

УДК 539.3

**В. М. Козин, В. Л. Земляк, С. В. Радионов, К. И. Ипатов****ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ЛЬДА  
РЕЗОНАНСНЫМ МЕТОДОМ СУДНОМ  
НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ  
В РАЗЛИЧНЫХ ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЯХ**

Предложен способ разрушения ледяного покрова на мелководье, который включает в себя перемещение судна на воздушной подушке вдоль кромки льда. Вдоль кромки льда перемещают два судна, при этом первое судно перемещают по свободной воде, а второе — по сплошному льду сзади первого на расстоянии от него, равном четверти длины резонансной изгибно-гравитационной волны.

*Ключевые слова:* судно на воздушной подушке, лёд, резонансный метод.

При движении судна вдоль кромки льда генерируемая им гравитационная волна будет воздействовать на ледяной покров, что в итоге может привести к его частичному или полному разрушению [9]. Для повышения ледоразрушающей способности гравитационных волн судно подвергают искусственной качке путём перекачки воды в балластных отсеках. При этом создаются две системы волн: основная от поступательного движения судна и дополнительная от искусственно создаваемой качки корабля. В результате наложения двух систем волн, основной и дополнительной, возникает волновая система большей интенсивности. Таким образом, при неизменной мощности главных двигателей судно за счёт искусственной качки способно возбудить гравитационные волны большей амплитуды. В результате при возбуждении волн во льду возникнут большие напряжения, что приведёт к разрушению ледяного покрова большей толщины.

---

**Козин Виктор Михайлович** — доктор технических наук, профессор (Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, Комсомольск-на-Амуре); e-mail: vellkom@list.ru.

**Земляк Виталий Леонидович** — кандидат физико-математических наук, доцент, проректор по научной работе и инновациям (Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема, Биробиджан); e-mail: vellkom@list.ru.

**Радионов Сергей Владимирович** — студент (Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема, Биробиджан); e-mail: vellkom@list.ru.

**Ипатов Константин Игоревич** — аспирант (Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема, Биробиджан); e-mail: lpatov-1992@list.ru.

*Исследование выполнено за счёт гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-38-20030).*

© Козин В. М., Земляк В. Л., Радионов С. В., Ипатов К. И., 2019

---

Предложенный метод невозможно реализовать в узкостях и на мелководье, т. е. на таких участках рек, где наиболее высока вероятность возникновения заторошенных участков, что в итоге может привести к подтоплению окружающей территории. В узких местах надводное судно не способно двигаться вдоль кромки затора, которая, как правило, ориентирована перпендикулярно береговой линии, в течение времени, достаточном для возбуждения гравитационных волн максимальной амплитуды. Ограниченность глубины акватории часто делает невозможным использование для осуществления предложенного способа ледоколов. Подвижка масс льда после разрушения затора может привести к повреждениям корпуса судна, его выбросу на мель или берег.

Известно, что при весеннем ледоходе вероятность заторообразований довольно высока в узкостях, на крутых поворотах руслов рек и перед гидротехническими сооружениями, при этом за нижней по течению реки кромкой затора, как правило, образуются чистые ото льда участки воды. Критическая скорость судна на мелководье, при которой волновое сопротивление достигает максимального значения, равна  $u = \sqrt{gH}$  (где:  $g$  – ускорение силы тяжести;  $H$  – глубина воды) [3]. Этому же значению равно значение критической скорости  $C_p$  при распространении свободных изгибно-гравитационных волн (ИГВ) в ледяном покрове на мелководье [11]. Если критические периоды ИГВ близки к периоду гравитационных волн на чистой воде, то это приводит к эффективному (резонансному) раскачиванию ледяного покрова и взлому припайных льдов.

Для реализации метода может быть использовано амфибийное судно на воздушной подушке (СВП), которое доставляется в район возникшего затора к его свободной кромке. Поскольку движение СВП по заторошенному льду небезопасно в силу высокой вероятности повреждения юбки, судно вблизи кромки заторошенного ледяного покрова начинают перемещать по круговой траектории с критической скоростью на чистой воде:

$$u = \sqrt{gH}.$$

Период колебаний будет равен:

$$T_p = \frac{2\pi}{gH} \sqrt{\frac{D}{\rho_l h}},$$

где  $D$  – цилиндрическая жёсткость ледяного покрова;  $\rho_l$  – плотность льда;  $h$  – толщина ледяного покрова.

В результате частота гравитационных волн, возбуждаемых с максимальной амплитудой, будет равна критической частоте ИГВ, т.к. их скорости распространения одинаковы, что приведёт к резонансному раска-

чиванию затороженного ледяного покрова и, как следствие, увеличению эффективности его разрушения [6].

Если СВП движется по свободной воде в непосредственной близости и вдоль кромки сплошного ледяного покрова, а затем начинает перемещаться по ней, то подобное маневрирование создаёт дополнительно к волновой нагрузке на лёд нагрузку от веса судна, что увеличивает деформации ледяного покрова и облегчает процесс его разрушения [8].

Описанный способ разрушения льда имеет ряд недостатков:

- быстрая затухаемость гравитационных волн, что связано с их трансформацией в ИГВ и отражением от кромки льда, а это требует для поддержания их максимальной интенсивности частого повторения маневров СВП;

- перемещение по кромке приводит к быстрому изнашиванию гибкого ограждения СВП;

- нестационарность режимов движения нагрузки при маневрировании повышает расход топлива;

- низкая управляемость СВП на малых резонансных скоростях усложняет маневрирование вдоль кромки льда и требует использования энергоёмких подруливающих устройств;

- при перемещении СВП по кромке льда для последующего движения судна вдоль неё и развития гравитационных и изгибно-гравитационных волн максимальной амплитуды необходимо затрачивать определённое время, в течение которого происходит уменьшение колебаний, т. к. подкачка энергии в колеблющуюся систему лёд-вода в эти периоды не осуществляется.

Для увеличения нагрузки на лёд может быть использована благоприятная интерференция (суммирование максимальных амплитуд) двух волновых систем: гравитационной, возникающей при движении судна по свободной воде, и изгибно-гравитационной, возникающей при движении судна по ледяному покрову.

Известно [5], что на мелководье при критической скорости судна, равной горбовой скорости, амплитуда возбуждаемых волн становится максимальной, а на мелководье скорость резонансных ИГВ равна  $u = \sqrt{gH}$ . Длина волн определяется выражением:

$$\lambda_p = 2\pi \sqrt{\frac{D}{\rho_L h g H}}.$$

В работе [2] экспериментально установлено, что при выполнении ледокольных работ двумя СВП наиболее эффективным режимом является движение фронтом. Поскольку вода является более податливой средой, чем ледяной покров, то движение СВП по свободной воде вдоль кромки льда, а не по льду приводит к возбуждению ИГВ большей амплитуды [1].

Если при движении СВП вдоль кромки ледяного покрова с резонансной скоростью его масса оказывается недостаточной для возбуждения ИГВ и разрушения льда, то на лёд выводят второе СВП. Первое судно 2 перемещается по свободной воде 1 с критической (горбовой) скоростью вдоль свободной кромки 3 льда 4, а второе судно 5 — по кромке ледяного покрова параллельным курсом с резонансной скоростью (рис. 1). Поскольку в условиях мелководья эти скорости равны друг другу, то возникнет благоприятная интерференция возбуждаемых гравитационных и изгибно-гравитационных волн.

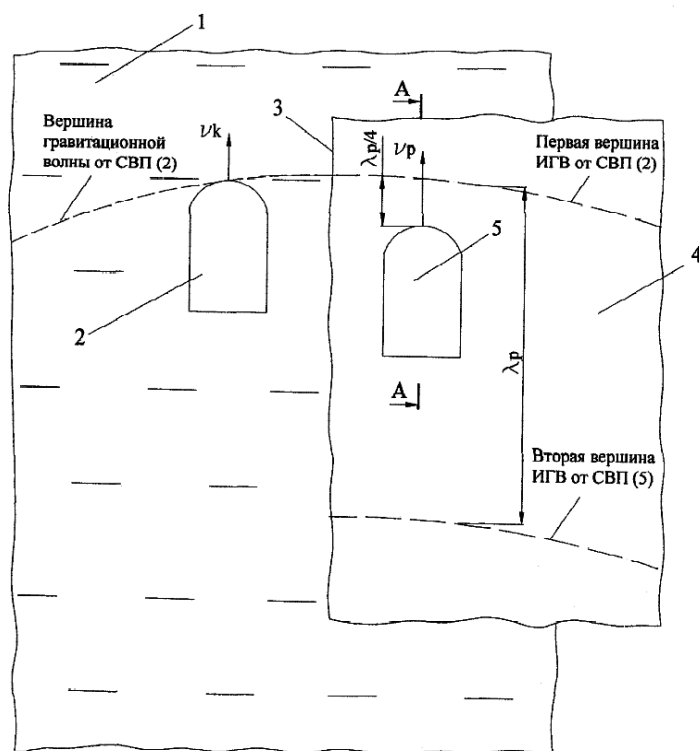


Рис. 1. Способ разрушения ледяного покрова на мелководье  
(патент на изобретение РФ № 2457975)

Для достижения суммарных ИГВ наибольшей амплитуды второе СВП перемещают сзади от первого на расстоянии от него, равном  $\lambda_p/4$  (рис. 2). В результате второе СВП будет перемещаться в пучности ИГВ, возникающих от движения первой нагрузки. В этом случае волновое сопротивление второго СВП станет максимальным и, соответственно, амплитуда суммарных ИГВ — наибольшей, что приведёт к разрушению ледяного покрова [7].

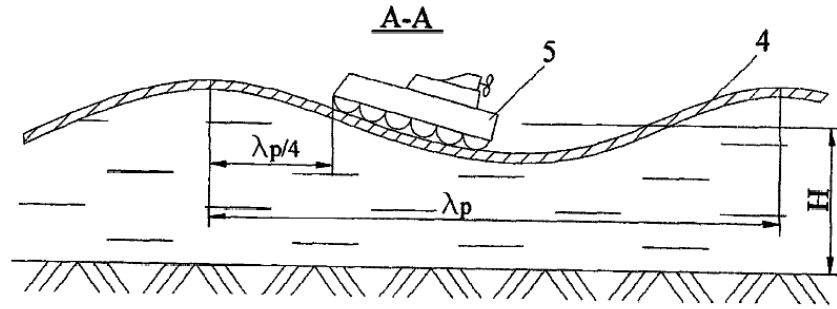


Рис. 2. Способ разрушения ледяного покрова на мелководье  
(патент на изобретение РФ № 2457975)

Возбуждение во льду 1 резонансных ИГВ можно добиться при движении СВП 2 с критической скоростью вдоль вблизи расположенной береговой линии во время морского отлива. Расстояние от кромки льда 3, примёрзшего к берегу, до нагрузки должно быть равно полудлине волны статического прогиба 4 ледяного покрова  $\lambda_{ст} = 2\pi^4 \sqrt{\frac{D}{\rho g}}$ , при этом СВП сообщают поперечные перемещения  $\pm S$  с амплитудой, не превышающей половину длины волны  $\lambda_{ст}$  с частотой  $\omega_p = \frac{1}{\pi\sqrt{2}} \left[ \frac{\rho g^5}{D} \right]^{1/8}$ , равной частоте резонансных ИГВ (рис. 3) [11]. Поперечные перемещения, т. е. движение бортом к берегу и от него, и сопутствующий крен  $\pm\theta_{max}$  приведут к возбуждению дополнительной системы резонансных ИГВ (рис. 4) [10].

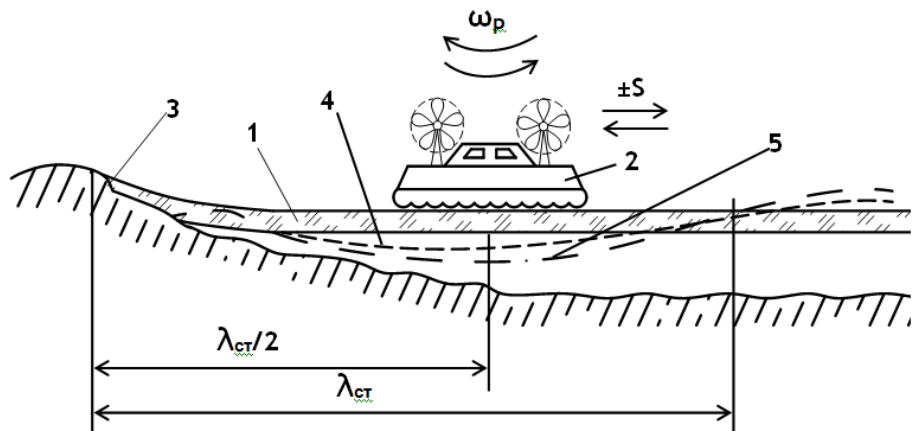


Рис. 3. Способ разрушения ледяного покрова на мелководье  
(патент на изобретение РФ № 2531857)

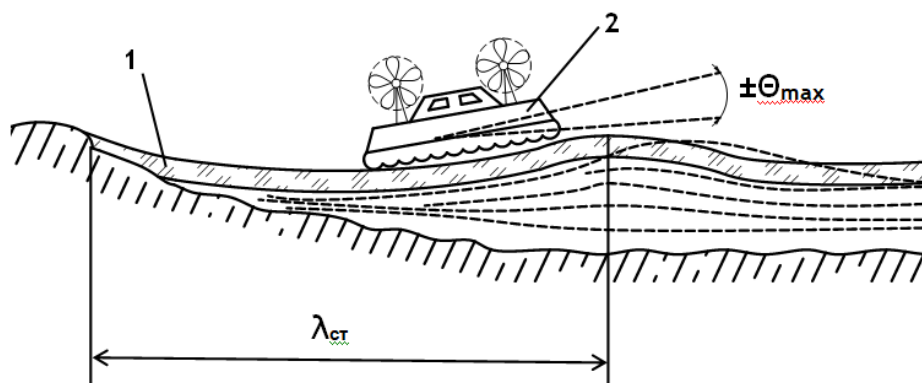


Рис. 4. Способ разрушения ледяного покрова на мелководье  
(патент на изобретение РФ № 2531857)

У генерируемых волн при приближении к берегу, при выходе на ярко выраженное мелководье длина волны будет уменьшаться, а высота — увеличиваться. В результате наложение этой волновой системы на систему ИГВ от поступательного движения СВП вдоль береговой линии приведёт к увеличению высоты суммарных ИГВ, что увеличит их ледоразрушающую способность. Периодические перемещения судна с амплитудой, не превышающей половину длины волны статического прогиба, т. е. в пределах чаши волны статического прогиба льда от веса СВП, будут способствовать генерации более интенсивных дополнительных ИГВ, так как смещение от подошвы к вершине волны будет сопровождаться появлением у судна знакопеременного максимального крена. Как известно [4], появление у судна дифферента приводит к увеличению его волнового сопротивления, т. е. увеличению амплитуды возбуждаемых волн. Очевидно, что аналогичные явления будут происходить и при наличии у судна крена при его движении бортом.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жёсткая В. Д., Козин В. М. Исследования возможностей разрушения ледяного покрова амфибийными судами на воздушной подушке. Владивосток: Дальнаука, 2003. 161 с.
2. Козин В. М. Резонансный метод разрушения ледяного покрова. Изобретения и эксперименты. М.: Академия Естествознания, 2007. 355 с.
3. Костюков А. А. Сопротивление воды движению судов. Л.: Судостроение. 1965. 448 с.
4. Основы теории судов на воздушной подушке / Ю. Ю. Бенуа, В. К. Дьяченко, Б. А. Кользаев [и др.]. Л.: Судостроение, 1970. 455 с.
5. Павленко Г. Е. Сопротивление воды движению судов. М.: Морской транспорт, 1956. 508 с.

6. Способ разрушения заторошенного ледяного покрова: патент 2389635 РФ: МПК В63В 35/08 / В. М. Козин, А. В. Погорелова, В. Ю. Верещагин [и др.]. № 2008116061/11; заявл. 23.04.2008; опубл. 20.05.2010. Бюл. № 14. 4 с.
7. Способ разрушения ледяного покрова на мелководье: патент 2457975 РФ: МПК В63В 35/08 / В. М. Козин, А. В. Погорелова, В. Ю. Верещагин [и др.]. № 2010153801/11; заявл. 27.12.2010; опубл. 10.08.2012. Бюл. № 22. 6 с.
8. Способ разрушения ледяного покрова: авторское свидетельство СССР 1781968: МПК В63В 35/08 / В. М. Козин, И. Д. Новолодский. Опубл. 15.08.1992. 4 с.
9. Способ разрушения ледяного покрова: патент 2081025 РФ: МПК В63В 35/08 / А. Д. Бурменский, В. М. Козин. № 94 94008992; заявл. 15.03.1994; опубл. 10.06.1997.
10. Способ разрушения ледяного покрова: патент 2531857 РФ: МПК В63В 35/08, В60В 3/06, Е02В 15/02 / В. М. Козин, В. Л. Земляк, В. Ю. Верещагин [и др.]. № 2013140918/11; заявл. 05.09.2013; опубл. 27.10.2014. Бюл. № 30. 6 с.
11. *Хейсин Д. Е.* Динамика ледяного покрова. Л.: Гидрометеоздат, 1967. 216 с.

\* \* \*

**Kozin Victor M., Zemliak Vitaly L., Radionov Sergey V., Ipatov Konstantin I.  
IMPROVING THE EFFICIENCY OF DESTRUCTION OF ICE  
BY A RESONANT METHOD AIR CUSHION VEHICLES  
IN VARIOUS ICE CONDITIONS**

<sup>1</sup>Institute of Machining and Metallurgy, FEB RAS, Komsomolsk-on-Amur;  
<sup>2,3,4</sup>Sholom-Aleichem Priamursky State University, Birobidzhan)

Proposed method comprises displacing air-cushion ship along ice cover edges. Two ships move along ice cover edges. One of said ship moves in free water while another ship moves in ice field, behind the first one, at distance equal to quarter the length of resonance bending-gravity wave.

*Keywords:* air cushion vehicles, ice, resonant method.

## REFERENCES

1. Zhestkaya V. D., Kozin V. M. *Investigation of possibilities for the destruction of ice cover by amphibious hovercrafts* [Issledovaniya vozmozhnostey razrusheniya ledyanogo pokrova amfibiynymi sudami na vozdushnoy podushke], Vladivostok, Dal'nauka Publ., 2003. 161 p.
2. Kozin V. M. *Rezonansnyy metod razrusheniya ledyanogo pokrova. Izobreteniya i eksperimenty* (Resonant method of breaking ice. Inventions and Experiments), Moscow, Akademiya Estestvoznaniya Publ., 2007. 355 p.
3. Kostyukov A. A. *Soprotivlenie vody dvizheniyu sudov* (Water resistance to vessel moving), Leningrad, Sudostroenie Publ., 1965. 448 p.
4. Benua Yu. Yu., D'yachenko V. K., Kolyzaev B. A. [et al.]. *Osnovy teorii sudov na vozdushnoy podushke* (Fundamentals of the theory of hovercraft), Leningrad, 1970. 455 p.
5. Pavlenko G. E. *Soprotivlenie vody dvizheniyu sudov* (Water resistance to the movement of ships), Moscow, Morskoy transport Publ., 1956. 508 p.
6. Kozin V. M., Pogorelova A. V., Vereshchagin V. Yu. [et al.]. *Sposob razrusheniya zatoroshennogo ledyanogo pokrova* (Method to destruct hummocked ice cover), Patent No. 2389635 RU, IPC B63B 35/08, publ. 05/20/2010, Bull. No. 14, 4 p.
7. Kozin V. M., Pogorelova A. V., Vereshchagin V. Yu. [et al.]. *Sposob razrusheniya ledyanogo pokrova na melkovo'd'e* (Method of ice breaking in shallow water), Patent No. 2457975 RU, IPC B63B 35/08, publ. 08/10/2012, Bull. No. 22, 6 p.

8. Kozin V. M., Novolodskiy I. D. *Sposob razrusheniya ledyanogo pokrova* (Method of breaking the ice cover), Copyright certificates No. 1781968 RU, IPC B63B 35/08, publ. 08/15/1992, 4 p.
9. Burmenskiy A. D., Kozin V. M. *Sposob razrusheniya ledyanogo pokrova* (Method of breaking the ice cover), Patent No. 2081025 RU, IPC B63B 35/08, publ. 06/10/1997.
10. Kozin V. M., Zemlyak V. L., Vereshchagin V. Yu. [et al.]. *Sposob razrusheniya ledyanogo pokrova* (Method of breaking the ice cover), Patent No. 2531857 RU, IPC B63B 35/08, B60V 3/06, E02B 15/02, publ. 10/27/2014, Bull. No. 30, 6 p.
11. Kheysin D. E. *Dinamika ledyanogo pokrova* (Dynamics of Ice Cover), Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1967. 216 p.

\* \* \*