

## ЭКРАНИРУЮЩЕЕ ВЛИЯНИЕ БИТОГО ЛЬДА НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛН

Ю.А. Двойченко, Н.В. Калинина, А.А. Куркин (Нижний Новгород)

**Введение.** При проектировании ледоколов и судов ледового плавания одним из важнейших моментов является определение ледового сопротивления  $R_L$ , испытываемого судном при движении в сплошных или битых льдах. Оно складывается из чистого ледового сопротивления  $R_{чл}$  и сопротивления воды  $R_B$ :

$$R_L = R_{чл} + R_B.$$

В настоящее время разработано большое количество различных расчетных методов для определения чистого ледового сопротивления судна  $R_{чл}$ . Сопротивление воды  $R_B$  при этом рассчитывается обычными методами или не учитывается ввиду малых значений, по сравнению с  $R_{чл}$ , при движении в сплошном льду [1].

Многочисленные наблюдения за движением судов в ледовых условиях показали, что амплитуда волн, генерируемых судном, заметно меньше, чем при той же скорости в чистой воде. Скорость распространения волн во льду меньше, чем в воде, а сами волны становятся короче [1, 2]. Аналогичные явления наблюдались при входе гравитационных волн из части акватории с чистой водой в зону битого льда. Очевидно, что в битом льду играет роль диссипация энергии, обусловленная вынужденными колебаниями обломков льда, которые происходят за счет колебаний гравитационной волны. Это явление подобно тому, когда для входа в безопасную бухту при сильном волнении судоводители приказывали выливать за борт жидкий китовый или тюлений жир. Жировая пленка, имеющая значительно большую величину поверхностного натяжения, чем вода, при горизонтальном растяжении и сжатии отбирала энергию волн, существенно уменьшая их амплитуду. Таким образом, возникает экранирующий эффект слоя, находящегося на поверхности чистой воды. Такие задачи рассмотрены в работах [3, 4].

Примером тому могут служить и некоторые экспериментальные данные испытаний моделей судов за рубежом [5] и в отечественных ледовых бассейнах [6, 7, 8].

На рис. 1 приведены кривые пересчета буксировочного сопротивления с модели ледокольной платформы на воздушной подушке (ЛПВП) АСТ=100 на натуру при движении в чистой воде и битом льду [6].

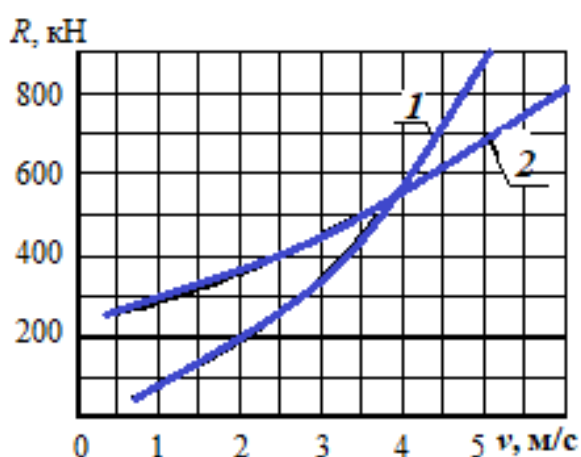


Рис. 1. Кривые буксировочного сопротивления при движении ЛПВП АСТ -100:  
1 – при движении на чистой воде при наличии волнения; 2 – движение в битом льду

Битый лед соответствовал толщине 1,09 м натурального льда при давлении в подушке натурального судна 11-15 кПа. Масштаб модели 1:28. Из рис. 1 следует, что при развитом волнообразовании, когда  $v > 4$  м/с сопротивление движению в битом льду меньше, чем в воде.

На рис. 2 показаны испытания модели транспортного судна проекта NE-020.2 ледового класса Ice2 в мелкобитом льду в ледовом бассейне Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева.

Очевидно, что с увеличением скорости (и чисел Фруда) значительно увеличивается и волновая составляющая сопротивления, которая при экранирующем действии битого льда уменьшается. Об этом свидетельствует переход от закона сопротивления в виде квадратичной параболы на чистой воде к практически прямолинейной зависимости в битом льду большой сплоченности.

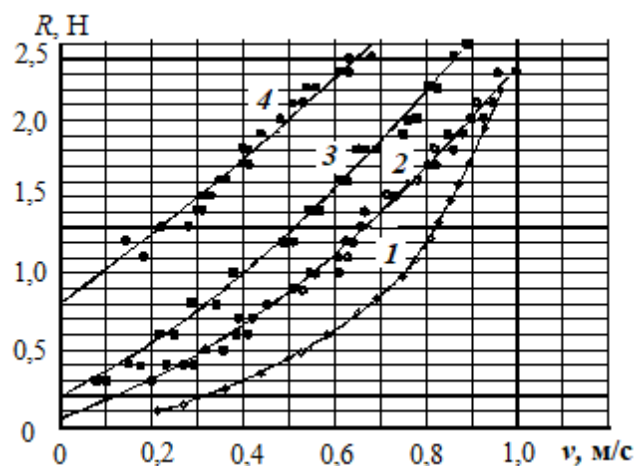


Рис. 2. Кривые буксировочного сопротивления модели водоизмещающего судна проекта NE-020.2 при движении на чистой воде и в битом льду:  
 1 – чистая вода; 2 – битый лед сплоченностью 4 балла;  
 3 – сплоченность 6 баллов; 4 – сплоченность 8 баллов

Факт наличия льда может уменьшить сопротивление движению судна в битых льдах, что не учитывается в существующих расчетных методиках и не соответствует реальной картине процесса. Составляющие сопротивления льда  $R_{чл}$  и воды  $R_{в}$  нельзя считать независимыми, применяя принцип суперпозиции, заключающийся в их сложении в существующих аналитических расчетах.

**Теоретические исследования влияния битого льда на распространение корабельных волн.** Мелкобитый лед можно рассматривать как условные частицы с меньшей, чем у воды плотностью, плавающие на ее поверхности. Площадь поверхности вод будем рассматривать как множество отдельных непересекающихся участков, наделенных свойствами сплошности и изотропности. Далее рассматриваем распространение плоских прогрессивных волн в бассейне неограниченной глубины. Близкая задача о волнах на поверхности раздела двух жидкостей с различными плотностями была решена Н.Е. Кочиным [9]. При условии потенциального движения жидкостей и отсутствии потоков в каждом слое для скорости  $c$  распространения волн длины  $l$  было получено:

$$c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \cdot \frac{(\rho - \rho_1)}{(\rho + \rho_1)}}, \quad (1)$$

где  $\rho$  и  $\rho_1$  – плотность нижнего и верхнего слоя жидкости,  $\rho_1 < \rho$ . При  $\rho_1=0$  из (1) получается известная формула:

$$c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}. \quad (2)$$

Принимая плотность льда  $\rho_1= 0,9 \text{ т/м}^3$ , а воды  $\rho=1,0 \text{ т/м}^3$ , получим скорость распространения поверхностных волн в рассматриваемой среде в виде

$$c = \sqrt{\frac{(1-0,9)}{(1+0,9)}} \approx 0,23.$$

Таким образом, скорость распространения волн в этой среде будет составлять 0,23 скорости на границе вода - воздух.

При распространении в водоеме неограниченной глубины плоских прогрессивных волн используем следующие известные зависимости [9]:

скорость перемещения волн в горизонтальном направлении

$$c = \sqrt{\frac{g}{K}} = \frac{\sigma}{K} = \frac{g}{\sigma} = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} = \frac{\lambda\sigma}{2\pi}, \quad (3)$$

где  $K$  – волновое число  $K=2\pi/\lambda$ ;  $\lambda$  – длина волн;  $\sigma$  – частота волны,  $\sigma = \sqrt{gK}$ .

Параметры волн даны на рис. 3.

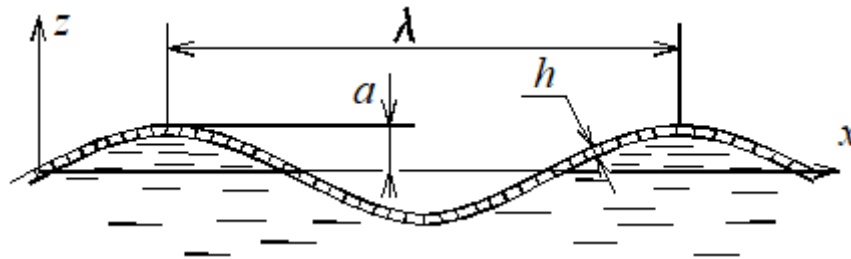


Рис. 3. Геометрические характеристики гравитационных волн со слоем битого льда на поверхности

При движении судна в воде со скоростью  $v$  известно [9], что длина поперечных волн, генерируемых судном, связана с длиной волны соотношением, аналогичным (3):

$$\lambda = \frac{2\pi v}{g}. \quad (4)$$

Потенциал скорости движения жидкости имеет вид:

$$\varphi = \frac{ag}{\sigma} e^{-Kz} \sin(Kx - \sigma t). \quad (5)$$

Вертикальное перемещение  $w$  частиц жидкости

$$w = a \cdot \cos(Kx - \sigma t), \quad (6)$$

где  $a$  – амплитуда колебаний.

При волновом движении жидкости, покрытой слоем битого льда толщиной  $h$ , запишем уравнение сил на поверхности льда [6, 9]:

$$m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \rho_B g w + \rho_B \left. \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right|_{z=0} = 0, \quad (7)$$

где  $m$  – масса обломков льда,  $\rho_B$  – плотность воды.

Рассматривая плотность потока энергии, выражение (7) можно переписать в виде

$$\rho_{\text{л}} h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \rho_{\text{в}} g w + \rho_{\text{в}} \frac{\partial \varphi}{\partial t} \Big|_{z=0} = 0. \quad (8)$$

Индексы «л» и «в» относятся ко льду и воде соответственно.

Отсюда частота свободных колебаний льдины около положения статического равновесия запишется в виде:

$$\sigma_{\text{л}}^2 = \frac{\rho_{\text{в}} g}{\rho_{\text{л}} h}. \quad (9)$$

Для волнового числа Д.Е. Хейсиным получено [2]:

$$K_{\text{л}} = \frac{\sigma^2}{g} \left[ \frac{1}{1 - (\sigma/\sigma_{\text{л}})} \right]. \quad (10)$$

Для фазовой скорости распространения волн на акватории, покрытой битым льдом:

$$c_{\text{л}} = \frac{g}{\sigma_{\text{в}}} \left[ 1 - (\sigma_{\text{в}}/\sigma_{\text{л}})^2 \right]. \quad (11)$$

Приведенные зависимости подтверждают уменьшение скорости распространения волн в битом льду и уменьшение длины волны.

Используя (3) и (11), можно получить отношение скорости волн, распространяющихся в битом льду к скорости волны на чистой воде:

$$\frac{c_{\text{л}}}{c_{\text{в}}} = 1 - (\sigma_{\text{в}}/\sigma_{\text{л}})^2. \quad (12)$$

Учитывая (9) и  $\sigma_{\text{в}} = g/c_{\text{в}}$ , получим:

$$\frac{c_{\text{л}}}{c_{\text{в}}} = 1 - \frac{g \rho_{\text{л}} h}{\rho_{\text{в}} c_{\text{в}}^2}. \quad (13)$$

Задаваясь рядом значений  $h$  и  $c_{\text{в}}$ , можно графически представить (13) в виде функции, изображенной на рис. 4.

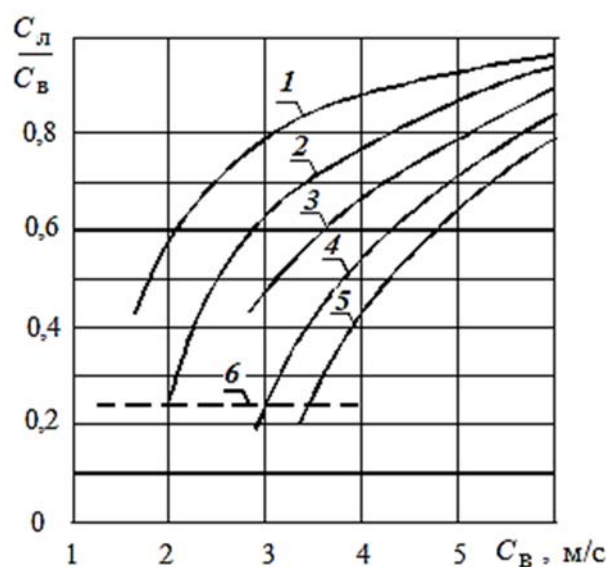


Рис. 4. Зависимость отношения скорости волны, распространяющейся в битом льду к скорости на чистой воде от толщины ледяного слоя  $h$ :

1 –  $h=0,2$  м; 2 –  $h=0,4$  м; 3 –  $h=0,6$  м; 4 –  $h=0,8$  м; 5 –  $h=1,0$  м; 6 – зависимость (1)

**Экранирующее влияние битого льда на распространение волн.** Для оценки экранирующего влияния битого льда применим энергетический подход, рассматривая отношение суммарной энергии волн и битого льда к энергии волны в чистой воде. Плотность потока кинетической энергии, определенная через длину волны, записывается таким образом [9]:

$$T_{\text{в}} = \frac{\rho_{\text{в}}}{2} \int_0^{\lambda} \varphi \left. \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right|_{z=0} dx. \quad (14)$$

Подставляя (5) в (14), получим:

$$T_{\text{в}} = \frac{\rho_{\text{в}} a^2 g^2 K}{2 \sigma^2} \int_0^{\lambda} \sin^2(Kx - \sigma t) dx. \quad (15)$$

Интегрирование (15) проще всего выполнить, разлагая синус разности двух углов, в результате получим:

$$T_{\text{в}} = \frac{\rho_{\text{в}} a^2 g^2 K}{2 \sigma^2} \frac{\lambda}{2} = \frac{\rho_{\text{в}}}{2} a^2 g \lambda_{\text{в}}. \quad (16)$$

Аналогично вычисляется и потенциальная энергия. Н.Е. Кочиным [9] показано, что величины кинетической и потенциальной энергии по отдельности совпадают и при распространении плоской монохроматической волны переходят одна в другую так, что их сумма постоянна.

Плотность кинетической энергии битого льда в волновом движении можно выразить формулой:

$$T_{\text{л}} = \frac{\rho_{\text{л}} h}{2} \int_0^{\lambda} \left( \frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 dx. \quad (17)$$

Подставляя вертикальные перемещения льда по (5), получим:

$$T_{\text{л}} = \frac{\rho_{\text{л}} h a^2 \sigma_{\text{л}}^2}{2} \int_0^{\lambda} \sin^2(Kx - \sigma t) dx. \quad (18)$$

Производя интегрирование аналогичное при получении (16), получим:

$$T_{\text{л}} = \frac{\rho_{\text{л}} h a^2 \sigma_{\text{л}}^2 \lambda_{\text{л}}}{2}. \quad (19)$$

Используя (3), придем к выражению:

$$T_{\text{л}} = \frac{2\pi \rho_{\text{л}} h a^2 g}{2}. \quad (20)$$

Экранирующее влияние битого льда представим в виде:

$$\Xi = \frac{T_{\text{в}} + T_{\text{л}}}{T_{\text{в}}} = \frac{\rho_{\text{в}} a^2 g \lambda_{\text{в}} \left( 1 + \frac{2\pi \rho_{\text{л}} h}{\lambda_{\text{в}} \rho_{\text{в}}} \right)}{\rho_{\text{в}} a^2 g \lambda_{\text{в}}} = \left( 1 + \frac{2\pi \rho_{\text{л}} h}{\lambda_{\text{в}} \rho_{\text{в}}} \right). \quad (21)$$

Длину волны определим из соотношения:

$$\lambda_{\text{в}} = \frac{2\pi c_{\text{в}}^2}{g}. \quad (22)$$

Подставляя (22) в (21), получим:

$$\Xi = 1 + \frac{\rho_{\text{л}} h g}{\rho_{\text{в}} c_{\text{в}}^2}. \quad (23)$$

Задаваясь рядом значений толщин льда и скорости прогрессивных волн, получим графическое представление экранирующего эффекта, которое показано на рис. 5.

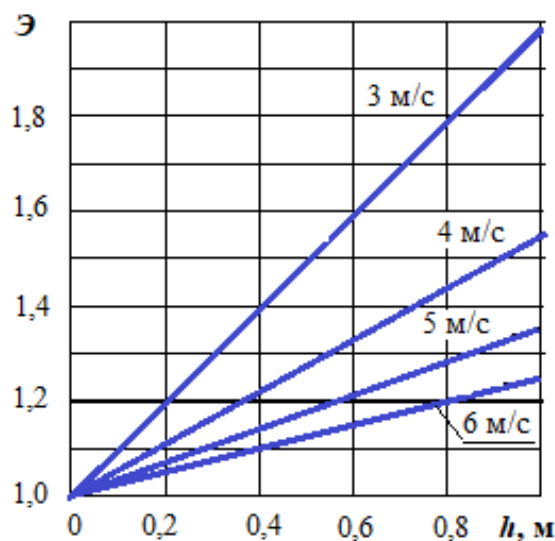


Рис. 5. Экранирующий эффект битого льда на поверхности воды

**Экспериментальное исследование влияния битого льда на распространение корабельных волн.** Экспериментальное исследование экранирующего эффекта битого льда проводилось в гидролотке кафедры прикладной математики НГТУ, оборудованном волнопродуктором пластинчатого типа. Гидролоток имел следующие размеры: 6,61 м (в длину), 0,5 м (в ширину) и 1 м (в высоту). Схема гидролотка показана на рис. 6.

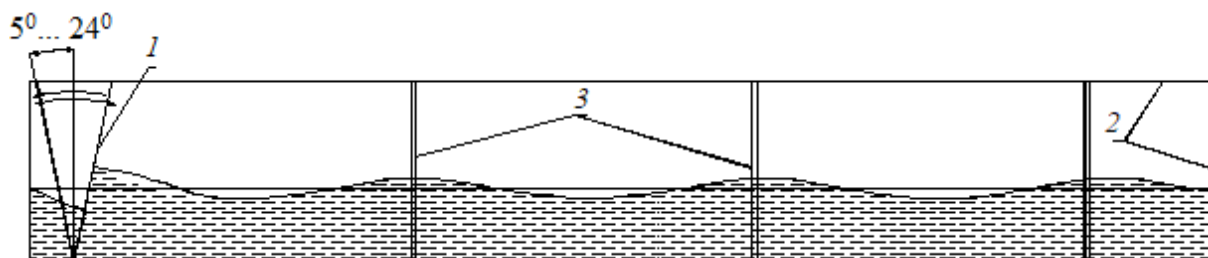


Рис. 6. Схема гидролотка:  
1 – пластинчатый волнопродуктор; 2 – корпус лотка;  
3 – вертикальные измерительные рейки

По длине лотка и была нанесена разметка с точностью 1 см. Через каждые 1,85 м длины были установлены вертикальные измерительные рейки.

Битый лед имитировался плитками с размерами в плане 100×100 мм, толщиной 20 мм. Материал плиток – полиэтилен высокого давления плотностью 0,91 т/м<sup>3</sup>.

Опыты проводились при глубине воды 0,4 м при частоте колебаний волнопродуктора 1 Гц. Амплитуда колебаний пластины волнопродуктора задавалась от 5° до 24°. Были проведены две серии опытов. Первая серия – в условиях чистой воды, вторая – с моделью битого льда на поверхности воды.

Регистрация волновой картины в лотке осуществлялась посредством видеосъемки, по которой определялась скорость движения волн, моменты начала установившегося движения, момент начала возникновения и процесс распространения стоячих волн. Амплитуды и длины волн в момент установившегося движения определялись по выделенным стоп- кадрам видеозаписи.

*Опыты на чистой воде.* Опыт начинался при спокойной поверхности воды. Начальная неправильность волнового профиля устранялась на расстоянии 1–1,5 длины волны от волнопродуктора. После начала работы волнопродуктора установившаяся максимальная амплитуда волнового профиля в средней части лотка наблюдалась, когда фронт начальной волны достигал задней стенки. Отражаясь от нее волна начинала формировать стоячие волны, постепенно занимающие  $\frac{3}{4}$  длины лотка.

Параметры волны – длина  $\lambda_v$ , скорость движения  $v_v$  и амплитуда  $a_v$  определялись в момент установившегося движения волны в зоне между первой и второй измерительными рейками (см. рис.6). Были использованы видеозаписи при амплитуде волнопродуктора  $20^\circ$ . При большей амплитуде ( $24^\circ$ ) на гребнях волн возникали плоские участки, отклоняясь от трохoidalной формы, что свидетельствовало о нелинейных эффектах при генерации волны. Характерный вид волнового профиля на чистой воде показан на рис. 7.



Рис. 7. Характерный профиль бегущей прогрессивной волны в воде при амплитуде волнопродуктора  $20^\circ$

Параметры волны с плитками на поверхности воды определялись при той же амплитуде. Характерный вид волны при этом показан на рис. 8. При амплитуде  $24^\circ$  гребень волны с плитками терял устойчивое положение и плитки переворачивались, заходили друг под друга, образуя второй слой. Поэтому результаты при этой амплитуде не рассматривались.

Интересно отметить, что перед фронтом плитки сплавивались (рис. 8, а), а за фронтом происходило разряжение (рис. 8, б), между плитками расстояние достигало 50 мм. Это явление наряду с наличием дополнительного слоя плиток (битого льда) на поверхности воды также может влиять на усиление экранирующего эффекта битого льда.

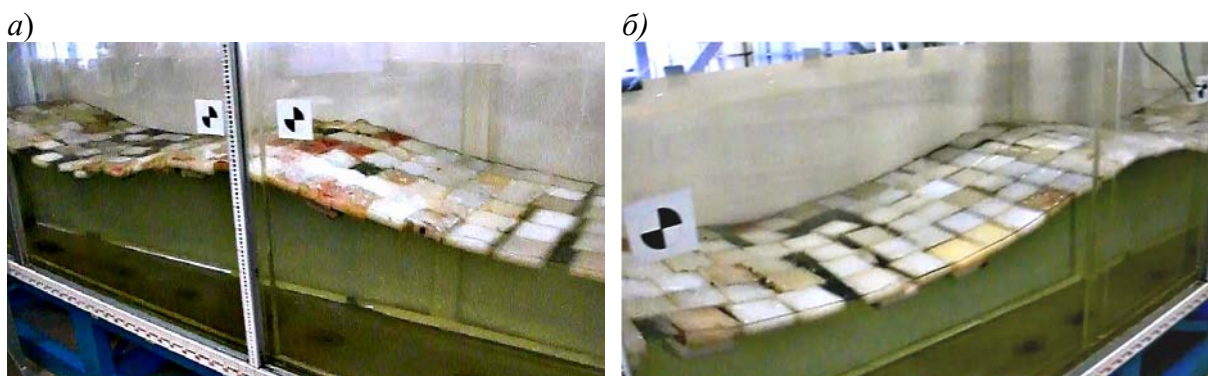


Рис. 8. Движение прогрессивной волны с моделированным битым льдом: а – вид на переднюю часть фронта волны, б – вид на фронт волны за гребнем

Скорость распространения волн определялась частотой возмущающего воздействия со стороны волнопродуктора. Средние результаты измерений параметров волн после анализа стоп-кадров видеозаписи сведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры волн на чистой воде и в битом льду

Условие волнового движения	Амплитуда качания волнопродуктора, град	Частота волнопродуктора, Гц	Длина волны, м	Амплитуда волны, м	Скорость волны, м/с
Чистая вода	20	1	1,75±0,05	0,18±0,02	1,75±0,05
Битый лед	20	1	1,65±0,05	0,14±0,02	1,65±0,05

Из данных таблицы следует, что наличие битого льда приводит к уменьшению амплитуды и длины волны, а также к уменьшению скорости распространения волны по сравнению со скоростью на чистой воде.

Результаты экспериментальных исследований подтверждают теоретические зависимости (13). Сравнение расчетов по теоретической зависимости (13) с экспериментальными данными (табл. 1) приведено в табл. 2 для следующих исходных данных: плотность модельного льда  $\rho_l = 0,91 \text{ т/м}^3$  и толщина  $h = 0,02 \text{ м}$ ; плотность воды  $\rho_v = 1,00 \text{ т/м}^3$ ; скорость волны в воде  $c_v = 1,75 \text{ м}$ .

Таблица 2

Сравнение полученных значений  $\frac{c_l}{c_v}$

Значение $\frac{c_l}{c_v}$ по (13)	Значение $\frac{c_l}{c_v}$ по данным табл. 1
$\frac{c_l}{c_v} = 1 - \frac{g \rho_l h}{\rho_v c_v^2} = 1 - \frac{9,81 \cdot 0,91 \cdot 0,02}{1 \cdot 1,75^2} = 0,942$	$\frac{c_l}{c_v} = \frac{1,65}{1,75} = 0,943$

Данные, приведенные в табл. 2, достаточно точно подтверждают результаты экспериментального исследования и существование экранирующего эффекта битого льда на образование волн при движении судов.

### Заключение

Теоретические исследования показали, что с увеличением толщины битого льда на поверхности воды в акватории снижается скорость распространения гравитационных волн, дано графическое представление этой зависимости, имеющей нелинейный характер. Наибольшее снижение скорости происходит при увеличении толщины битого льда и увеличивается с возрастанием скорости распространения волн.

Теоретически подтверждено существование экранирующего эффекта битого льда, отмечаемого в натуральных наблюдениях при движении судов в ледовых условиях, и выполнена оценка влияния толщины битого льда на скорость распространения волн в битом льду по сравнению с чистой водой.

Предложен теоретический параметр, количественно определяющий величину экранирующего эффекта в зависимости от основных физических факторов процесса



экранирования. Дана графическая зависимость параметра экранирования от толщины битого льда и скорости движения прогрессивных волн в битом льду, показывающая, что экранирующий эффект возрастает прямо пропорционально толщине льда и уменьшается при снижении скорости распространения волн.

Проведенные эксперименты качественно подтвердили наличие экранирующего эффекта: уменьшение скорости распространения волн, уменьшение амплитуды и длины волны.

Обнаружен факт горизонтального движения плиток на волнении, который может дополнительно увеличивать экранирующий эффект, что требует дальнейшего исследования с использованием данной экспериментальной установки.

Представленные результаты получены по проекту РНФ № 22-19-00376 «Экспериментально-теоретическое исследование полуэмпирических моделей взаимодействия судов со льдом».

### Литература

1. **Рывлин А.Я., Хейсин Д.Е.** Испытания судов во льдах. Л.: Судостроение, 1980. 207 с.
2. **Хейсин Д.Е.** Динамика ледяного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1967. 218 с.
3. **Завьялова К.Н. и др.** Движение внешней нагрузки по битому льду в канале // Изв. Алтайского Гос. Ун -та. 2018. №4 (102). С 73–78.
4. **Korobkin A., Khabachpaseva T., Papin A.** Waves Propagating Along a canal with Ice Cover//Enr. Journ. of Mechanics B/Fluid, 2017, vol 47. P.165–175.
5. **Milano V.R.** Resistance of ship to clew continuous motion in when assisted by an Air Cushion vehicle // Prog. of the 12-th Canadian Symposium Air Cushion Technology Sept. 1978. P 247–265.
6. **Грамузов Е.М., Москвичева Ю.А.** Сопротивление мелкобитого льда при движении ледокольных платформ на воздушной подушке // Вестник ВГАВТ (Н. Новгород). 2017, вып. №53. С 51–57.
7. **Козин В.М., Погорелова А.В.** Влияние битого льда на волновое сопротивление СВП при нестационарном режиме движения // ПМТФ, 1999. Т40, №6. С.48–53.
8. **Козин В.М.** Экспериментальные исследования влияния ледовых условий на эффективность разрушения ледяного покрова изгибно-гравитационными волнами от движения подводных судов: монография / В.М. Козин, В.Л. Земляк, Н.О. Батулин, К.И. Ипатов; Мин-во образования и науки РФ, Приамурский ун-т им. Шолом-Алейхема, Ин-т машиновед. и металлургии ДВО РАН. Новосибирск: Изд-во СО РАН 2017. 142 с.
9. **Кочин Н.Е.** Определение точного вида волн конечной амплитуды на поверхности раздела двух жидкостей конечной глубины // В кн. Труды Всероссийского съезда математиков в Москве 27 апр.-4 мая 1927г. М.-Л., Гос. Изд., 1928. С. 266–269.
10. **Доронин Ю.П., Хейсин Д.Е.** Морской лед. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 318 с.