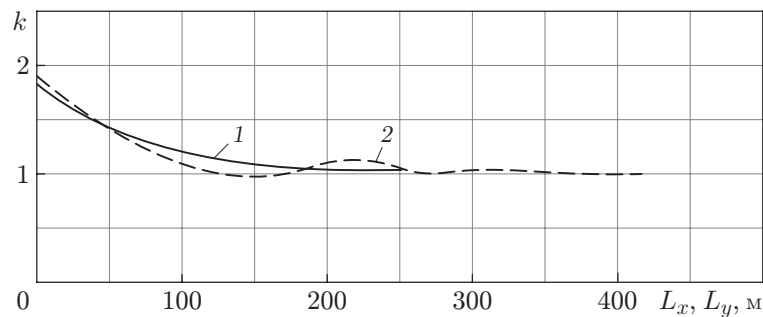


Рис. 4. Зависимость коэффициента деформирования ледяного покрова k от расстояния между нагрузками после пересчета результатов модельного эксперимента на случай движения реальных СВП: 1 — движение фронтом, 2 — движение кильватерным строем

Коэффициент k можно использовать для определения изменения ледоразрушающей способности ИГВ, поскольку деформации пропорциональны изгибным напряжениям, возникающим в ледяном покрове. Зная значение k , можно определить нагрузку, которую необходимо добавить к нагрузке одиночного СВП для разрушения ледяного покрова заданной толщины. Этот вывод справедлив вследствие относительно большой скорости распространения резонансных ИГВ (с периодом $10 \div 20$ с [1]), при которой вязкостные свойства льда (время релаксации Максвелла составляет от нескольких десятков минут до нескольких часов [1]) не успевают оказать существенное влияние на суммарную величину деформаций ледяного покрова, т. е. поведение льда при такой нагрузке можно считать близким к поведению упругого тела.

При проведении экспериментов использовалась модель СВП “Зубр”, параметры которой в соответствии с выбранным масштабом имели следующие значения: $l_m = 0,11$ м, $b_m = 0,04$ м, $m = 0,046$ кг. В качестве модели ледяного покрова использовалась упругая (резиновая) пленка толщиной 2 мм с модулем упругости $E = 2 \cdot 10^6$ Н/м².

На рис. 3 приведены экспериментальные и расчетные зависимости коэффициента k от расстояния между нагрузками. Видно, что результаты экспериментов и расчетов удовлетворительно согласуются.

На рис. 4 приведены расчетные зависимости коэффициента k от расстояния между нагрузками при равномерном движении двух СВП фронтом и кильватерным строем. Расчеты выполнены с использованием формул (1) при следующих значениях параметров, соответствующих СВП “Зубр”: $L = 57,3$ м, $B = 22,3$ м, $q_0 = 5,3 \cdot 10^3$ Н/м², и следующих

характеристиках льда: $h = 1$ м, $\rho_1 = 900$ кг/м³, $\rho_2 = 1000$ кг/м³, $E = 10^9$ Н/м², $\nu = 0,33$, $\tau_\varphi = 0,69$ с, $H = 5$ м.

Заключение. Проведенное в работе экспериментально-теоретическое исследование показало целесообразность использования интерференции ИГВ для увеличения эффективности резонансного метода разрушения ледяного покрова и возможность применения полученных зависимостей при изучении деформированного состояния ледяного покрова при возбуждении в нем ИГВ.

Определена зависимость коэффициента деформирования ледяного покрова от расстояния между нагрузками при движении судов фронтом и кильватерным строем.

Показано, что при использовании трех и более судов их движение кильватерным строем нецелесообразно вследствие быстрого затухания возбуждаемых ИГВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Козин В. М.** Физические основы разрушения ледяного покрова резонансным методом / В. М. Козин, В. Л. Земляк. Комсомольск-на-Амуре: Ин-т машиноведения и металлургии ДВО РАН: Приамур. гос. ун-т: Амур. гуманитар.-пед. гос. ун-т, 2013.
2. **Козин В. М.** Резонансный метод разрушения ледяного покрова: Изобрет. и эксперименты. М.: Академия естествознания, 2007.
3. **Жесткая В. Д.** Исследования возможностей разрушения ледяного покрова амфибийными судами на воздушной подушке резонансным методом / В. Д. Жесткая, В. М. Козин. Владивосток: Дальнаука, 2003.
4. **Погорелова А. В.** Особенности волнового сопротивления СВПА при нестационарном движении по ледяному покрову // ПМТФ. 2008. Т. 49, № 1. С. 89–99.
5. **Стурова И. В.** Влияние топографии дна на нестационарное поведение упругой пластины, плавающей на мелководье // Прикл. математика и механика. 2008. Т. 72, вып. 4. С. 588–600.
6. **Ткачева Л. А.** Плоская задача о колебаниях плавающей упругой пластины под действием периодической внешней нагрузки // ПМТФ. 2004. Т. 45, № 3. С. 136–145.
7. **Ткачева Л. А.** Воздействие периодической нагрузки на плавающую упругую пластину // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2005. № 2. С. 132–146.
8. **Squire V. A.** Moving loads on ice plates / V. A. Squire, R. J. Hosking, A. D. Kerr, P. J. Langhorne. Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1996.
9. **Wang K., Hosking R. J., Milinazzo F.** Time-dependent response of a floating viscoelastic plate to an impulsively started moving load // J. Fluid Mech. 2004. V. 521. P. 295–317.
10. **Takizawa T.** Response of a floating sea ice sheet to a moving vehicle // Proc. of the 5th Intern. offshore mechanics and arctic engineering symp., Tokyo, 13–18 Apr. 1986. N. Y.: ASME, 1986. V. 4. P. 614–621.
11. **Козин В. М., Земляк В. Л.** Лаборатория механики сплошных сред // Вестн. Комс.-на-Амуре гос. техн. ун-та. 2009. Вып. 13, ч. 1. С. 244–246.
12. **Козин В. М.** Моделирование изгибно-гравитационных волн в сплошном ледяном покрове // Теория и прочность ледокольного корабля. Горький: Горьк. гос. политехн. ин-т, 1982. Вып. 3. С. 35–38.
13. **Козин В. М.** Прикладные задачи динамики ледяного покрова / В. М. Козин, В. Д. Жесткая, А. В. Погорелова и др. М.: Академия естествознания, 2008.
14. **Земляк В. Л., Баурин Н. О., Курбацкий Д. А.** Лаборатория “Ледотехника” // Вестн. Приамур. гос. ун-та им. Шолом-Алейхема, 2013. № 1. С. 68–77.

*Поступила в редакцию 9/II 2015 г.,
в окончательном варианте — 12/II 2016 г.*