

УДК 531.001.362

**В. М. Козин, В. Л. Земляк****ВЫБОР КРИТЕРИЯ ОЦЕНКИ ЛЕДРАЗРУШАЮЩИХ СВОЙСТВ ИЗГИБНО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН, ВОЗБУЖДАЕМЫХ ДВИЖУЩИМИСЯ НАГРУЗКАМИ**

В работе рассмотрены критерии оценки ледоразрушающей способности изгибно-гравитационных волн, такие как теоретический уровень изгибных напряжений  $2,1[\sigma]_0$ , предельная плотность потенциальной энергии изгиба  $U$  и геометрический критерий  $\alpha$ , характеризующий кривизну изгибно-гравитационных волн. Проанализирован выбор наиболее оптимального критерия  $\alpha$  для оценки ледоразрушающей способности изгибно-гравитационных волн, генерируемых движущейся нагрузкой в виде погружённого тела вблизи нижней поверхности льда.

*Ключевые слова:* лёд, изгибно-гравитационные волны, критерий ледоразрушения, погружённое тело.

Для возможности прогнозирования ледоразрушающих качеств изгибно-гравитационных волн (ИГВ), генерируемых в ледяном покрове движущимися нагрузками с учётом влияния различных ледовых условий необходимо использовать критерий полного разрушения льда. В существующих расчётных методах используется уровень напряжённого состояния ледяного покрова. При этом ледяной покров считается разрушенным, если напряжения превышают соответствующие данному виду нагружения пределы прочности льда. Данный подход даёт удовлетворительные результаты до момента формирования во льду трещин, т. е. в тех случаях, когда полное разрушение ледяного покрова рассматривается как нежелательное явление, а для безопасного использования льда в технических целях требуется определённый запас его несущей способности. Для этих целей применим критерий Гриффитса, который позволяет определять и прогнозировать появление и рост трещин в ледяной пластине от действия различных нагрузок. Использование подобных критериев необходимо для определения несущей способ-

---

**Козин Виктор Михайлович** — доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией «Механика деформируемого твёрдого тела» (Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, Комсомольск-на-Амуре); e-mail: vellkom@list.ru

**Земляк Виталий Леонидович** — кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой технических дисциплин (Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема, Биробиджан); e-mail: vellkom@list.ru

*Работа выполнена в рамках проекта № 487 задания на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания вузу № 2014/422.*

© Козин В. М., Земляк В. Л., 2015

---

ности ледяного покрова при использовании его в качестве зимников, ледовых переправ, строительных грузонесущих платформ.

Возникновение во льду предельных напряжений, т. е. зарождение сквозных трещин и их частичное раскрытие не приводят к полной утрате его несущей способности. Экспериментально установлено [1; 2], что нагрузка, обеспечивающая полное разрушение ледяного покрова, должна существенно превышать нагрузку, вызывающую появление трещин. Таким образом, треснувшую ледяную пластину нельзя считать разрушенной, так как она сохраняет значительную остаточную несущую способность. Поэтому для гарантированного разрушения ледяного покрова необходимо создать больший уровень деформаций, чем тот, при котором напряжения достигают предела прочности льда.

Несущая способность льда, разделённого трещинами на отдельные льдины, сохраняется ввиду наличия контактных напряжений на берегах трещин. Несмотря на нарушение сплошности ледяной пластины, кинематическая и силовая связь области растрескивания с кромками сплошного ледяного покрова не позволяет распасться растрескавшемуся льду на отдельные ледяные блоки. Несущая способность льда будет полностью исчерпана после разрушения образовавшейся блочной конструкции, и она не сможет нести нагрузку выше сил плавучести обломков (архимедовых сил).

Генерирование во льду системы прогрессивных ИГВ приводит к трещинообразованию. Раскрытие трещин приводит к сколу острых кромок, а часть энергии ИГВ затрачивается на преодоление сил трения при смещении и поворачивании обломков. Колебания ледяного покрова сопровождаются диссипацией энергии в воде и ледяной пластине. Часть энергии ИГВ также рассеивается в присоединённых массах воды, при частичном отражении и преломлении волн в трещинах, в виде акустического излучения, вследствие дифракции, интерференции и т. п. Теоретически оценить энергетические затраты на разрушение льда до потери его полной несущей способности практически невозможно. Определить энергетические затраты даже на образование во льду свободных поверхностей крайне затруднительно из-за сложной геометрии разлома и густоты сетки нераскрытых трещин [1].

В работе [3] получен силовой критерий — теоретический уровень изгибных напряжений  $2,1[\sigma]_{л}$  (где  $[\sigma]_{л}$  — предел прочности льда на изгиб), при достижении которого достигается полное разрушение льда при нагружении его прогрессивными резонансными ИГВ.

В работе [4] для оценки ледоразрушающей способности ИГВ была использована такая интегральная характеристика, как энергия изгибно-гравитационных колебаний ледяного покрова. На основании закона сохранения энергии сделано заключение, что все энергозатраты на разрушение льда равны полной энергии ИГВ, генерируемых движущейся на-

грузкой. Полная энергия ИГВ состоит из потенциальной энергии изгиба ледяной пластины, энергии изгибной волны и гравитационной волны в воде. Как показали расчёты, две последних составляющих в общем балансе энергии в области деформации сплошного льда пренебрежимо малы по сравнению с первой. Поэтому для оценки полной энергии ИГВ использовалась потенциальная энергия изгиба ледяной пластины.

Критерием для разрушения льда ИГВ была принята предельная плотность потенциальной энергии изгиба  $U$ , достижение которой приводит к непрерывному разрушению льда. Величина  $U$  определялась по теоретическим полям напряжений, рассчитанным для минимальных значений нагрузок, разрушающих ледяной покров при изгибно-гравитационном резонансе [4]. Так как разрушение льда ИГВ носит локальный характер и происходит в непосредственной близости от места воздействия, то выражение для определения величины  $U$  с учётом масштабного эффекта, являющегося причиной снижения прочности более толстого льда, имеет вид:

$$U = \frac{1}{4G\lambda_\sigma k_m(1+\mu)} \int_0^{\lambda_\sigma} (\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - 2\mu\sigma_x\sigma_y + 2(1+\mu)\tau_{xy}^2) dx$$

где  $G$  – модуль упругости льда при изгибе;  $\lambda_\sigma$  – длина волны максимальных напряжений;  $k_m = \frac{\sigma_h}{\sigma_0}$  – коэффициент, учитывающий масштабный эффект;  $\sigma_h$  – предел прочности льда на изгиб толщиной  $h$ ;  $\sigma_0$  – предел прочности льда на изгиб толщиной  $h \geq 80$  см (при таких толщинах проявление масштабного эффекта несущественно);  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $\sigma_x, \sigma_y$  – нормальные напряжения;  $\tau_{xy}$  – касательные напряжения.

Результаты расчётов  $U$  для экспериментально полученных значений разрушающих нагрузок показали относительно стабильные значения величины плотности энергии равное  $U = 650$  Дж/м<sup>3</sup> [4]. Таким образом, если теоретическая плотность потенциальной энергии изгиба ледяного покрова ИГВ оказывается равной или больше найденного значения, то за нагрузкой, возбуждающей такие волны, будет происходить непрерывное разрушение ледяного покрова.

Таблица

Результаты расчётов теоретической плотности потенциальной энергии изгиба [4]

№ пп	Нагрузка	h, см	Масса, т	U, Дж/м <sup>3</sup>
1	ДКВП Скат	26	20,5	708
2	СВП-КнАПИ-1	2,5	0,34	724
3	СВП Гепард	7,5	1,8	582
4	СВП Вояджер	38	40,8	561
5	ДКВП Мурена	60	120	673
6	Среднее значение			650

В рамках исследования воздействия на ледяной покров ИГВ, генерируемых от движения погружённого тела вблизи нижней поверхности льда, описанные подходы мало приемлемы, что связано с трудностью

определения теоретических нормальных и касательных напряжений в ледяном покрове от гидродинамического воздействия при подлёдном движении.

Вместе с тем стадии разрушения льда можно оценивать и с помощью геометрических характеристик. Лабораторные исследования [5] позволили определить минимальный угол наклона касательной к сдеформированной поверхности, достаточный для полного разрушения льда при изгибе. Полученные результаты показали, что наклон должен быть не менее  $15^\circ$ . Тогда в качестве параметра для полного разрушения сплошного ледяного покрова, можно принять значение угла наклона касательной к изогнутой поверхности ледяной пластины, характеризующее кривизну ИГВ и равное величине,

$$\alpha = 2\pi\omega/\lambda$$

где  $\omega$  – значение прогиба ИГВ;  $\lambda$  – длина ИГВ.

В результате величина  $\alpha$  может быть использована в качестве критерия разрушения ледяного покрова изгибом независимо от вида нагрузки, действующей на лед и приводящей к его разрушению. С другой стороны, рассмотренный критерий можно использовать и как условие достижения определённой степени разрушенности ледяного покрова при его нагружении ИГВ, т. е. некоторому значению  $\alpha$  будет соответствовать определённая стадия разрушения льда [1].

Главное преимущество геометрического критерия заключается в том, что при анализе данных модельных экспериментов отсутствует необходимость в знании масштаба или условий подобия, необходимых для пересчёта моделируемых параметров на натуру. Величина  $\alpha$  представляет собой геометрический параметр, который зависит от параметров ИГВ (длины и прогиба). Это позволяет уйти от масштабного фактора при сравнении модельных и натуральных экспериментальных данных, что в рамках традиционных критериев оценки разрушения ледяного покрова сделать достаточно трудно.

Физический смысл данного критерия ледоразрушения состоит в том, что ледяная пластина деформируется изгибно-гравитационной волной до предельной кривизны, при которой её сплошность нарушается зарождающимися сквозными трещинами, расчленяющими её на отдельные блоки.

Рассматриваемая зависимость была установлена эмпирически в экспериментальной работе [1]. При этом проводились серии модельных экспериментов по разрушению натурального ледяного покрова различной толщины при помощи моделей подводного судна и судов на воздушной подушке. И для движения нагрузки по льду, и для движения погружённого тела было получено, что в случае, когда величина коэффициента  $\alpha$  превышает значение 0.04, происходит полное разрушения льда и раскрытие трещин.

Последующие серии экспериментов по определению ледоразрушающей способности ИГВ генерируемых от движения погружённых тел с различными характеристиками (относительным удлинением и водоизмещением) также подтвердили возможность оценки стадии разрушения льда ИГВ в зависимости от величины коэффициента  $\alpha$ .

На рис. 1 показана зависимость коэффициента  $\alpha$  от скорости перемещения нагрузки в виде эллипсоидов вращения с различными характеристиками: относительным удлинением  $L/B$  (где  $L$  – длина тела,  $B$  – ширина тела) и водоизмещением  $D$ . Масштаб моделирования составлял 1-100. Анализируя результаты, можно сделать вывод, что увеличение относительного удлинения приводит к резкому падению ледоразрушающей способности ИГВ.

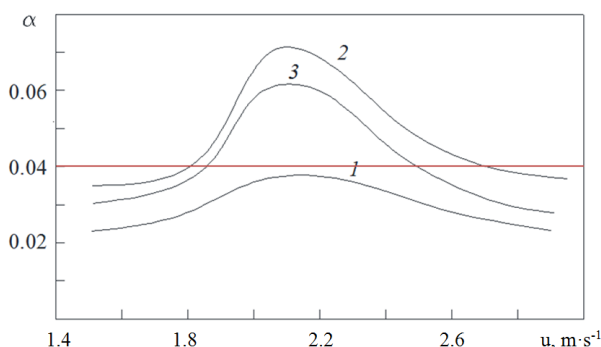


Рис. 1. Зависимость коэффициента  $\alpha$  от скорости перемещения нагрузки для льда толщиной 3 мм (2 м после пересчета на натуру) [6]: 1 –  $L/B=13.3$ ,  $D=18$  кг; 2 –  $L/B=8.4$ ,  $D=24$  кг; 3 –  $L/B=13.3$ ,  $D=12$  кг

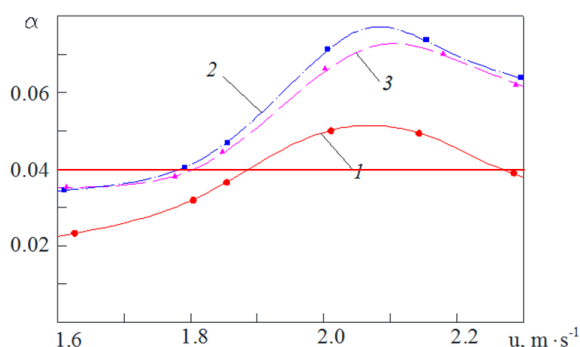


Рис. 2. Зависимость коэффициента  $\alpha$  от скорости перемещения нагрузки для льда толщиной 3 мм (2 м после пересчета на натуру) [7]: 1 – сложная форма геометрии тела; 2 – каплевидная форма; 3 – эллипсоид вращения

На рис. 2 показана зависимость коэффициента  $\alpha$  от скорости перемещения нагрузки равного водоизмещения  $D = 24$  кг, но различной формы в виде эллипсоида вращения, каплевидной формы и со сложной

геометрией корпуса. Масштаб моделирования составлял 1-100. Эксперименты показали, что наиболее оптимальной формой является тело вращения, картина трещинообразования и характер разрушения модельного льда это также подтвердили (рис. 3 – 5).



Рис. 3. Характер разрушения модельного льда толщиной 3 мм после прохождения модели со сложной формой геометрии корпуса со скоростью  $u_m=2.08$  м/с



Рис. 4. Характер разрушения модельного льда толщиной 3 мм после прохождения модели каплевидной формы со скоростью  $u_m=2.05$  м/с



Рис. 5. Характер разрушения модельного льда толщиной 3 мм после прохождения модели эллипсоидной формы со скоростью  $u_m=2.05$  м/с

Экспериментальные исследования показали, что использование предложенного критерия может существенно упростить задачу оценки ледоразрушающей способности ИГВ генерируемых нагрузкой в виде погружённого тела при его движении в различных ледовых условиях.

Критерий также может использоваться для определения степени разрушенности льда, т. к. характер разрушения и трещинообразования достаточно точно совпадают с предложенным значением полного разрушения ледяного покрова равным 0.04.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козин В. М., Онищук А. В., Марьин Б. Н. Ледоразрушающая способность изгибно-гравитационных волн от движения объектов. Владивосток: Дальнаука, 2005. 191 с.
2. Козин В. М., Земляк В. Л. Физические основы разрушения ледяного покрова резонансным методом. Комсомольск-на-Амуре: ИМиМ ДВО РАН; ПГУ им. Шолом-Алейхема, 2013. 249 с.
3. Зуев В. А., Козин В. М. Использование судов на воздушной подушке для разрушения ледяного покрова. Владивосток: изд-во ДВГУ, 1988. 215 с.
4. Козин В. М. Резонансный метод разрушения ледяного покрова: автореф. дис. ... докт. техн. наук. Владивосток: ИМиМ ДВО РАН, 1993. 46 с.
5. Франкештейн Г. Опыт, накопленный при лабораторных исследованиях, в решении ледовых проблем // Механика. Новое в зарубежной науке. 1983. № 3. С. 116–126.
6. Zemlyak V. L., Pogorelova A. V., Kozin V. M. Influence of Peculiarities of the Form of a Submarine Vessel on the Efficiency of Breaking Ice Cover // Proc. 23th Int Offshore and Polar Eng Conf, Anchorage, ISOPE, 2013. pp 1252–1258.
7. Zemlyak V. L., Kozin V. M., Baurin N. O., Petrosyan G. V. Influence of Peculiarities of the Form of a Submarine Vessel on the Parameters of Generated Waves in the Ice Motion // Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference Sep. «Proceedings of the 24rd International Offshore and Polar Engineering Conference, ISOPE 2014» 2014. pp. 1135–1140.

\* \* \*

**Kozin Victor M., Zemlyak Vitaliy L.**  
**CHOICE OF CRITERIA FOR EVALUATION OF ICE-BREAKING PROPERTIES OF FLEXURAL-GRAVITY WAVES GENERATED BY MOVING LOADS**

(Institute of Machining and Metallurgy, FEB RAS, Komsomolsk-on-Amur; Sholom-Aleichem Priamursky State University, Birobidzhan)

This paper presents criteria for evaluation of ice-breaking capacity of flexural-gravity waves, such as, a theoretical level of flexural stress  $2,1[\sigma]_u$ , ultimate density of potential energy of bending  $U$  and geometric criterion  $\alpha$  characterizing curvature of flexural-gravity waves. The analysis of the choice of most optimal criterion  $\alpha$  for evaluation of ice-breaking capacity of flexural gravity waves generated by moving loads in the form of immersed body nearby the bottom of the ice has been performed.

*Keywords:* ice, flexural-gravity waves, criterion for ice breaking, immersed body.

## REFERENCES

1. Kozin V. M., Onishchuk A. V., Mar'in B. N. *Ledorazrushayushchaya sposobnost' izgibno-gravitatsionnykh voln ot dvizheniya ob'ektov* (Ice-Breaking Capacity of Flexural-Gravity Waves Produced by Motion of Objects), Vladivostok, Dal'nauka, 2005. 191 p.
2. Kozin V. M., Zemlyak V. L. *Fizicheskie osnovy razrusheniya ledyanogo pokrova rezonansnym metodom* (Physical Fundamentals of Ice Cover Destruction Resonance Method), Komsomolsk-on-Amur, 2013. 249 p.
3. Zuev V. A., Kozin V. M. *Ispol'zovanie sudov na vozdushnoy podushke dlya razrusheniya ledyanogo pokrova* (Using Hovercraft to Break Ice), Vladivostok, publ. DVGU, 1988. 215 p.
4. Kozin V. M. *Rezonansnyy metod razrusheniya ledyanogo pokrova* (Resonance method of destruction of ice cover), Abstract of the thesis ... Dr.Sci.Tech., Vladivostok, Institute of Machining and Metallurgy FEB RAS, 1993. 46 p.
5. Frankenshteyn G. The Experience Gained In Laboratory Studies, in Resolving the Problems of Ice [Opyt, nakoplenyy pri laboratornykh issledovaniyakh, v reshenii ledovykh problem], *Mekhanika. Novoe v zarubezhnoy nauke*, 1983, no. 3, pp. 116–126.
6. Zemlyak V. L., Pogorelova A. V., Kozin V. M. Influence of Peculiarities of the Form of a Submarine Vessel on the Efficiency of Breaking Ice Cover, *Proceedings 23th Int Offshore and Polar Engineering Conference*, Anchorage, ISOPE, 2013, pp. 1252–1258.
7. Zemlyak V. L., Kozin V. M., Baurin N. O., Petrosyan G. V. Influence of Peculiarities of the Form of a Submarine Vessel on the Parameters of Generated Waves in the Ice Motion, *Proceedings of the 24rd International Offshore and Polar Engineering Conference*, ISOPE, 2014. pp. 1135–1140.

\* \* \*