

Козин В. М., Земляк В. Л., Рогожникова Е. Г.
V. M. Kozin, V. L. Zemlyak, E. G. Rogozhnikova

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ ИЗГИБНО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЗОНАНСНОГО МЕТОДА РАЗРУШЕНИЯ
ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ПРИ ПАРНОМ ДВИЖЕНИИ СУДОВ НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ**

**THE USE OF FLEXURAL GRAVITY WAVE INTERFERENCE FOR IMPROVING
THE EFFICIENCY OF THE RESONANCE METHOD TO DESTRUCT ICE COVER
WHEN HOVERCRAFTS ARE MOVING IN PAIRS**

Козин Виктор Михайлович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории «Механика деформирования» Института машиноведения и металлургии ДВО РАН (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kozinvictor@rambler.ru.

Mr. Victor M. Kozin – Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Research Associate, Laboratory of «Mechanics of deformation», the Institute of Machining and Metallurgy, FEB RAS (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kozinvictor@rambler.ru.

Земляк Виталий Леонидович – кандидат физико-математических наук, проректор по науке и инновациям Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема (Россия, г. Биробиджан). E-mail: vellkom@list.ru.

Mr. Vitaliy L. Zemlyak – PhD in Physical and Mathematical Sciences, Vice Rector for Research and Innovation, Sholom-Aleichem Priamursky State University (Russia, Birobidzhan). E-mail: vellkom@list.ru.

Рогожникова Елена Григорьевна – старший преподаватель кафедры информационной безопасности, информационных систем и физики Амурского гуманитарно-педагогического государственного университета (Россия, г. Комсомольск-на-Амуре). E-mail: Steinbockh@mail.ru.

Ms. Elena G. Rogozhnikova – Senior lecturer, Information Security, Information Systems and Physics Department, Amur State University of Humanities and Pedagogy (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: Steinbockh@mail.ru.

Аннотация. В работе рассмотрена возможность повышения эффективности резонансного метода разрушения ледяного покрова за счет использования интерференции изгибно-гравитационных волн, возникающей при одновременном движении нескольких амфибийных судов на воздушной подушке.

Summary. This article considers the possibility of efficiency improvement of the resonance method to destruct ice cover using interference flexural gravity waves generated by simultaneous movement of several amphibian hovercrafts.

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

Key words: resonance method, ice cover, destruction, flexural gravity waves, interference, amphibian hovercrafts.

УДК 532.526.2

Введение

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 и 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.

С другой стороны, ледяной покров можно использовать для устройства ледяных переправ, автозимников и взлетно-посадочных полос. В этих случаях необходимо сохранять несущую способность ледяного покрова.

Для решения указанных ледотехнических проблем может быть использован резонансный метод разрушения ледяного покрова амфибийным судном на воздушной подушке (СВП), т.е. посредством возбуждения резонансных изгибно-гравитационных волн.

Сущность резонансного метода разрушения ледяного покрова, изложена в работах [4; 7] и заключается в возбуждении в ледяном покрове резонансных изгибно-гравитационных волн (ИГВ). В работах В.М. Козина и В.Д. Жесткой разработаны зависимости для расчета напряженно-деформированного состояния ледяного покрова в случае движения по нему распределенной нагрузки при различных граничных условиях на берегах ледяного поля и законах движения нагрузки [1]. Нестационарное прямолинейное движение СВП рассматривалось А. В. Погореловой [10]. И.В. Стурова исследовала движение нагрузки по ледяному покрову в условиях переменной глубины бассейна для двухмерной задачи [11]. Работы Л.А. Ткачевой [12; 13] посвящены плоской задаче о влиянии периодической внешней нагрузки на колебания полубесконечной упругой пластины и полосы. В. Сквайр в работе [14] обобщил результаты исследований разных авторов, исследовавших движение нагрузок по ледяному покрову. Ф. Милиназо, К. Ванг и другие математически исследовали стационарное и нестационарное движение нагрузки по ледяному покрову [16]. Т. Такизава экспериментально изучал деформации ледяного покрова при движении по нему нагрузки [15].

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 конкретных ледовых условиях. 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 $\lambda_p/4$ [7; 15; 8] (где λ_p – длина резонансных ИГВ [7]).

Данная работа посвящена исследованиям закономерностей деформирования ледяного покрова при движении по нему нескольких (в нашем случае двух) нагрузок.

Выполненные предварительные экспериментальные исследования с полунатурными и натурными СВП (см. рис. 1 – 2) показали перспективность такого подхода [4].



Рис. 1. Спаренная работа крупномасштабных моделей СВП



Рис. 2. КВП «Скат» при групповой работе по разрушению льда (движение фронтом)

Экспериментально-теоретические исследования

Теоретические исследования влияния взаимного расположения СВП на параметры возбуждаемых ими ИГВ проводились на основании решения дифференциального уравнения малых колебаний плавающей вязкоупругой пластины под действием внешней нагрузки, которое можно записать в виде [10]

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

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

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

где

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

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

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 [5; 8], в натуральных условиях [3; 9] и естественном льду в ледовом бассейне лаборатории «Ледотехника» Приамурского государственного университета имени Шолом-Алейхема. На рис. 3 показано состояние ледяного покрова после прохождения двух нагрузок фронтом. 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 [2]. Опыты проводились при глубине воды 80 см и толщине намораживаемого модельного льда 0.3 см.

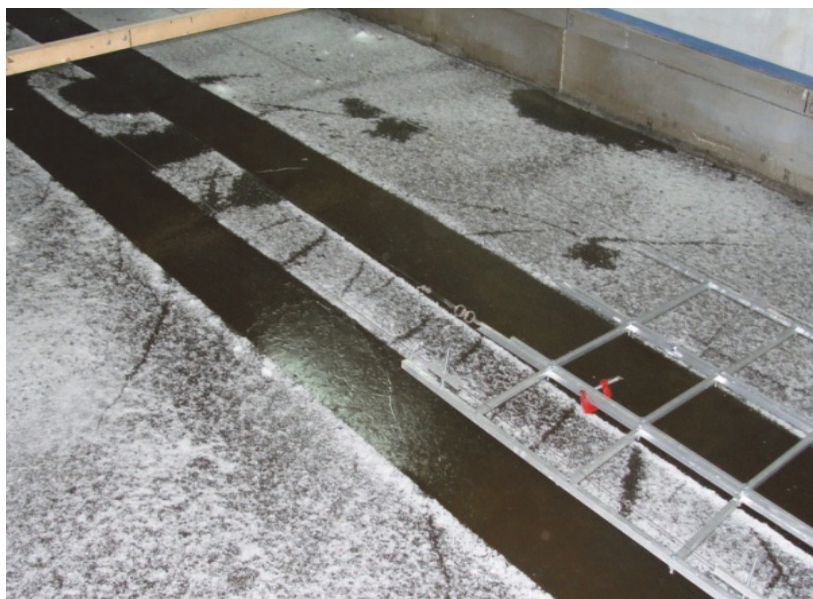


Рис. 3. Характер разрушения модельного льда $h_m = 0.003$ м после прохождения моделей СВП массой $m_m = 2.84$ кг при полном счаливании со скоростью $u_m = 1.9$ м/с

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

$$w_k(x, y) = w(x, y) + w(x + L_x, y); \quad (1)$$

$$w_f(x, y) = w(x, y) + w(x, y - L_y), \quad (2)$$

где L_x – расстояние между нагрузками при движении кильватерным строем; 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; $m = 2.84$ 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.

Объем экспериментальных исследований был ограничен размерами ледового бассейна. Поэтому расчеты были выполнены для полученных экспериментальных w при параметрах льда: $\rho_l = 900$ кг/м³; $h = 0.5$ м; $H = 50$ м; $E = 1 \cdot 10^9$ Н/м².

Из рис. 4 видно, что результаты теоретических исследований удовлетворительно согласуются с результатами экспериментов.

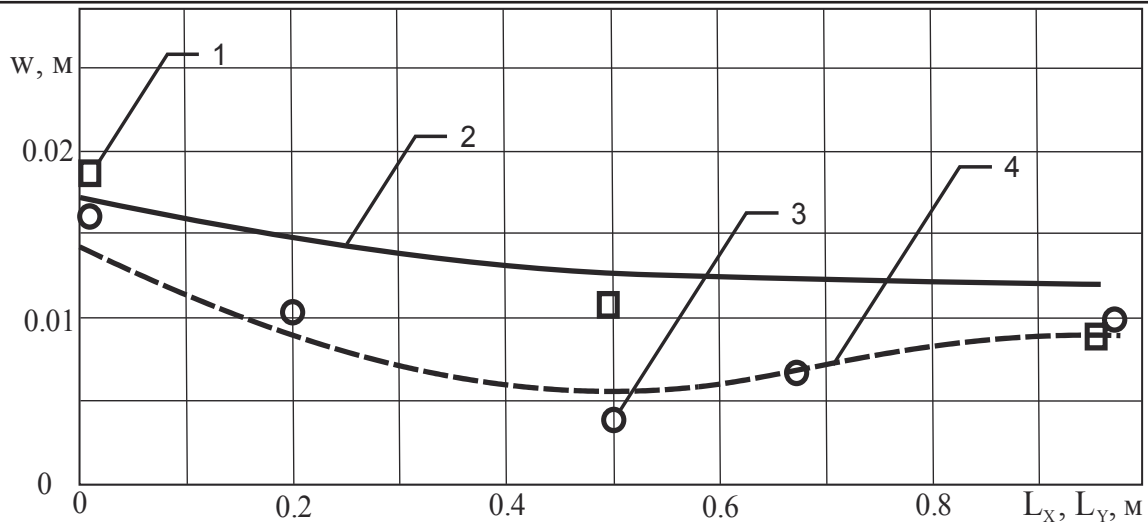


Рис. 4. Прогиб ледяной пластины при движении по ней нагрузок: 1 – экспериментальные данные при движении фронтом; 2 – расчетные данные при движении фронтом; 3 – экспериментальные данные при движении кильватерным строем; 4 – расчетные данные при движении кильватерным строем

Также была проведена серия экспериментов в опытовом бассейне размерами $L \times B \times H = 5 \times 1.8 \times 0.6$ м лаборатории «Механика сплошных сред» Амурского гуманитарно-педагогического государственного университета [6]. Масштаб моделирования $\lambda = 1:500$ был выбран в зависимости от модуля Юнга пластины в соответствии с методикой моделирования, изложенной в работе [8], при этом длина бассейна также обеспечивала выход на стационарный режим движения модели нагрузки.

При таком масштабе была проведена более широкая серия опытов, что позволило оценить влияние парной работы нагрузок на коэффициент изменения деформации k , представляющего собой отношение максимального прогиба льда при парном движении нагрузок к максимальному прогибу от прохождения одиночной нагрузки

$$k = \frac{w_2}{w_1},$$

где w_2 – прогиб льда при движении двух нагрузок, движущихся фронтом или кильватерным строем; w_1 – прогиб льда при движении одиночной нагрузки, соответствующий полному разрушению ледяного покрова.

Использование коэффициента k для определения изменения ледоразрушающей способности ИГВ возможно вследствие прямо пропорциональной связи между деформациями и изгибными напряжениями, возникающими в ледяном покрове, т.е. с его помощью можно в зависимости от взаимного расположения судов определить дополнительную к одиночному СВП нагрузку, необходимую для разрушения ледяного покрова заданной толщины.

При проведении этих экспериментов использовалась схематизированная модель СВП «Зубр». Ее параметры в соответствии с масштабом составляли: $l_m = 0.11$ м; $b_m = 0.04$ м; $m = 0.046$ кг. В качестве модельного ледяного покрова использовалась упругая (резиновая) пленка толщиной 2 мм с модулем упругости $E = 2 \cdot 10^6$ Н/м².

Сопоставление результатов экспериментальных и теоретических исследований (см. рис. 5) показало также удовлетворительное совпадение.

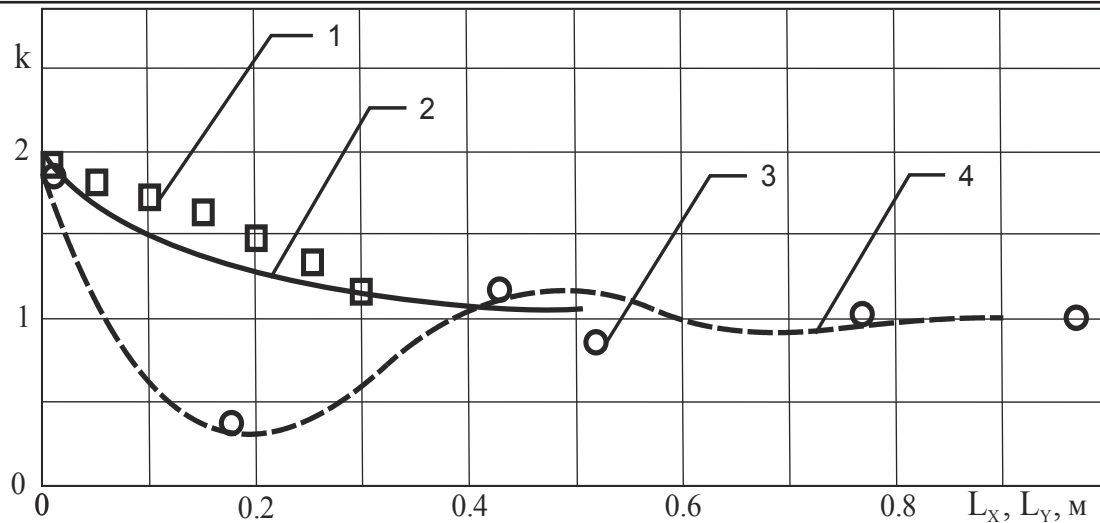


Рис. 5. Зависимость коэффициента изменения деформации k от взаимного расположения нагрузок: 1 – экспериментальные данные при движении фронтом; 2 – расчетные данные при движении фронтом; 3 – экспериментальные данные при движении кильватерным строем; 4 – расчетные данные при движении кильватерным строем

В качестве примера на рис. 6 приведены результаты расчетов в виде зависимостей коэффициентов изменения деформаций льда под действием двух СВП при равномерном движении судов фронтом для разных расстояний между бортами и кильватерным строем при разных расстояниях между кормой и носом судов. Расчеты выполнены с использованием формул (1) – (2) при следующих значениях параметров, соответствующих натурному СВП «Зубр»: $L_n = 57.3$ м; $B_n = 22.3$ м; $q_0 = 5.3 \cdot 10^3$ Н/м²; характеристиках льда: $h = 1$ м; $\rho_1 = 900$ кг/м³; $\rho_2 = 1000$ кг/м³; $E = 1 \cdot 10^9$ Н/м²; $\nu = 0.33$; $\tau_\phi = 0.69$ с; $H = 5$ м.

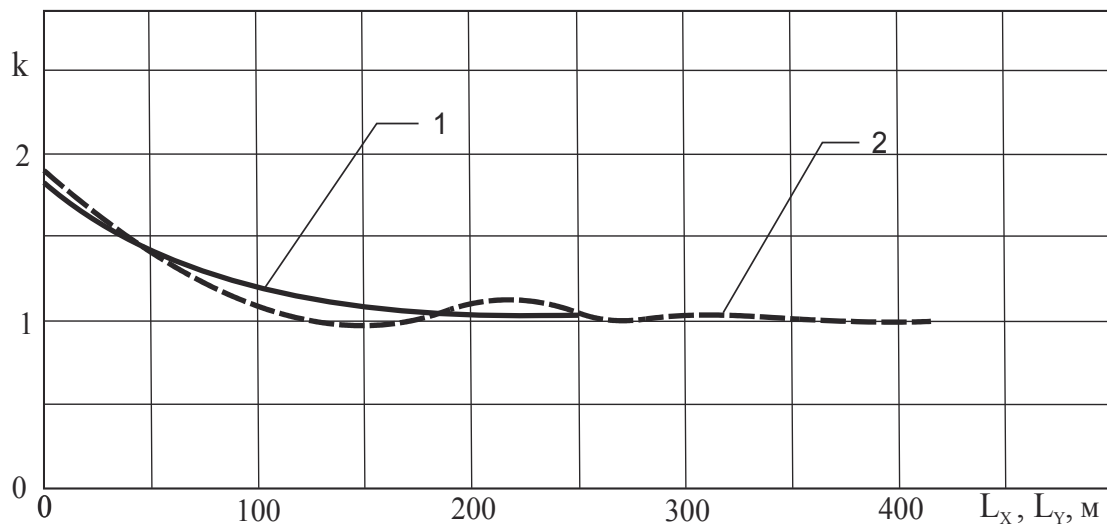


Рис. 6. Коэффициент изменения деформации пластины k при движении по ней нагрузок: 1 – движение фронтом; 2 – движение кильватерным строем

Результаты выполненных исследований могут быть использованы в следующей последовательности:

1. Вначале по графическим зависимостям (см. рис. 7) [7] определяют максимальную толщину ледяного покрова, который способно разрушить СВП массой M_c и давлением в воздушной подушке $P_{ВП}$ имеющихся судов при их одиночной работе.

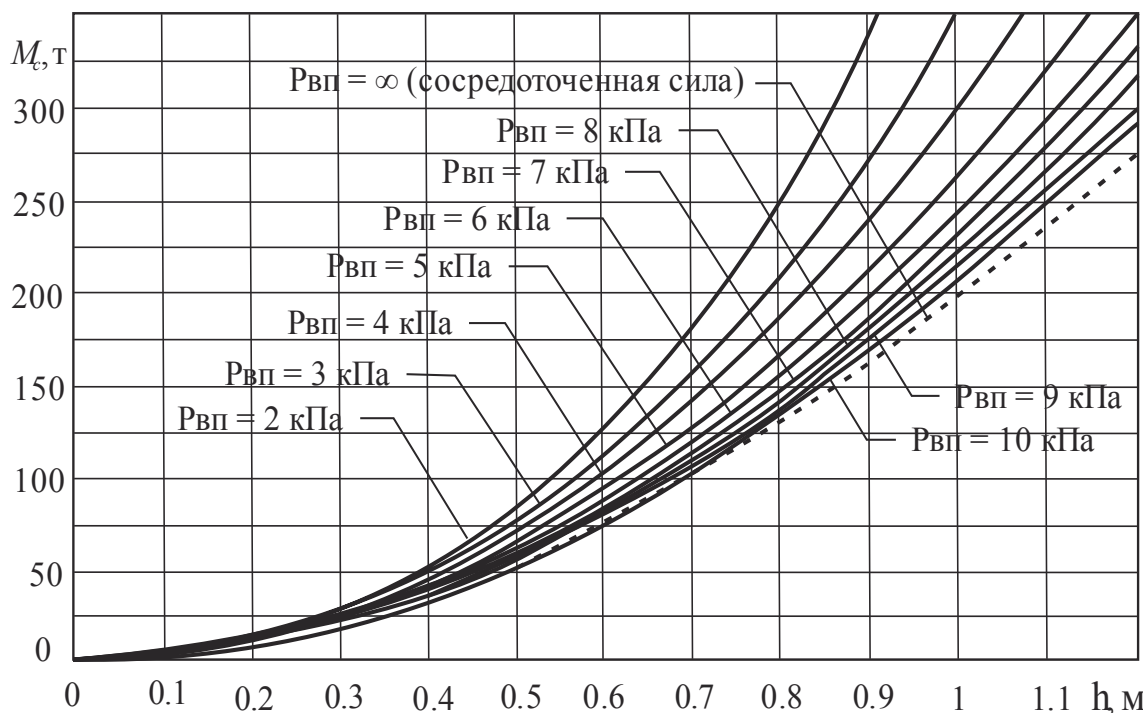


Рис. 7. Зависимость M_c СВП от толщины ледяного покрова и давления в воздушной подушке

2. Если масса имеющегося СВП M_0 с давлением $P_{ВП}$ не обеспечивает ему необходимую ледоразрушающую способность (толщину разрушаемого льда, т.е. $M_0 < M_c$), то в зависимости от параметров акватории (ширины, изгибов русла реки, протяженности его прямолинейных участков и др.) выбирают наиболее приемлемые и безопасные виды маневрирования одновременно двух (при необходимости и более) СВП с целью достижения желаемого результата – разрушения ледяного покрова заданной толщины. Если, например, ледокольные работы следует выполнить на водоеме, ограниченном по ширине, когда близость берегов из-за примерзших к ним береговых кромок ледяного покрова будет уменьшать амплитуду возбуждаемых СВП, или протяженность водоема незначительна (соизмерима с длиной ИГВ), то движение СВП кильватерным строем может оказаться предпочтительнее по сравнению с движением фронтом и т.п. При этом необходимо помнить, что движение СВП фронтом более безопасно.

3. Определяют дополнительную нагрузку от массы второго СВП M_g , способную возбудить систему дополнительных ИГВ, которые накладывались на основную, возбуждаемую первым СВП (массой M_0), позволят разрушить ледяной покров толщиной, превышающей ледоразрушающую способность одиночного судна.

Эту нагрузку определяют по зависимости

$$M_g = M_c - M_0.$$

4. Дополнительную нагрузку M_g в целях обеспечения безопасности эксплуатации судов следует создавать при наибольшем расстоянии между ними. Поскольку изгибные напряжения в ледяном покрове в нашем случае прямо пропорциональны его прогибам, то минимально достаточный коэффициент увеличения дополнительной нагрузки определится так:

$$k = \frac{M_g}{M_0}.$$

5. Максимальное расстояние между СВП, обеспечивающее достаточную ледоразрушающую способность судам, определяют по рис. 6, понимая под коэффициентом k соответствующую кривую.

Выводы

Экспериментально-теоретические исследования показали целесообразность использования интерференции ИГВ для повышения эффективности резонансного метода разрушения ледяного покрова.

Определена зависимость коэффициентов изменения деформации ледяного покрова от расстояния между нагрузками при движении судов фронтом и кильватерным строем, определяющих изменение ледоразрушающих свойств ИГВ при парном движении СВП.

Показана работоспособность использованных математических зависимостей при исследованиях деформированного состояния ледяного покрова от возбуждаемых в нем ИГВ.

Исследования показали, что движение СВП кильватерным строем не целесообразно при использовании более двух судов вследствие быстрого затухания возбуждаемых ИГВ.

Использование СВП при движении «фронтом» более 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.

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. Жесткая, В. Д. Исследования возможностей разрушения ледяного покрова амфибийными судами на воздушной подушке резонансным методом / В. Д. Жесткая, В. М. Козин. – Владивосток: Дальнаука, 2003.
2. Земляк, В. Л. Лаборатория «Ледотехника» / В. Л. Земляк, Н. О. Баурин, Д. А. Курбацкий // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. – 2013. – № 1 (12). – С. 068-077.
3. Иванов, К. Е. Деформация ледового покрова при движении грузов / К. Е. Иванов, П. П. Кобеко, А. Р. Шульман // Журнал технической физики. – 1946. – Т. 16. – С. 257-262.
4. Козин, В. М. Резонансный метод разрушения ледяного покрова. Изобретения и эксперименты / В. М. Козин. – М.: Академия Естествознания, 2007.
5. Прикладные задачи динамики ледяного покрова / В. М. Козин, В. Д. Жесткая, А. В. Погорелова [и др.]. – М.: Академия Естествознания, 2008. – 330 с.
6. Козин, В. М. Лаборатория механики сплошных сред. В 2 ч. Ч. 1 / В. М. Козин, В. Л. Земляк // Вестник ГОУ ВПО «КнАГТУ». – Вып. 13. – 2009. – С. 244-246.
7. Козин, В. М. Физические основы разрушения ледяного покрова резонансным методом / В. М. Козин, В. Л. Земляк. – Комсомольск-на-Амуре: ИМиМ ДВО РАН, ПГУ им. Шолом-Алейхема, АмГПГУ, 2013.
8. Козин, В. М. Моделирование изгибно-гравитационных волн в сплошном ледяном покрове / В. М. Козин, // В кн.: Теория и прочность ледокольного корабля. – Горький: Изд. ГПИ им. А.А. Жданова, 1982. – Вып. 3. – С. 35-38.
9. Песчанский, И. С. Ледоведение и ледотехника / И. С. Песчанский. – Х.: Гидрометеиздат, 1967. – 467 с.
10. Погорелова, А. В. Особенности волнового сопротивления СВПА при нестационарном движении по ледяному покрову / А. В. Погорелова // ПМТФ. – 2008. – Т. 49. – № 1. – С. 89-99.
11. Стурова, И. В. Влияние топографии дна на нестационарное поведение упругой пластины, плавающей на мелководье / И. В. Стурова // ПМТФ. – 2008. – Т. 72. – № 4. – С. 588-600.
12. Ткачева, Л. А. Воздействие периодической нагрузки на плавающую упругую пластину / Л. А. Ткачева // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. – 2005. – № 2. – С. 132-146.

13. Ткачева, Л. А. Плоская задача о колебаниях плавающей упругой пластины под действием периодической внешней нагрузки / Л. А. Ткачева // ПМТФ. – 2004. – Т. 45. – № 3. – С. 136-145.
14. Squire VA, Hosking RJ, Kerr AD and Langhorne PJ / Moving Loads on Ice Plates / VA Squire, RJ Hosking, AD Kerr and PJ Langhorne.: Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1996.
15. Takizawa, T. Response of a Floating Sea Ice Sheet to a Moving Vehicle / T. Takizawa // Proc. Fifth International Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symp. – Tokyo, 1986. – V. 4. – P. 614-621.
16. Wang, K. Time-dependent response of a floating viscoelastic plate to an impulsively started moving load / K. Wang, RJ. Hosking, F. Milinazzo // J. Fluid Mech. – 2004. – V. 521. – P. 295-317.