

В. М. Козин, Д. Ю. Кипин

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАВИСИМОСТИ ВЫСОТЫ ИЗГИБНО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН ПРИ ИХ РАСПРОСТРАНЕНИИ В СТОРОНУ БЕРЕГА ОТ УГЛА НАКЛОНА ДНА

*Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия  
Амурский гуманитарно-педагогический государственный университет,  
г. Комсомольск-на-Амуре, Россия*

**Аннотация.** В работе представлены результаты экспериментальных исследований зависимости высоты изгибно-гравитационных волн, возбуждаемых движущейся в сторону берега нагрузкой в ледяном покрове, от угла наклона дна. Приведены рекомендации по использованию угла наклона дна для повышения эффективности разрушения льда.

**Ключевые слова:** изгибно-гравитационные волны, высота волн, разрушение, резонансная скорость, наклон дна, движущееся нагрузка, моделирование.

УДК: 532.526.2

Важное значение для нашей страны имеют решения таких проблем, как: борьба с ледовыми осложнениями в виде заторов и зажоров на реках, текущих с юга на север; продление навигации на внутренних водных путях и пр. Использование для этих целей разработанного резонансного метода разрушения ледяного покрова (РМРЛ) [6] позволит снизить энергозатраты при их осуществлении. Его сущность заключается в следующем. При движении по льду нагрузки в последнем развивается система изгибно-гравитационных волн (ИГВ). Если скорость движения нагрузки близка к минимальной фазовой скорости этих волн, то возникает изгибно-гравитационный резонанс [6,7], т.е. амплитуда колебаний ледяного покрова резко возрастает вследствие того, что вода перестаёт поддерживать ледяной покров и лёд при определённых параметрах нагрузки начинает разрушаться с большей эффективностью по сравнению с существующими средствами и традиционными технологиями [5].

У нас в стране с явлением резонансного разрушения льда впервые столкнулись водители на Ладужской трассе "Дорога жизни", когда автомашины на резонансных

---

© Козин В. М., Кипин Д. Ю., 2018

*Козин Виктор Михайлович*

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

*Кипин Денис Юрьевич*

e-mail: kipindenis@gmail.com, старший преподаватель, Амурской гуманитарно-педагогический государственный университет, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия.



Рис. 1. Разрушение льда СВП "Скат" при выходе на берег

скоростях [6] проваливались под лёд. При этом прочность льда не вызывала сомнений, т.к. рядом с образовавшейся майной с меньшими скоростями проходили более загруженные машины. Позже сотрудниками Арктического и Антарктического научно-исследовательского института высказывалось предположение о возможности использования судов на воздушной подушке (СВП) для реализации РМРЛ после испытаний в 1962 г. СВП "Сормович" на Волге. Появление значительных деформаций льда при движении по нему нагрузки отмечалось и в процессе испытаний первых отечественных СВП проф. В.И. Левкова в 1932 г. [2]. Аналогичные наблюдения отмечались и в 1924 г. при эксплуатации ледяных железнодорожных переправ [1]. Однако, этим фактам не придавалось значения и работы в этом направлении не проводились. Поэтому до недавнего времени исследования резонансного увеличения амплитуд колебаний льда и разрушения вследствие этого ледяного покрова проводились с точки зрения их нежелательности [3].

С другой стороны, если использовать явление резкого возрастания амплитуд колебаний льда при движении нагрузок с определённой (резонансной) скоростью, то можно существенно снизить энергозатраты на разрушение ледяного покрова по сравнению с ледоколами и ледокольными приставками РМРЛ может осуществляться любым транспортным средством, обладающим способностью перемещаться по ледяному покрову с достаточной скоростью и возбуждающим ИГВ необходимой для разрушения льда амплитудой. С точки зрения эффективного использования и безопасности эксплуатации при реализации РМРЛ наиболее пригодны амфибийные СВП, ледоразрушающие качества которых исследовались в натуральных условиях. При этом во время проведения испытаний СВП "Скат" на реке Амур (1984 — 1987гг.) было обнаружено, что в случаях, когда ледяной покров не удавалось разрушить при движении судна с резонансной скоростью (вес судна был недостаточен для данной толщины льда), то кромка льда легко разрушалась при выходе судна на берег (рис. 1). Очевидно, что это связано с трансформацией параметров ИГВ при выходе на мелководье и с



Рис. 2. Проходы СВП вдоль береговой линии

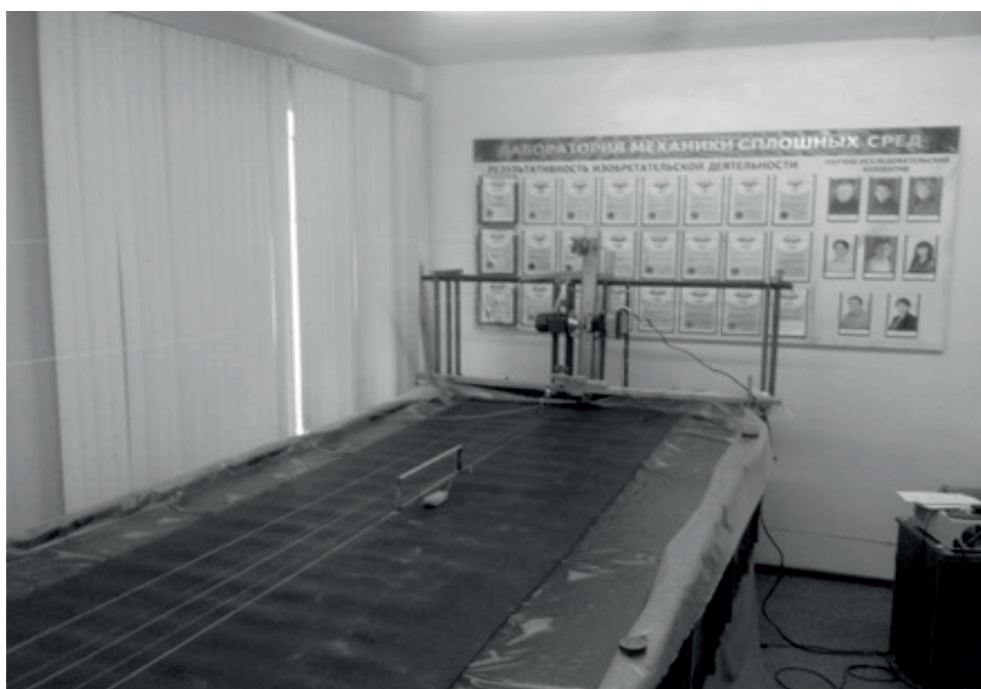


Рис. 3. Опытный бассейн лаборатории механики сплошных сред

их взаимодействием с отражёнными от берега волнами. После чего полоса разрушенного вдоль берега ледяного покрова расширялась за счёт последующих проходов СВП вдоль неё с резонансной скоростью, т.к. наличие свободной кромки значительно

уменьшает несущую способность ледяного покрова. Таким образом, лёд разрушался на большой площади (рис. 2).

Этот факт послужил основанием для более детальных исследований с целью изучения возможностей повышения эффективности РМРЛ за счёт использования подобных условий и вышеописанного маневрирования СВП.

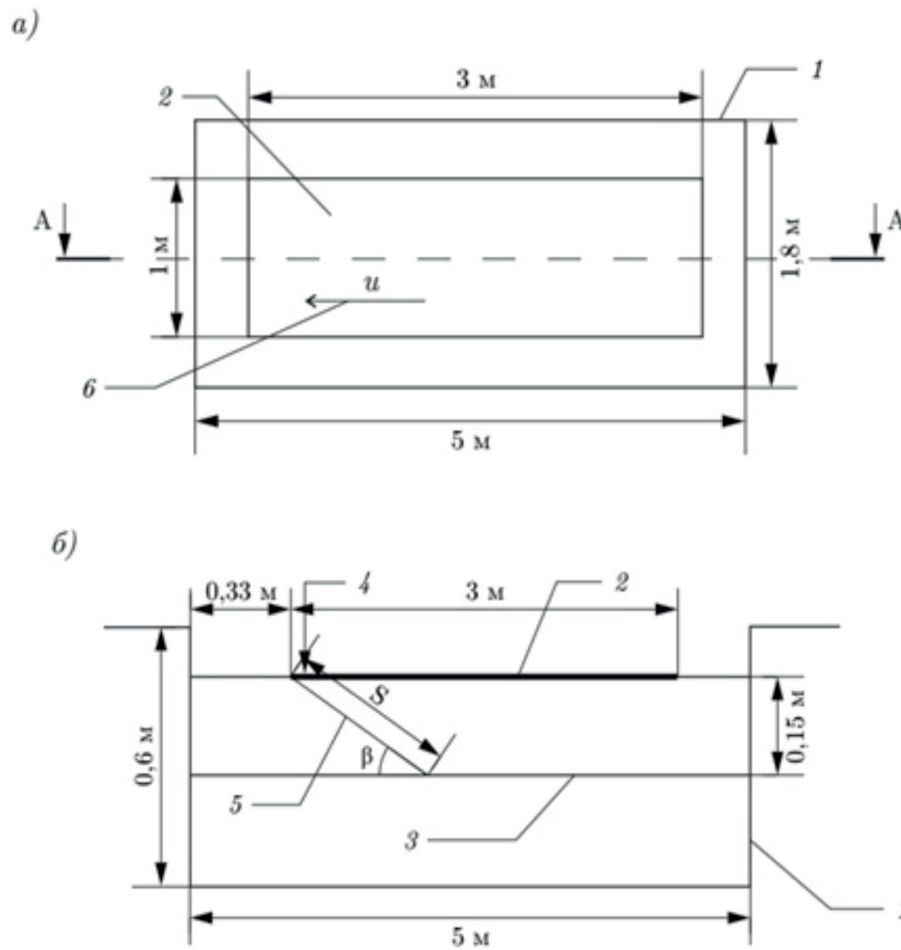


Рис. 4. Схема установки: а) — вид сверху, б) — сечение по А-А: 1 — чаша бассейна; 2 — модельный лёд; 3 — подвесное дно; 4 — место установки датчика; 5 — наклонное дно; 6 — направление движения нагрузки

Эксперименты проводились в опытовом бассейне ( $L \times B \times H = 5,0 \times 1,9 \times 0,7$  м) лаборатории механики сплошных сред ФГБОУ ВО "Амурского гуманитарно-педагогического государственного университета" и в соответствии с известной методикой моделирования ИГВ в ледяном покрове [4].

Моделирование ледяного покрова осуществлялось с использованием модели неразрушаемого льда. В качестве модельного льда применялась листовая резина толщиной 2 мм, наиболее удовлетворяющая геометрическому масштабу и физико-механическим



характеристикам модельного материала. Значение модуля упругости резины определялось путем испытаний образцов материала на растяжение при различных скоростях нагружения на специальном стенде. Его среднее значение составило 6 МПа, что обеспечивало проведение модельных экспериментов в масштабе 1:500, т.е. в опытах моделировался ледяной покров толщиной 1 м. ИГВ возбуждались движущейся за счет буксировочной системы бассейна нагрузкой (моделью) массой 75,7 г и площадью основания 39,39 см<sup>2</sup> (рис. 3).

Исследования проводились при различных углах наклона дна  $\beta$  (10°, 20°, 30°) и при глубине акватории  $H = 30$  м (после пересчёта на натуру). Наклонность дна моделировалась по схеме, представленной на рис. 4, где  $S$  — длина наклонного дна. Для 30°  $S$  составляла 0,3 м, для 20° — 0,44 м, для 10° — 0,86 м.

В процессе проведения экспериментов были получены зависимости относительной высоты ИГВ  $\bar{A}$  (где  $\bar{A} = \frac{A}{\omega_p}$ ;  $A$  — высота волны;  $\omega_p$  — статический прогиб модельного льда под нагрузкой) от относительных скоростей нагрузки  $\chi$  (где  $\chi = \frac{u}{\sqrt{gH}}$ ;  $u$  — скорость нагрузки;  $g$  — ускорение свободного падения) при различных углах наклона дна (рис. 5).

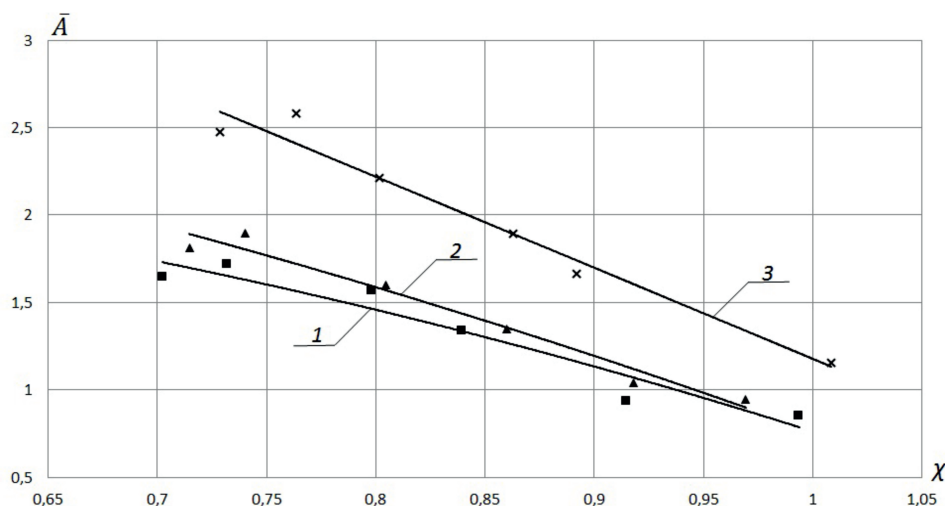


Рис. 5. Зависимость относительной высоты волны от относительной скорости движения нагрузки при различных углах наклона дна ( $H = 30$  м),  $\beta$ , град: 1 (■) —  $\beta = 10^\circ$ ; 2 (▲) —  $\beta = 20^\circ$ ; 3 (×) —  $\beta = 30^\circ$

На рис. 5 приведена зависимость высоты волны от скорости движения нагрузки при различных углах наклона дна. Как видно из графика, в области низких скоростей РМРЛ при выходе нагрузки на берег наиболее эффективен. При увеличении скорости нагрузки высота ИГВ начинает снижаться по сравнению с движением нагрузки без выхода на берег. Максимальная высота ИГВ наблюдается при угле наклона дна 30°. Уменьшение наклона дна ведёт к уменьшению высоты ИГВ.

Таким образом, для увеличения возможностей РМРЛ (в случаях, когда имеющееся СВП не способно разрушить ледяной покров при его движении с резонансной скоростью) следует найти участок акватории с крутым, но одновременно безопасным для

выхода СВП со льда, берегом. Затем на разных скоростях, близких к резонансным для средней глубины водоема на данном участке, сделать несколько выходов СВП на берег под прямым углом к береговой линии. Если масса СВП и давление в воздушной подушке окажутся достаточными для разрушения примерзшей к берегу кромки льда, то затем следует начинать движение по образовавшейся кромке льда с резонансной для соответствующих глубин скоростью. В результате за счет использования рельефа дна будет разрушен более толстый лёд т.е. повышена эффективность РМРЛ.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бернштейн С. А. Ледяная железнодорожная переправа (работа, теория и расчёт ледяного слоя) / Сборник НКПС, 1929. № 18. 42 с.
- [2] Жёсткая В. Д. Исследования возможностей разрушения ледяного покрова амфибийными судами на воздушной подушке резонансным методом. Владивосток : Дальнаука, 2003. 16 с.
- [3] Зуев В. А. Средства продления навигации на внутренних водных путях. Ленинград : Судостроение, 1986. 148 с.
- [4] Козин В. М. Моделирование изгибно-гравитационных волн в сплошном ледяном покрове // Теория и прочность ледокольного корабля. 1982. № 3. С.35–38.
- [5] Козин В. М. и др. Ледоразрушающая способность изгибно-гравитационных волн от движения объектов. Владивосток : Дальнаука, 2005. 191 с.
- [6] Козин В. М. Резонансный метод разрушения ледяного покрова: Изобретения и эксперименты. Москва : Академия естествознания, 2007. 355 с.
- [7] Марченко А. Изгибно-гравитационные волны // Динамика волн на поверхности жидкости. 1999. С.65–111.

V. M. Kozin, D. Yu. Kipin

## EXPERIMENTAL RESEARCH OF 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 paper presents the results of experimental studies of the dependence of the height of flexural-gravity waves, excited by a load moving in the direction of the coast in the ice cover, on the angle of inclination bottom. Recommendations are given on the use of the angle of inclination of the bottom to improve the efficiency of ice destruction.

**Keywords:** flexural-gravitational waves, wave height, destruction, resonance speed, inclination bottom, moving load, modeling.

## REFERENCES

- [1] Bernshtejn S. A. Ledyanaya zheleznodorozhnaya pereprava (rabota, teoriya i raschyot ledyanogo sloya) / Sbornik NKPS, 1929. № 18. 42 s. (in Russian)
- [2] ZHyostkaya V. D. Issledovaniya vozmozhnostej razrusheniya ledyanogo pokrova amfibijny-mi sudami na vozdushnoj podushke rezonansnym metodom. Vladivostok : Dal'nauka, 2003. 16 s. (in Russian)
- [3] Zuev V. A. Sredstva prodleniya navigacii na vnutrennih vodnyh putyah. Leningrad : Sudostroenie, 1986. 148 s. (in Russian)
- [4] Kozin V. M. Modelirovanie izgibno-gravitacionnyh voln v sploshnom ledyanom pokrove // Teoriya i prochnost' ledokol'nogo korablya. 1982. № 3. S.35–38. (in Russian)
- [5] Kozin V. M. i dr. Ledorazrushayushchaya sposobnost' izgibno-gravitacionnyh voln ot dvizheniya ob"ektov. Vladivostok : Dal'nauka, 2005. 191 s. (in Russian)
- [6] Kozin V. M. Rezonansnyj metod razrusheniya ledyanogo pokrova: Izobreteniya i ehksperimenty. Moskva : Akademiya estestvoznaniya, 2007. 355 s. (in Russian)
- [7] Marchenko A. Izgibno-gravitacionnye volny // Dinamika voln na poverhnosti zhidkosti. 1999. S.65–111. (in Russian)

---

*Kozin Viktor Mikhailovich*

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

*Kipin Denis Yuryevich*

e-mail: kipindenis@gmail.com, Senior Lecturer, Amur State University of Humanities and Pedagogy, Komsomolsk-on-Amur, Russia.