

Научная статья

УДК 624.124

doi: 10.17223/19988621/99/11

Влияние ледовых условий на эффективность разрушения ледяного покрова резонансным методом

Виктор Михайлович Козин

Институт машиноведения и металлургии Хабаровского федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук, Комсомольск-на-Амуре, Россия, kozinvictor@rambler.ru

Аннотация. На основании современной физической модели, описывающей совокупность напряжений и деформаций, возникающих при действии на плавающую пластину внешней нагрузки, получены данные для выяснения точного значения критерия, который приводит к полному разрушению льда амфибийным судном, у которого вся масса поддерживается над водой силами избыточного давления воздуха, постоянно нагнетаемого под днище, с учетом рельефа льда и слоя снега на ледяной поверхности. Физическая зависимость между напряжениями и деформациями описывалась материалом Фойгта. Снежный покров моделировался вязким слоем.

Ключевые слова: амфибийное судно, лед, снег, плавающая пластина, разрушение, глубина водосема

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания Института машиноведения и металлургии Хабаровского федерального исследовательского центра ДВО РАН.

Для цитирования: Козин В.М. Влияние ледовых условий на эффективность разрушения ледяного покрова резонансным методом // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2026. № 99. С. 154–161. doi: 10.17223/19988621/99/11

Original article

The impact of ice conditions on the efficiency of ice cover destruction using the resonance method

Viktor M. Kozin

Institute of Machine Science and Metallurgy, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation, kozinvictor@rambler.ru

Abstract. This paper indicates the feasibility of using the resonance method of ice cover destruction by amphibious air-cushion vehicles. The essence of flexural-gravity resonance is explained, as well as the possibility of applying this method to solve a number of ice-

engineering problems: breaking ice cover in shallow waters, where the water depth is inaccessible to icebreakers due to their draft; breaking ice jams and ice gorges during spring break-up to prevent destructive floods; breaking ice over large areas when servicing hydroelectric power plants and opening the ice cover of reservoirs and river bays to enable earlier navigation on inland waterways, etc.

Based on the theoretical dependencies developed for calculating the stress–strain state of the ice cover under a moving load, the results are obtained for determining the ice-breaking capacity of vessels with account for variations in water depth and the presence of a snow cover on the ice under resonant conditions. When describing the relations between stresses and strains in ice, the Voigt model of viscoelastic deformation is used. The snow cover is modeled as a viscous layer.

It is found that such ice conditions as water depth and snow-covered ice significantly affect the ice-breaking capability, i.e., the efficiency of ice cover destruction by the resonance method. Dependencies are presented for determining the main vessel parameters that ensure complete destruction of the ice cover with a given ice thickness and specified ice conditions. It is concluded that, to increase efficiency, icebreaking operations should be initiated in snow-free ice areas, near the shore, and in shallow waters.

Keywords: amphibious vessel, ice, snow, floating plate, destruction, depth of the reservoir

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Mechanical Engineering and Metallurgy of the Khabarovsk Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Kozin, V.M. (2026) The impact of ice conditions on the efficiency of ice cover destruction using the resonance method. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 99. pp. 154–161. doi: 10.17223/19988621/99/11

Введение

Целесообразность реализации метода разрушения льда с помощью резонанса [1], заключающегося в обеспечении совместных колебаний льда и воды и приводящего к его растрескиванию при движении амфибийного судна (СВП) со скоростью, соответствующей значительному увеличению высоты колебаний льда [2], возникает при затруднительном применении самоходных специализированных судов, предназначенных для различных ледокольных операций. Таковыми являются: разрушение ледяных образований в местах возвышения дна, т.е. подводного рельефа, при котором глубина воды меньше, чем в окружающих точках; ликвидация скопления льдин во время ледохода, а также шуги и других видов внутреннего льда в период весеннего ледостава с целью упреждения возникновения затопления территорий; обеспечение в весенний период более раннего передвижения любых судов по водным путям.

Для решения перечисленных ледотехнических задач судну следует обеспечить необходимую ледоразрушающую способность [3, 4]. Для ее оценки нужно получить зависимость толщины разрушаемого льда от массы судна и давления в его воздушной подушке при резонансной скорости движения [1] с учетом соответствующих ледовых условий. Эта зависимость для чистого от снега льда для фиксированной глубины воды приведена в работе [5]. Обычно ледяной покров без снега встречается редко. В процессе выполнения работ по разрушению льда

изменяется и глубина воды. Эти ледовые условия существенно влияют на параметры возбуждаемых изгибно-гравитационных волн (ИГВ) [6, 7], т.е. их ледоразрушающую способность, что требует корректировки полученных зависимостей.

Целью работы является определение зависимости толщины льда, разрушаемого СВП при движении со скоростью резонансных ИГВ [1], от глубины воды и наличия снежного покрова.

Статья состоит из введения, двух разделов и заключения. В первом разделе приведены основные использованные теоретические зависимости, во втором – результаты определения ледокольных качеств судов.

1. Основные теоретические зависимости

В большинстве задач по разрушению ледяного покрова используется модель материала, обладающего свойством возвращаться в изначальную форму при упругой деформации, при этом его физико-механические свойства не зависят от направления приложения нагрузки. Для описания совокупности напряжений и деформаций, возникающих при воздействии на плавающую пластину внешней нагрузки, используются зависимости изгиба упругих пластин. Однако ледяной покров является материалом с неодинаковыми свойствами по различным направлениям из-за перепада температуры по толщине льда, химического состава и наличия примесей, кристаллической структуры, минерализации, степени покрытия поверхности льда снегом, фазы ледового режима и пр. В задачах волновых колебаний льда это учитывается благодаря использованию модели многослойного материала, у которого свойства одинаковы во всех направлениях только в каждом отдельном слое, с последующим переходом к изотропному материалу с модулем упругости, получаемым из соотношения модулей упругости слоев материала. Таким образом, зависимость между напряжениями и деформациями во льду носят вязкоупругий характер и зависят от режима нагружения. Учет этих свойств в условиях изгибно-гравитационного резонанса (ИГР) позволяет избавиться от неопределенности в теоретических решениях и получить реальную картину напряженно-деформированного состояния (НДС) ледяного покрова вблизи приложенной нагрузки.

Как известно [8], для описания волновых колебаний льда при ИГР можно принять закон деформирования упруго-запаздывающей среды Кельвина–Фойгта. Тогда дифференциальное уравнение вязкоупругих колебаний ледяного покрова при установившемся движении сосредоточенной силы P с постоянной скоростью v будет иметь вид [5]:

$$\frac{Gh^3}{3} \left(1 + \tau_\phi \frac{\partial}{\partial t} \right) \nabla^4 w + (\rho_a h + \rho_c h_c) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \eta_c h_c \frac{\partial}{\partial t} \nabla^2 w + \rho_B g w + \rho_B \left. \frac{\partial \Phi}{\partial t} \right|_{z=0} = P \delta(x - vt, y - 0) \quad (1)$$

где: G – модуль сдвига для льда; h – толщина ледяной пластины; ∇ – векторный дифференциальный оператор; τ_ϕ – время уменьшения напряжений в e раз (e – основание натурального логарифма); w – прогиб льда; ρ_B , ρ_c , ρ_a – плотность воды, снега и льда; g – ускорение свободного падения; η_c – коэффициент вязкости снега; Φ – скалярная функция, описывающая потенциальное течение жидкости; δ – функция Дирака, описывающая сосредоточенные силы; x , y , z – неподвижная система координат.

Его решение для нагрузки в виде амфибийного судна длиной $2a$ и шириной $2b$ записывается как

$$w = \frac{q}{\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{C[A \cos \varphi - B \sin \varphi] d\lambda d\eta}{A^2 + B^2}, \quad (2)$$

где

$$A = \lambda \eta \left[\frac{Gh^3}{3} (\lambda^2 + \eta^2)^2 - \lambda^2 v^2 (\rho_a h + \rho_c h) + \rho_B g - \frac{\rho_B \lambda^2 v^2}{th(H \sqrt{\lambda^2 + \eta^2}) \sqrt{\lambda^2 + \eta^2}} \right];$$

$$B = i \left[\frac{Gh^3}{3} \tau_\phi \lambda v (\lambda^2 + \eta^2) - \eta_c h_c \lambda v (\lambda^2 + \eta^2) \right];$$

$$C = \sin \lambda a \sin \eta b;$$

$$\varphi = \lambda(x - vt) + \eta y.$$

Выражения для изгибающих моментов получены в виде:

$$\begin{cases} M_x = -\frac{Gh^3}{3} [D_1 + \mu D_2 + \tau_\phi (D_4 + \mu D_5)]; \\ M_y = -\frac{Gh^3}{3} [D_2 + \mu D_1 + \tau_\phi (D_5 + \mu D_4)]; \\ M_{xy} = \frac{Gh^3(1-\mu)}{3} (D_3 + \tau_\phi D_6). \end{cases}$$

где

$$D_1 = \frac{q}{\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\lambda^2 C (-A \cos \varphi + B \sin \varphi) d\lambda d\eta}{A^2 + B^2},$$

$$D_2 = \frac{q}{\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\eta^2 C (-A \cos \varphi + B \sin \varphi) d\lambda d\eta}{A^2 + B^2},$$

$$D_3 = \frac{q}{\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\lambda \eta C (-A \cos \varphi + B \sin \varphi) d\lambda d\eta}{A^2 + B^2},$$

$$D_4 = \frac{q}{\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\lambda^3 \eta C (-A \cos \varphi + B \sin \varphi) d\lambda d\eta}{A^2 + B^2},$$

$$D_5 = \frac{q}{\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\lambda \eta^2 v C (-A \cos \varphi - B \sin \varphi) d\lambda d\eta}{A^2 + B^2},$$

$$D_6 = \frac{q}{\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\lambda^2 \eta v C (-A \cos \varphi - B \sin \varphi) d\lambda d\eta}{A^2 + B^2}.$$

Максимальные погонные напряжения (отнесенные к единице длины) определены из зависимостей:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{6M_x}{h^2}; & \sigma_y &= \frac{6M_y}{h^2}; \\ \tau_{xy} &= \frac{6M_{xy}}{h^2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Определение ледокольных качеств амфибийных судов

На основании выполненных экспериментов в опытовых бассейнах, на мелко- и крупномасштабных моделях, а также на натурных СВП [1] с использованием критерия полного разрушения ледяного покрова, разработанного с помощью оценки уровня теоретической плотности потенциальной энергии изгиба пластины U [9]

$$U = \frac{h}{4G(1+\mu)} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - 2\mu\sigma_x\sigma_y + 2(1+\mu)\tau_{xy}^2] dx dy \quad (4)$$

рассчитана зависимость толщины разрушаемого льда от параметров амфибийных судов – массы M и давления в воздушной подушке $P_{вп}$ (рис. 1). Следует заметить, что под полным разрушением будем понимать не только образование во льду сквозных трещин, их раскрытие и смещение кусков ледяного покрова относительно друг друга, но и такую стадию его разрушения, когда его несущая способность не превышает архимедовых сил плавучести обломков льда, что происходит при достижении теоретической плотности потенциальной энергии при его изгибе определенного уровня [5].

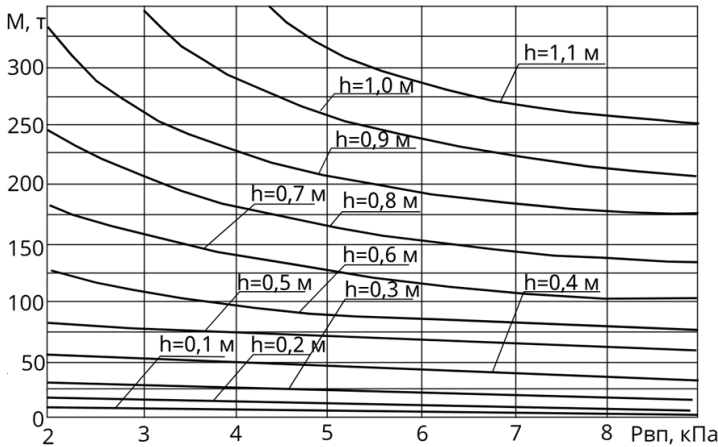


Рис. 1. Зависимость толщины разрушаемого льда от параметров амфибийных судов
Fig. 1. Dependence of the thickness of breakable ice on the parameters of amphibious vessels

Полученная зависимость рассчитана при глубине воды $H = 5$ м и отсутствии снежного покрова. При других глубинах и наличии снега параметры ИГВ, а значит, и их ледоразрушающая способность существенно изменяются [1, 6]. Поэтому полученную зависимость необходимо корректировать при изменении глубины и заснеженности ледяного покрова с помощью коэффициента $k = U_0/U_{сн}$, где: U_0 – плотность энергии при отсутствии снежного покрова и глубине $H = 5$ м; $U_{сн}$ – плотность энергии при наличии снега и других глубинах.

В качестве примера на рис. 2 приведены результаты расчета этого коэффициента для заснеженного ледяного покрова толщиной $h = 0.5$ м с наиболее вероятными физико-механическими характеристиками льда: $G = 4$ ГПа, $\mu = 0,34$ [5]; снега: $\eta_c = 0.3 \cdot 10^5$ пуаз; $\rho_c = 200$ кг/м³ [10, 11] и разных глубин.

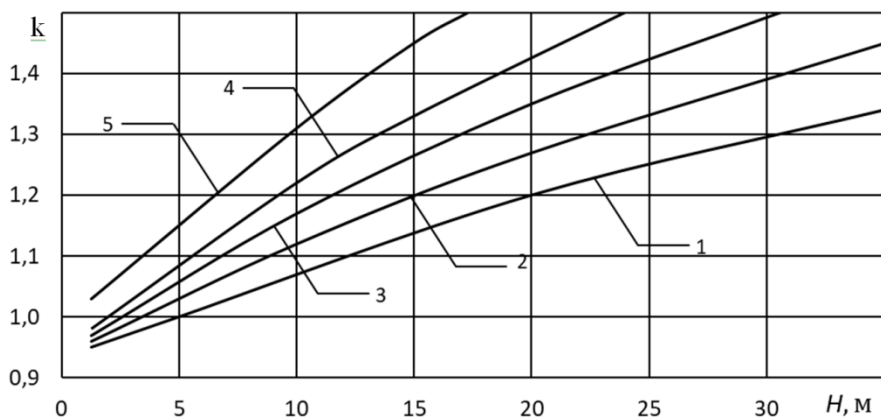


Рис. 2. Зависимость коэффициента k от условий ледовой обстановки при толщине льда $h = 0.5$ м: 1 – без снежного покрова; при его наличии: 2 – $h_c = 0.25$ м; 3 – $h_c = 0.50$ м; 4 – $h_c = 0.75$ м; 5 – $h_c = 1.00$ м

Fig. 2. Coefficient k as a function of ice conditions at the ice thickness $h = 0.5$ m: (1) without snow cover; with snow cover at $h_c =$ (2) 0.25, (3) 0.50, (4) 0.75, and (5) 1.00 m

Тогда масса СВП, достаточная для разрушения заснеженного ледяного покрова и заданной глубины, определится из выражения

$$M^* = Mk. \quad (5)$$

Заключение

Выполненные исследования позволяют сделать вывод о существенном влиянии на ледоразрушающую способность, т.е. эффективность разрушения ледяного покрова резонансным методом, таких ледовых условий, как глубина воды и заснеженность льда. Используя приведенные на рис.1, 2 зависимости и выражение (5), можно определить основные параметры СВП (массу и давление в воздушной подушке), гарантирующие полное разрушение ледяного покрова с заданными его толщиной и ледовыми условиями. Из полученных результатов также следует, что ледокольные работы для повышения их эффективности следует начинать на чистых от снега участках льда и вблизи берега, на отмелях, т.е. на малых глубинах.

Список источников

1. Козин В.М. Резонансный метод разрушения ледяного покрова: изобретения и эксперименты. М.: Академия естествознания, 2007. 355 с.
2. Козин В.М., Земляк В.Л., Куркин А.А., Беляков В.В. Избранные задачи ледотехники: средства и методы решения. Н. Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева, 2023. 772 с.
3. Гриневич Д.В., Бузник В.М., Нужный Г.А. Обзор применения численных методов для моделирования деформации и разрушения льда // Труды ВИАМ. 2020. № 8 (90). С. 109–122. doi: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-109-122
4. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлов Ю.Н. Разрушение льда при ударных и взрывных нагрузках: численное моделирование, эксперимент // Актуальные проблемы современной

- механики сплошных сред и небесной механики: труды Томского государственного университета / под ред. М.Ю. Орлова. Томск: Том. гос. ун-т, 2019. С. 9–23. doi: 10.17223.978-5-7511-2582-0/1
5. Козин В.М. Результаты экспериментально-теоретических исследований возможностей резонансного метода разрушения ледяного покрова // Изв. РАН. Механика твердого тела. 2023. № 3. С. 3–20.
 6. Букатов А.Е. Волны в море с плавающим ледяным покровом. Севастополь: ФГБУНМГИ, 2017. 360 с.
 7. Petrov I.B. Problems of Modeling Natural and Anthropogenic Processes in the Arctic Zone of the Russian Federation // *Mathematical Models and Computer Simulations*. 2019. V. 11 (2). P. 226–246. doi: 10.1134/S2070048219020145
 8. Хейсин Д.Е. Динамика ледяного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1967. 216 с.
 9. Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. Пластины и оболочки. М.: Изд-во физ.-мат. лит., 1963. 653 с.
 10. Богородский В.В., Галкин Е.И. Исследование внутреннего трения пластин льда со слоем снега при изгибных колебаниях // Акустический журнал. 1966. Т. 12, вып. 4. С. 411–415.
 11. Войтковский К.В. Реология льда и снега // Труды Первого Всесоюзного симпозиума по реологии грунтов (Дилижан, 20–25 апреля 1972 г.) Ереван: Изд-во Ереван. ун-та, 1973. С. 26–42.

References

1. Kozin V.M. (2007) *Rezonansnyy metod razrusheniya ledyanogo pokrova. Izobreteniya i eksperimenty* [Resonant method of ice cover destruction. Inventions and experiments]. Moscow: Academy of Natural Sciences.
2. Kozin V.M., Zemlyak V.L., Kurkin A.A., Belyakov V.V. (2023) *Izbrannye zadachi ledotekhniki. Sredstva i metody resheniya* [Selected problems on ice engineering. Means and methods of solution]. Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State Technical University.
3. Grinevich D.V., Buznik V.M., Nuzhnyy G.A. (2020) Obzor primeneniya chislennykh metodov dlya modelirovaniya deformatsii i razrusheniya l'da [Review of the application of numerical methods for modeling ice deformation and fracture]. *Trudy VIAM – Proceedings of VIAM*. 8(90). pp. 109–122. doi: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-109-122
4. Glazyrin V.P. Glazyrin V.P., Orlov M.Yu, Orlov Yu.N. (2018) Razrushenie l'da pri udarnykh i vzryvnykh nagruzkakh. Chislennoe modelirovanie. Eksperiment [The destruction of ice under shock and explosive loads. Numerical modeling. Experiment]. *Aktual'nye problemy sovremennoy mekhaniki sploshnykh sred i nebesnoy mekhanik: Trudy Tomskogo gosudarstvennogo universiteta, Tomsk*. pp. 9–23. doi: 10.17223.978-5-7511-2582-0/1
5. Kozin V.M. (2023) Rezul'taty eksperimental'no-teoreticheskikh issledovaniy vozmozhnostey rezonansnogo metoda razrusheniya ledyanogo pokrova [Results of experimental and theoretical studies of the possibilities of the resonant method of ice cover destruction]. *Izvestiya RAN. Mekhanika tverdogo tela – Mechanics of Solids*. 3.pp. 3–20.
6. Bukatov A.E. (2017) *Volny v more s plavayushchim ledyanym pokrovom* [Waves in the sea with floating ice cover]. Sevastopol: FGBUNMGI.
7. Petrov I.B. (2019) Problems of modeling natural and anthropogenic processes in the arctic zone of the Russian Federation. *Mathematical Models and Computer Simulations*. 11(2). pp. 226–246. doi: 10.1134/S2070048219020145
8. Kheysin D.E. (1967) *Dinamika ledyanogo pokrova* [Ice cover dynamics]. Leningrad: Gidrometeoizdat.
9. Timoshenko S.P., Voinovskiy-Kriger S. (1963) *Plastiny i obolochki* [Plates and shells]. Moscow: Izdatel'stvo fiziko-matematicheskoy literatury.
10. Bogorodskiy V.V., Galkin E.I. (1966) Issledovanie vnutrennego treniya plastin l'da so sloem snega pri izgibnykh kolebaniyakh [Investigation of the internal friction of ice plates with

a layer of snow during bending vibrations]. *Akusticheskiy zhurnal – Acoustic Journal*. 12(4). pp. 411–415.

11. Voytkovskiy K.V. (1973) Reologiya l'da i snega [Ice and snow rheology]. *Pervyy vsesoyuznyy simpozium po reologii gruntov. Erevan*. pp. 26–42.

Сведения об авторе:

Козин Виктор Михайлович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории проблем создания и обработки материалов и изделий Института машиноведения и металлургии Хабаровского федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук (Комсомольск-на-Амуре, Россия). E-mail: kozinvictor@rambler.ru

Information about the author:

Kozin Viktor M. (Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher, Laboratory of Problems of Creation and Processing of Materials and Products, Institute of Mechanical Engineering and Metallurgy of the Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation). E-mail: kozinvictor@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 20.02.2025; принята к публикации 05.02.2026

The article was submitted 20.02.2025; accepted for publication 05.02.2026