

В. М. Козин, Е. Г. Рогожникова

УВЕЛИЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ РЕЗОНАНСНОГО МЕТОДА РАЗРУШЕНИЯ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ ВОЗБУЖДАЕМЫХ ИЗГИБНО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН

Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия

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

Аннотация. Рассмотрена возможность увеличения резонансного метода разрушения ледяного покрова за счет использования интерференции, возбуждаемых изгибно-гравитационных волн, возникающих при одновременном движении нескольких судов на воздушной подушке (СВП). СВП движутся по ледяному покрову фронтом с постоянной скоростью. Экспериментально-теоретически исследуется влияние расстояния между нагрузками на напряженно-деформированное состояние ледяного покрова. Анализ проводится на основе решения дифференциального уравнения, описывающего вязко-упругие колебания ледяного покрова от действия движущейся нагрузки. Решение уравнения получено в интегральной форме. Экспериментальные исследования проведены в ледовом бассейне на естественном ледяном покрове.

Ключевые слова: Резонансный метод, ледяной покров, изгибно-гравитационные волны, разрушение, интерференция.

УДК: 532.526.2

Многие страны имеют замерзающие реки, омываются морями, которые в различной степени и на разные сроки покрываются льдом. Лед является серьезным препятствием на пути судоходства, осложняя, а иногда делая невозможной своевременную доставку грузов по назначению. Он также затрудняет разведку и добычу полезных ископаемых, огромные запасы которых содержатся в шельфовой зоне арктических морей и Антарктики. Для решения указанных ледотехнических проблем может быть использован резонансный метод разрушения ледяного покрова амфибийными суднами

© Козин В. М., Рогожникова Е. Г., 2018

Козин Виктор Михайлович

e-mail: kozinvictor@rambler.ru, доктор технических наук, профессор, Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия,

Рогожникова Елена Григорьевна

e-mail: steinbockh@mail.ru, кандидат технических наук, старший преподаватель, Амурский гуманитарно-педагогический государственный университет, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия.

на воздушной подушке (СВП), т.е. посредством возбуждения резонансных изгибно-гравитационных волн (ИГВ).

Сущность резонансного метода разрушения ледяного покрова, изложена в работах [3; 6] и заключается в возбуждении в ледяном покрове резонансных изгибно-гравитационных волн. Многие авторы занимались исследованием движения нагрузки по ледяному покрову [9-10, 13,15] или влияния периодической внешней нагрузки на колебания полубесконечной упругой пластины и полосы [11-12] как теоретически, так и экспериментально [14]. Использование ледяного покрова в качестве взлетно-посадочных полос исследовалось в работах [18-20].

В известных исследованиях рассматривалось движение одиночной нагрузки. Однако, при выполнении ледокольных работ одним СВП его параметры могут оказаться недостаточными для разрушения ледяного покрова заданной толщины. В таких случаях эффективность ледокольных работ можно повысить за счет одновременного использования нескольких судов, т.е. за счет интерференции возбуждаемых ими ИГВ. При этом наиболее интенсивное разрушение ледяного покрова будет происходить позади судов на расстоянии от них равном примерно $\lambda_p/4$ [6; 14; 7] (где λ_p – длина резонансных ИГВ [6]).

Данная работа посвящена исследованиям закономерностей напряженно-деформированного состояния ледяного покрова при движении по нему двух нагрузок. Предварительно выполненные экспериментальные исследования с полунатурными и натурными СВП показали перспективность такого подхода (рис.1-2) [4].



Рис. 1. Спаренная работа СВП "КнАПИ-1" и "КнАПИ-2" при выходе на берег

Теоретические исследования влияния взаимного расположения СВП на параметры возбуждаемых ими ИГВ проводились на основании решения дифференциального уравнения малых колебаний плавающей вязко-упругой пластины под действием внешней нагрузки, которое можно записать в виде [9]:

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

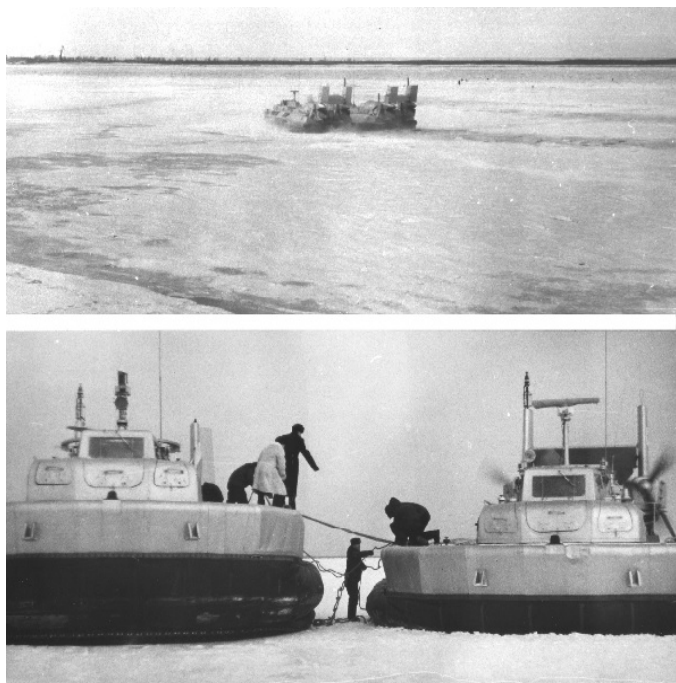


Рис. 2. Счаливание кораблей на воздушной подушке "Скат" для групповой работы по разрушению льда

где: $G = 0.5E/(1 + \nu)$ - модуль упругости льда при сдвиге; ν - коэффициент Пуассона; h - толщина ледяного покрова; τ_ϕ - время релаксации деформаций; w - прогиб льда; ρ_1, ρ_2 - плотность льда и воды; g - ускорение силы тяжести; ∇ - оператор набла; u - скорость движения нагрузки; q - система перемещающихся давлений; Φ - потенциал движения жидкости, удовлетворяющий уравнению Лапласа $\Delta\Phi = 0$.

Выражение для w получено в виде [17]:

$$w(x, y) = \frac{4q_0}{\pi^2 \cdot \rho_2 \cdot u^2} \cdot \int_0^\infty \lambda^2 \cdot th(\lambda H) \times \int_0^\lambda \frac{\cos(y\sqrt{\lambda^2 - \alpha^2}) \sin(\alpha \frac{L_n}{2}) \sin(\frac{B_n}{2} \sqrt{\lambda^2 - \alpha^2})}{\alpha(\lambda^2 - \alpha^2)(\zeta^2 + \eta^2)} \times (\cos(\alpha x) \cdot \zeta + \sin(\alpha x) \cdot \eta) d\alpha d\lambda, \quad (2)$$

где:

$$\eta = \frac{Gh^3 \lambda^5 th(\lambda H) \alpha \tau_\phi}{3\rho_2 u};$$

$$\zeta = -\frac{Gh^3 \lambda^5 th(\lambda H)}{3\rho_2 u^2} - \frac{g\lambda th(\lambda H)}{u^2} + \frac{\rho_1 h \alpha^2 \lambda th(\lambda H)}{\rho_2} + \alpha^2,$$

здесь: q_0 - интенсивность нагрузки; L_n - длина нагрузки; B_n - ширина нагрузки; H - глубина воды.

Работоспособность полученных зависимостей подтверждена путем сопоставления результатов теоретических расчетов с экспериментальными данными, полученными на упругих пленках [4; 7], в натуральных условиях [2; 8] и естественном льду в ледовом бассейне лаборатории «Ледотехника» Приамурского государственного университета имени Шолом-Алейхема.

Масштаб моделирования ИГВ в ледовом бассейне размерами $L \times B \times H = 10 \times 3 \times 1$ м $\lambda = 1:50$ был выбран исходя из его размеров, при этом длина бассейна обеспечивала

выход на стационарный режим движения моделей нагрузки [1]. Опыты проводились при глубине воды 1 м и толщине намораживаемого модельного льда 0.3 см.

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

$$w_f(x, y) = w(x, y) + w(x, y - L_y),$$

здесь: L_y – расстояние между нагрузками при движении фронтом.

В качестве нагрузки использовалась схематизированная модель СВП «Мурена». Ее параметры составляли: $l_m = 0.60$ м; $b_m = 0.26$ м; $m_m = 0.85$ кг. Модель ледяного покрова в ледовом бассейне приготавливалась намораживанием естественного льда естественным холодом при температуре воздуха $t = - (9 - 16)^\circ\text{C}$, а его толщина составляла $h_m = 0.003$ м. Глубина бассейна в опытах составила 40 см. Расстояние между нагрузками изменялось от полного счаливания до расстояния $L_y = 0.65$ м. Дальнейшее увеличение расстояния между моделями было ограничено влиянием размеров бассейна на деформации модельного льда.

Расчеты были выполнены для полученных экспериментальных данных при параметрах льда: $\rho_{\text{л}} = 900 \text{ кг/м}^3$; $h = 0.5$ м; $H = 20$ м; $E = 1 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$.

На первоначальном этапе исследований с целью определения резонансной скорости были выполнены эксперименты по буксировке одной модели (рис. 3).



Рис. 3. Характер разрушения модельного льда.

На втором этапе исследований проводились эксперименты по движению двух моделей фронтом (рис. 4). Буксировка двух моделей осуществлялась с резонансной скоростью, которая, так же как и для одиночной нагрузки равна 2.2 м/с.

Результаты сопоставления экспериментальных и теоретических исследований движения двух нагрузок по ледяному покрову достаточно хорошо совпадают (рис. 5).

При выполнении ледокольных работ путем возбуждения ИГВ возникает вопрос – как оценить ледоразрушающую способность возбуждаемых ИГВ. Существуют различные критерии [16], в том числе и силовой.

Силовой критерий – теоретический уровень изгибных напряжений $2.1\sigma_u$, при достижении которого достигается полное разрушение льда при нагружении его резонансными ИГВ.

Устойчивые результаты расчётов позволяют в качестве критерия для оценки ледоразрушающих способностей СВП принять теоретическое значение максимальных

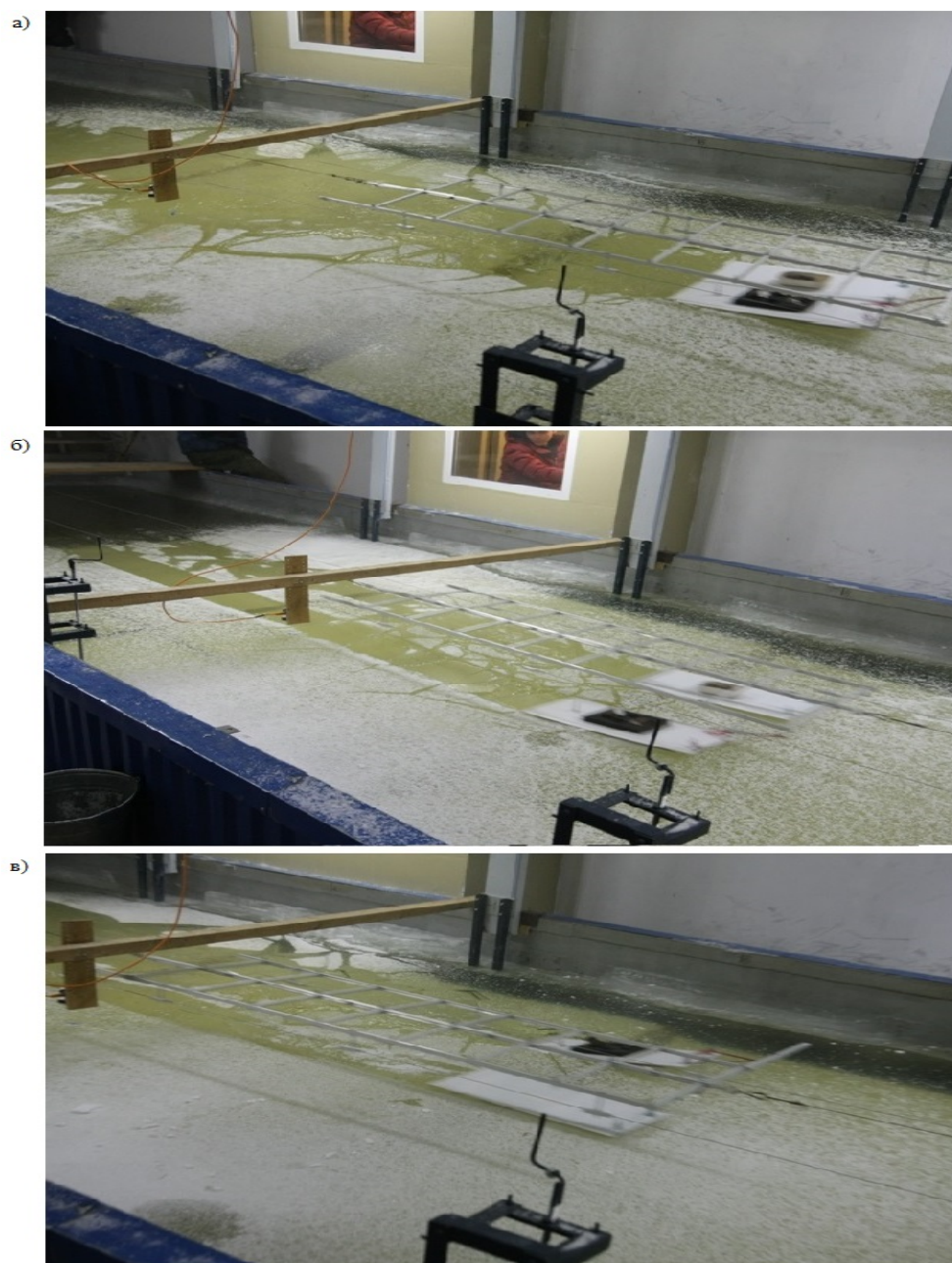


Рис. 4. Характер разрушения модельного льда толщиной $h_m=0.003$ м после прохождения моделей СВП массой $m_m=0.85$ кг с резонансной скоростью $u_m=2.2$ м/с: а – счаливание моделей; б – расстояние между моделями $L_y = 0.52$ м; в – расстояние между моделями $L_y = 0.65$ м.

изгибных напряжений, уровень которых соответствует началу полного разрушения льда за движущимся СВП. Т. е. если при движении СВП во льду возникают напряжения, максимальные теоретические значения которых оказываются равными или

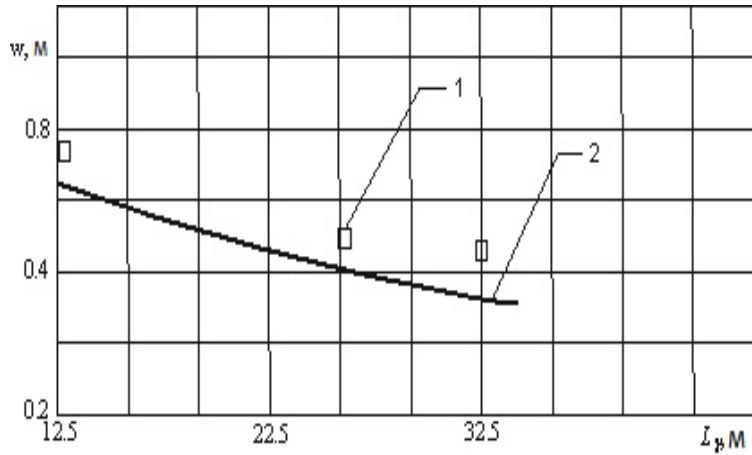


Рис. 5. Сопоставление результатов теоретических исследований с экспериментальными при движении одиночной нагрузки: 1 – экспериментальные исследования; 2 – теоретические исследования.

больше найденного σ_x , то за судном, возбуждающим такие ИГВ, будет происходить непрерывное полное разрушение ледяного покрова.

Средняя величина максимальных относительных напряжений $\bar{\sigma}_x$ определялась по формуле [16]:

$$\bar{\sigma}_x = \frac{\sigma_x}{\sigma_u}, \quad (4)$$

где: при $\sigma_u = 1.2$ МПа (средний предел прочности пресноводного льда на изгиб во время экспериментов) $\bar{\sigma}_x$ составила 2.08, т.е. больше 2.

Максимальные нормальные по толщине пластины напряжения записываются в виде:

$$\sigma_x = \frac{6M_x}{h^2}, \quad (5)$$

где: M_x – изгибающий момент, определяемый как:

$$M_x = -\frac{Gh^3}{3} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} (w + \tau_\phi \frac{\partial w}{\partial t}) + \mu \frac{\partial^2}{\partial y^2} (w + \tau_\phi \frac{\partial w}{\partial t}) \right).$$

В начале исследований были выполнены расчеты максимальных σ_x в зависимости от скорости движения одного СВП и определена резонансная скорость, а затем для двух.

Из рис.6 видно, что величина $\bar{\sigma}_x$ превышала значение в 2.1 раза, что соответствовало полному разрушению ледяного покрова, подтвержденному результатами экспериментальных исследований.

В результате экспериментально-теоретических исследований можно сделать следующие выводы:

1. Исследования показали целесообразность использования интерференции ИГВ, возбуждаемых двумя СВП при движении фронтом для повышения эффективности резонансного метода разрушения ледяного покрова.

2. Показана работоспособность использованных математических зависимостей при исследованиях напряженно-деформированного состояния ледяного покрова от возбуждаемых в нем ИГВ, что позволяет использовать силовой критерий и посредством теоретического прогноза разработать рекомендации для повышения ледоразрушающей способности группы СВП.

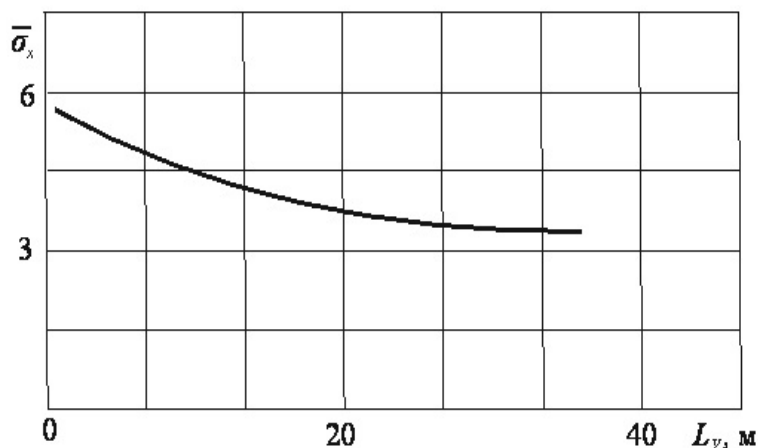


Рис. 6. Зависимость $\bar{\sigma}_x$ от расстояния между СВП при их движении фронтом

3. Использование СВП при движении «фронтом» достаточно перспективно, т.к. есть возможность существенно повысить эффективность резонансного метода разрушения ледяного покрова при его реализации группой, превышающей два и более судов.

Выполненная работа показывает целесообразность дальнейших исследований в области совершенствования ранее предложенного и оправдавшего себя резонансного метода разрушения ледяного покрова

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Земляк В. Л., Баурин Н. О., Курбацкий Д. А. // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. 2013. № 1 (12). С. 68–077.
- [2] Иванов К. Е., Кобеко П. П., Шульман А. Р. Деформация ледового покрова при движении грузов // Журнал технической физики. 1946. Т.1. С. 257–262.
- [3] Козин В. М. Резонансный метод разрушения ледяного покрова. Изобретения и эксперименты. М.: Издательство «Академия Естествознания», 2007. 355 с.
- [4] Козин В. М., Жесткая В. Д., Погорелова А. В. и др. Прикладные задачи динамики ледяного покрова. М.: Издательство «Академия Естествознания», 2008. 330 с.
- [5] Козин В. М., Земляк В. Л. Лаборатория механики сплошных сред // Вестник ГОУ ВПО «КнАГТУ». Вып. 13 В 2 ч. Ч.1. 2009. С. 244–246.
- [6] Козин В. М., Земляк В. Л. Физические основы разрушения ледяного покрова резонансным методом. Комсомольск-на-Амуре: ИМиМ ДВО РАН, 2013. 250 с.
- [7] Козин В. М., Моделирование изгибно-гравитационных волн в сплошном ледяном покрове. // В кн.: Теория и прочность ледокольного корабля. Горький: Изд. ГПИ им. А.А. Жданова, 1982. Вып. 3. С. 35–38.
- [8] Песчанский И. С. Ледоведение и ледотехника. Х.: Гидрометеиздат, 1967. 467 с.
- [9] Погорелова А. В. Особенности волнового сопротивления СВПА при нестационарном движении по ледяному покрову // ПМТФ. 2008. Т.49. №1. С. 89–99.
- [10] Стурова И. В. Влияние топографии дна на нестационарное поведение упругой пластины, плавающей на мелководье // ПМТФ. 2008. Т.72. №4. С. 588–600.

- [11] Ткачева Л. А. Воздействие периодической нагрузки на плавающую упругую пластину // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2005. №2. С. 132–146.
- [12] Ткачева Л. А. Плоская задача о колебаниях плавающей упругой пластины под действием периодической внешней нагрузки // ПМТФ. 2004. Т.45. №3. С. 136–145.
- [13] Squire V. A., Hosking R. J., Kerr A. D. and Langhorne P. J. Moving Loads on Ice Plates: Kluwer Academic Publishers:Dordrecht, 1996.
- [14] Takizawa T. Response of a Floating Sea Ice Sheet to a Moving Vehicle // Proc. Fifth International Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symp. 1986. V.4. P.614–621.
- [15] Wang K, Hosking R. J. and 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.
- [16] Козин В. М., Верещагин В. Ю., Верещагина А. С. Критерии оценки ледоразрушающей способности изгибно-гравитационных волн // Ученые записки КнГТУ. №4-1(24). 2015. С.95–104.
- [17] Козин В.М., Замляк В.Л., Рогожникова Е.Г., Повышение эффективности резонансного метода разрушения ледяного покрова при парном движении судов на воздушной подушке // ПМТФ. 2017. Т.58. №2. С.188–192.
- [18] Погорелова А. В., Козин В. М., Матюшина А. А. Исследование напряжённо-деформированного состояния ледяного покрова при взлёте и посадке на него самолёта // ПМТФ. 2015. Т. 56. №5. С.214–221.
- [19] Matiushina A. A., Pogorelova A. V., Kozin V. M. Effect of Shock Pulse Load on the Ice Cover During Landing of an Airplane // International Journal of Offshore and Polar Engineering. 2016. Vol.26. №1. P. 6–12.
- [20] Pogorelova A. V., Matiushina A. A., Kozin V. M. et al. Modeling of an Airplane Take-off and Landing on the Ice Cover in Variable Water Depth Conditions // Proc. of the 26th (2016) Int. Ocean and Polar Engineering Conf. Rhodos (Rodos), Greece, June 26 – July 1. 2016. P. 1187–1191.

V. M. Kozin, E. G. Rogozhnikova

**INCREASE IN OPPORTUNITIES OF A RESONANT METHOD OF
DESTRUCTION OF AN ICE COVER DUE TO USE OF AN INTERFERENCE
OF THE EXCITED FLEXURAL AND GRAVITATIONAL WAVES**

*Institute of Machinery and Metallurgy of Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences,
Komsomolsk-on-Amur, Russia*

Amur State University of Humanities and Pedagogy, Komsomolsk-on-Amur, Russia

Abstract. The possibility of increasing the resonant method of the ice cover failure through the use of interference excited by flexural-gravitational waves arising from the simultaneous motion of several amphibian hovercrafts (AHC). AHCs move over the ice cover abreast. Experimental and theoretical study the influence of the distance between loads on the stress-strain state of the ice cover. The analysis is carried out on the basis of the solution of the differential equation describing the visco-elastic oscillations of the ice cover from the action of a moving load. Solution of the equation is obtained in integral form. Experimental studies were carried out in an ice basin on a natural ice sheet.

Keywords: Resonance method, ice cover, flexural gravity waves, failure, interference.

REFERENCES

- [1] Zemlyak V. L., Baurin N. O., Kurbackij D. A. // Vestnik Priamurskogo gosudarstvennogo universiteta im. SHolom-Alejhema. 2013. № 1 (12). S. 68–077. (in Russian)
- [2] Ivanov K. E., Kobeko P. P., SHul'man A. R. Deformaciya ledovogo pokrova pri dvizhenii грузов // ZHurnal tekhnicheskoy fiziki. 1946. T.1. S. 257–262. (in Russian)
- [3] Kozin V. M. Rezonansnyj metod razrusheniya ledyanogo pokrova. Izobreteniya i ehksperimenty. M.: Izdatel'stvo «Akademiya Estestvoznaniya», 2007. 355 s. (in Russian)
- [4] Kozin V. M., ZHestkaya V. D., Pogorelova A. V. i dr. Prikladnye zadachi dinamiki ledyanogo pokrova. M.: Izdatel'stvo «Akademiya Estestvoznaniya», 2008. 330 s. (in Russian)
- [5] Kozin V. M., Zemlyak V. L. Laboratoriya mekhaniki sploshnyh sred // Vestnik GOU VPO «KnAGTU». Vyp. 13 V 2 ch. CH.1. 2009. S. 244–246. (in Russian)
- [6] Kozin V. M., Zemlyak V. L. Fizicheskie osnovy razrusheniya ledyanogo pokrova rezonansnym metodom. Komsomol'sk-na-Amure: IMiM DVO RAN, 2013. 250 s. (in Russian)
- [7] Kozin V. M., Modelirovanie izgibno-gravitacionnyh voln v sploshnom ledyanom pokrove. // V kn.: Teoriya i prochnost' ledokol'nogo korablya. Gor'kij: Izd. GPI im. A.A. ZHdanova, 1982. Vyp. 3. C. 35–38.

Kozin Viktor Mikhailovich

e-mail: kozinvictor@rambler.ru, Dr. Eng., Prof., Institute of Machinery and Metallurgy FEB RAS, Komsomolsk-on-Amur, Russia,

Rogozhnikova Elena Grigoryevna

e-mail: steinbockh@mail.ru, Ph. D., Senior Lecturer, Amur State University of Humanities and Pedagogy, Komsomolsk-on-Amur, Russia.

- [8] Peschanskij I. S. Ledovedenie i ledotekhnika. H.: Gidrometeoizdat, 1967. 467 s. (in Russian)
- [9] Pogorelova A. V. Osobennosti volnovogo soprotivleniya SVPA pri nestacionarnom dvizhenii po ledyanomu pokrovu // PMTF. 2008. T.49. №1. S. 89–99. (in Russian)
- [10] Sturova I. V. Vliyanie topografii dna na nestacionarnoe povedenie uprugoj plastiny, plavayushchej na melkovod'e // PMTF. 2008. T.72. №4. S. 588–600. (in Russian)
- [11] Tkacheva L. A. Vozdejstvie periodicheskoy nagruzki na plavayushchuyu upruguyu plastinu // Izv. RAN. Mekhanika zhidkosti i gaza. 2005. №2. S. 132–146. (in Russian)
- [12] Tkacheva L. A. Ploskaya zadacha o kolebaniyah plavayushchej uprugoj plastiny pod dejstviem periodicheskoy vneshnej nagruzki // PMTF. 2004. T.45. №3. S. 136–145. (in Russian)
- [13] Squire V. A., Hosking R. J., Kerr A. D. and Langhorne P. J. Moving Loads on Ice Plates: Kluwer Academic Publishers:Dordrecht, 1996. (in Russian)
- [14] Takizawa T. Response of a Floating Sea Ice Sheet to a Moving Vehicle // Proc. Fifth International Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symp. 1986. V.4. P.614–621.
- [15] Wang K, Hosking R. J. and Milinazzo F. Time-dependent response of a floating viscoelastic plate to an impulsively started moving load // J. Fluid Mech. 2004. V.521. R.295–317.
- [16] Kozin V. M., Vereshchagin V. YU., Vereshchagina A. C. Kriterii ocenki ledorazrushayushchej sposobnosti izgibno-gravitacionnyh voln // Uchenye zapiski KnGTU. №4-1(24). 2015. S.95–104. (in Russian)
- [17] Kozin V.M., Zamlyak V.L., Rogozhnikova E.G., Povyszenie ehffektivnosti rezonansnogo metoda razrusheniya ledyanogo pokrova pri parnom dvizhenii sudov na vozdushnoj podushke // PMTF. 2017. T.58. №2. S.188–192. (in Russian)
- [18] Pogorelova A. V., Kozin V. M., Matyushina A. A. Issledovanie napryazhyonno-deformirovannogo sostoyaniya ledyanogo pokrova pri vzlyote i posadke na nego samolyota // PMTF. 2015. T. 56. №5. S.214–221. (in Russian)
- [19] Matiushina A. A., Pogorelova A. V., Kozin V. M. Effect of Shock Pulse Load on the Ice Cover During Landing of an Airplane // International Journal of Offshore and Polar Engineering. 2016. Vol.26. №1. P. 6–12. (in Russian)
- [20] Pogorelova A. V., Matiushina A. A., Kozin V. M. et al. Modeling of an Airplane Take-off and Landing on the Ice Cover in Variable Water Depth Conditions // Proc. of the 26th (2016) Int. Ocean and Polar Engineering Conf. Rhodos (Rodos), Greece, June 26 – July 1. 2016. P. 1187–1191.