

УДК 629.124.8.039

**Ю.А. Москвичева**  
**ВЛИЯНИЕ БИТОГО ЛЬДА НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ВОДЫ**  
**ПРИ ДВИЖЕНИИ СУДОВ ЛЕДОВОГО ПЛАВАНИЯ**

*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева*

Рассматривается задача об экранирующем эффекте битого льда при движении судна или его модели в поле битого льда. Показано несоответствие часто применяющихся приемов независимого сложения составляющих сопротивлений битого льда и воды в аналитических расчетах. Приводятся рекомендации по учету влияния мелкобитого льда на сопротивление воды.

**Ключевые слова:** битый лед, ледовое плавание, расчет сопротивления, экранирующий эффект, суда на воздушной подушке.

При решении задач ходкости судов при движении в ледовых условиях полное сопротивление окружающей среды представляют в виде [1,2]

$$R = R_p + R_{обл} + R_г, \quad (1)$$

где:  $R$  – полное сопротивление, кН;

$R_p$  – сопротивление от разрушения льда и трения льда о корпус, кН;

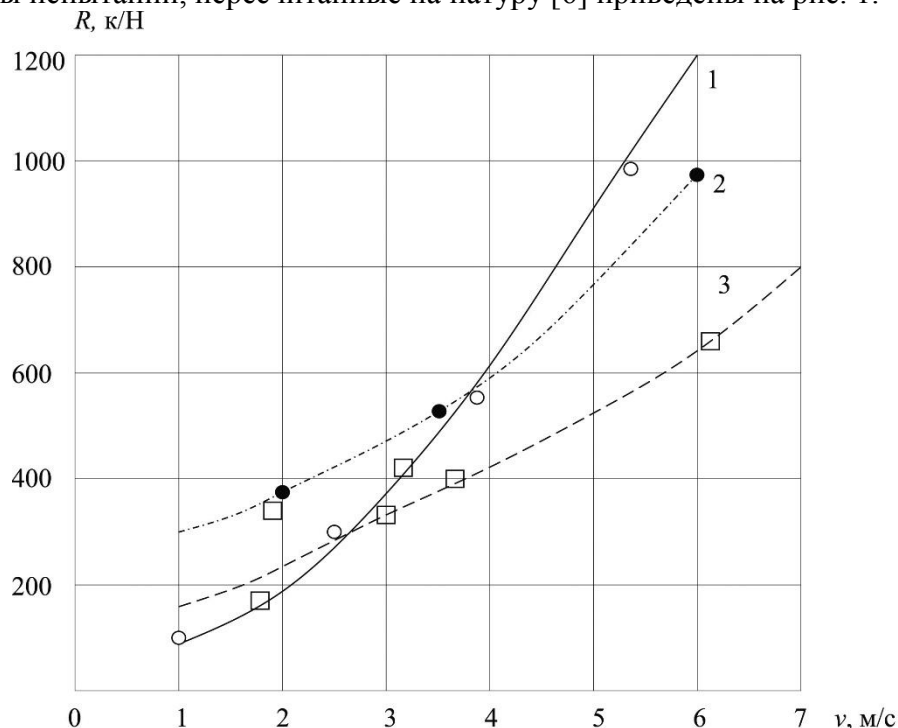
$R_{обл}$  – сопротивление обломков льда о корпус, кН;

$R_г$  – сопротивление воды, кН.

При аналитических расчетах по зависимости (1), сопротивление воды чаще всего определяется так же, как и при движении судна в свободной ото льда воде [1, 2]. Такой подход вносит в результаты расчета погрешность, так как сопротивление воды при движении судна при движении судна в ледовых условиях отличается от сопротивления при движении в свободной воде. Это связано не только с изменением условий обтекания корпуса судна при частичном облегании его льдом, но и с влиянием битого и сплошного льда на процесс волнообразования. При низких скоростях движения судна это влияние не велико. Однако при увеличении скоростей хода лед оказывает экранирующее влияние на распространение гравитационных волн [4, 5], что отмечалось рядом судоводителей. Отмеченное обстоятельство относится не только к ледоколам и транспортным судам ледового плавания, но и в большей степени к ледокольным судам на воздушной подушке (ЛПВП), безразмерная скорость которых (числа Фруда –  $Fr$ ) достаточно велика и при движении которых распространяются (преимущественно) поперечные волны.

Показательными результатами экранирующего влияния ледяного покрова могут служить модельные испытания ЛПВП, проведенные Милано [6]. В ледовом бассейне испытывалась модель (масштаб  $\lambda=28$ ) в чистой воде, в битом льду толщиной 39 мм и в сплошном льду толщиной 39-49 мм. Отношение модуля упругости  $E$  к пределу прочности льда на изгиб изменялись от 1230 до 3000. Пересчет на натуру проводился по критерию подобия Фруда (сопротивление  $R_n = \lambda^3 R_m$ ,  $v_n = \sqrt{\lambda} v_m$ ), где индексы «н» и «м» соответствуют натуре и модели. Давление ВП для модели составляло  $\sim 450$  Па (для натуре  $\sim 12,6$  кПа) для воды и битого льда, и  $\sim 500-900$  Па для модели (для натуре 15-20 кПа) для сплошного льда.

Результаты испытаний, пересчитанные на натуру [6] приведены на рис. 1.



**Рис. 1. Сопротивление ЛПВП:**

**1 – чистая вода; 2 – битый лед на поверхности воды; 3 – сплошной лед на воде**

На первый взгляд, вызывает недоумение, когда при скоростях движения более 4 м/с сопротивление воды превышает суммарное сопротивление воды и льда. Для оценки экранирующего влияния битого льда на распространение гравитационных волн рассмотрим движение ледокольного судна на воздушной подушке в поле мелкобитого однородного льда постоянной сплоченности  $\bar{S}$  и толщины  $h$ . Величины  $S$  и  $h$  будем считать не зависящими от времени. Также примем, что упругого и фрикционного взаимодействия между льдинами не происходит. Воду считаем идеальной жидкостью бесконечной глубины и движение в ней безвихревым.

Над поверхностью воды и льда движется ЛПВП с постоянной скоростью  $v$  и постоянным давлением  $P_{ВП}$ .

Движение судна над свободной поверхностью приводит к ее деформации, которую можно определить зависимостью [3].

$$Z_e = \frac{4P_{ВП}}{\rho_B g} \sin \frac{1}{Fr^2} \cos \frac{x_0}{L_{ВП} Fr^2} \quad (2)$$

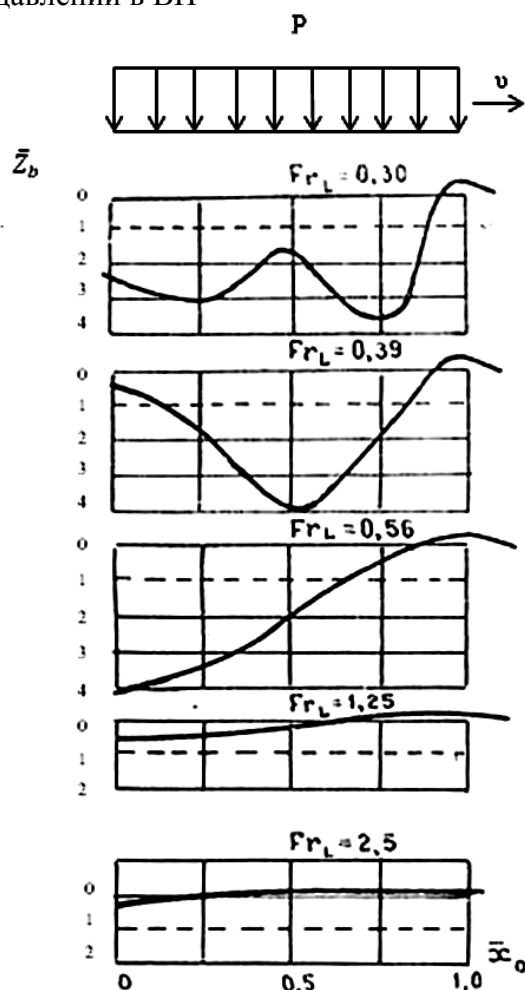
где:  $Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}}$  – число Фруда;

$L_{ВП}$  – длина ВП, м,

$x_0$  – текущая координата, м (рис. 2)

Для ряда значений чисел Фруда вид этой зависимости приведен на рис. 2 [3]. Аналогичные кривые деформаций водной поверхности были получены и Картером [7]. Следует заметить, что при низких числах Фруда появление многочисленного количества горбов и впадин не подтверждается экспериментально. Поэтому приближенно можно считать, что приведенные на рис.2 кривые отражают реальную картину только при числах

Фруда  $> 0,35$ . При более низких скоростях деформация водной поверхности соответствует впадине при статическом давлении в ВП



**Рис.2. Профиль деформирования поверхности воды при движении СВП  $Z_B = Z_B \rho_B g / P_{ВП}$ :  
 — на ходу; - - - на стопе;  $X_0 = X_0/L$  – отсчитывается от задней кромки ВП**

Будем также полагать, что движение судна в поле мелкобитого льда не нарушает характера волновых движений, но приводит к экранирующему влиянию, т.е., к некоторому уменьшению амплитуд генерируемых волн.

Очевидно длина гравитационной волны  $\lambda$ , связанная с длиной распределения давления в ВП –  $L$  будет различна, и используя (2) приближенно можно записать (при  $Fr > 0,35$ )

$$\lambda/L = 5Fr - 1 \tag{3}$$

Будем полагать, что движение ЛПВП со скоростью  $v$  приведет к образованию плоских прогрессивных волн, перемещающихся со скоростью судна с частотой  $\omega$  [4,5]

$$\omega_B = \frac{2\pi v}{\lambda_B} \tag{4}$$

Д.Е. Хейсиным [5] получено, что скорость распространения волн в бассейне покрытым льдом оказывается меньше, чем в бассейне безо льда, а сама волна укорачивается. В частности, для воды волновое число

$$K_B = \frac{\omega_B^2}{g} \tag{5}$$

Для воды, покрытой битым льдом [5],

$$K_{Л} = \frac{\omega_B^2}{g} \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega_B}{\omega_{П}}\right)^2} = K_B \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega_B}{\omega_{П}}\right)^2} \quad (6)$$

где:  $\omega_{П} = \left(\frac{\rho_B g}{\rho_L h}\right)^{0,5}$  - частота свободных колебаний льдины (как поплавок) толщиной  $h$  около положения статического равновесия [5].

Приближенно влияние плавающего битого льда на распространение гравитационных волн можно учесть, сравнивая энергию поверхностных гравитационных волн в чистой воде, и в воде покрытой битым льдом. Д.Е. Хейсин [5] показал, что кинетическая энергия плоской волны, распространяющаяся вдоль оси  $x$  и приходящаяся на длину волны  $\lambda$  и на единицу ширины фронта определяется по формуле:

$$T_{Л} = \frac{\rho_L h}{2} \int_0^\lambda \left(\frac{dW}{dt}\right)^2 dx + \frac{\rho_B}{2} \int_0^\lambda \left.\frac{d\varphi}{dz}\right|_{z=0} dx \quad (7)$$

где первое слагаемое представляет кинетическую энергию битого льда, второе – кинетическую энергию колеблющихся масс воды;  $\rho_L$ ,  $\rho_B$  – плотности льда и воды, т/м<sup>3</sup>;  $h$  – толщина обломков льда, м;  $W$  – вертикальные перемещения частиц воды и льда, м;  $\varphi$  – потенциал скорости, м<sup>2</sup>/с;  $x$ ,  $z$  – координаты, м;  $t$  – время, с.

Для плоских прогрессивных волн перемещение  $W$  и потенциал скорости  $\varphi$  задаются в виде [4, 5].

$$W = a \cos(Kx - \omega t) \quad (8)$$

$$\varphi = \frac{ag}{\omega} e^{Kz} \sin(Kx - \omega t) \quad (9)$$

где:  $a$  – амплитуда волны;

$K_B$  – волновое число,  $K = 2\pi/\lambda$ , 1/м;

$\omega_B$  – частота колебаний, 1/с

Для чистой воды с представлением (8) и (9) получено [5]:

$$T = \frac{\rho_B g a^2 \lambda_B}{4} \quad (10)$$

Там же получено, что величина кинетической энергии при распространении прогрессивных волн и потенциальной – одинакова.

Подставляя (6) в выражение для кинетической энергии битого льда, получим

$$T_{Л} = \frac{\rho_L h}{2} \int_0^\lambda \left(\frac{dW}{dt}\right)^2 dx = \frac{\rho_L h a^2 \omega_{Л}^2}{2} \int_0^\lambda \sin(K_{Л} x - \omega_{Л} t) dx = \frac{\rho_L h a^2 \omega_{Л}^2 \lambda_{Л}}{4}. \quad (11)$$

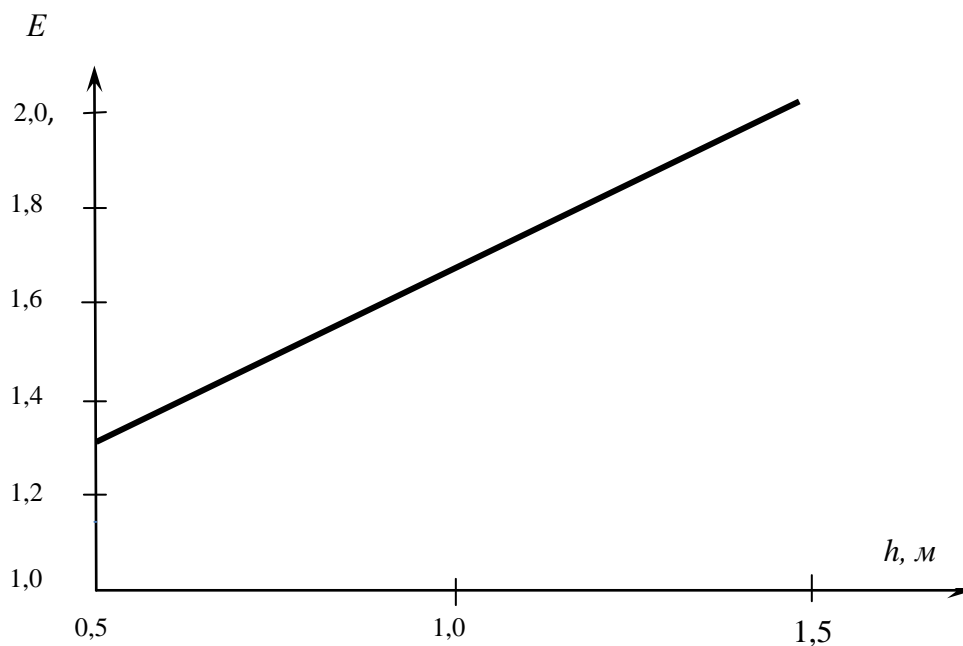
Экранирующая способность битого льда

$$E = \frac{T_{Л} + T_B}{T_B} = \frac{\rho_B g a^2 \lambda_B + \rho_L h a^2 \omega_{Л}^2 \lambda_{Л}}{\rho_B g a^2 \lambda_B} = 1 + \frac{\rho_L h \omega_{Л}^2 \lambda_{Л}}{\rho_B g \lambda_B}. \quad (12)$$

После подстановки в (12): (5), (6), (10), (11) получим

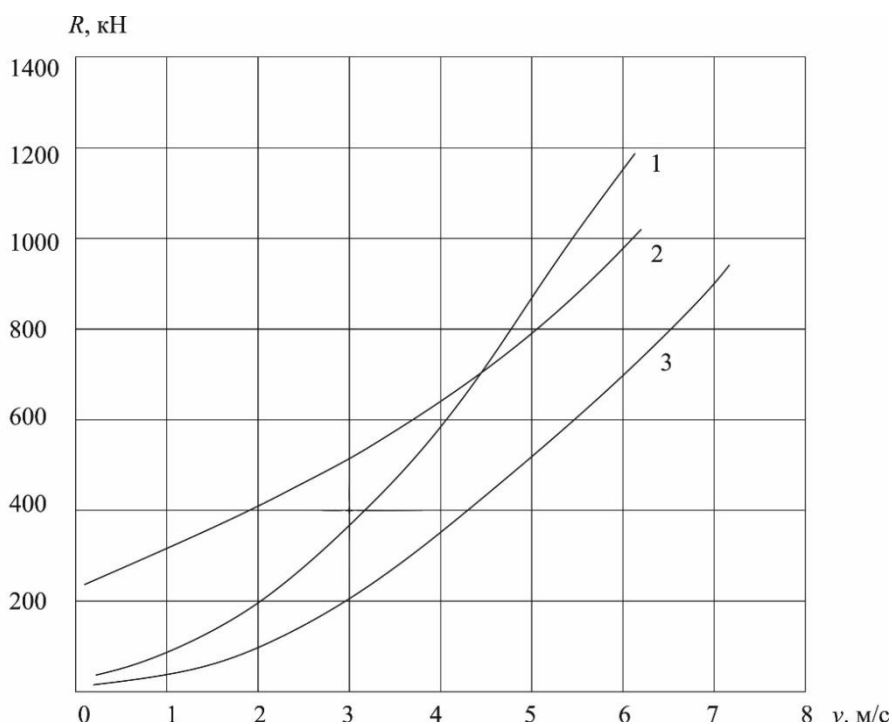
$$E = 1 + \left(\frac{\omega_B}{\omega_{П}}\right)^2 g K_B. \quad (13)$$

На рис. 3 приведены результаты расчета экранирующей способности для ряда толщин льда.



**Рис. 3.** Экранирующая способность битого льда в зависимости от толщины при движении ЛПВП длиной 23 м при скоростях до 6,0 м/с

Считая, что сопротивление воды пропорционально изменению энергии в волновом движении, вернемся к графику на рис. 1 и перестроим сопротивление с учетом экранирующей способности битого льда.



**Рис. 4.** Кривые сопротивления: 1 – воды [6]; 2 – в поле битого льда толщиной 1,1 м [6]; 3 – сопротивление воды, пересчитанное с учетом экранирующего эффекта

Полученные результаты можно использовать для оценки сопротивления воды при движении ЛПВП с учетом экранирующего влияния битого льда.

Можно предположить, что при движении судна в поле мелкобитого льда с функцией сплоченности  $\bar{S} = 0; 0,1 \dots 1,0$  экранирующее влияние льда будет уменьшаться пропорционально функции сплоченности.

### *Библиографический список*

1. Зуев, В.А. Средства продления навигации на внутренних водных путях [Текст] / В.А. Зуев. – Л.: Судостроение, 1986. – 208 с.
2. Ионов, Б.П. Ледовая ходкость судов [Текст] / Б.П. Ионов, Е.М. Грамузов. – СПб.: Судостроение, 2013. – 507 с.
3. Демешко, Г.Ф. Проектирование судов. Амфибийные суда на воздушной подушке. Т.1. [Текст] / Г.Ф. Демешко. – СПб.: Судостроение, 1992. – 290 с.
4. Кочин, Н.Е. Теоретическая гидромеханика. Т.1 [Текст] / Н.Е. Кочин, И.А. Кибель, Н.В. Розе. – Фихматгиз, М., 1963, 583 с.
5. Хейсин, Д.Е. Динамика ледяного покрова [Текст] / Д.Е. Хейсин. – Л.: Гидрометеиздат, 1967. – 212 с.
6. Milano, V.R. Resistance of ship to slow continuous motion in the when assisted by an Air Cushion Vehicle. / V.R. Milano // Proc. Of the 12-th Canadian Symposium on Air Cushion Technology. Sept. 1978, pp. 247-261.
7. Carter, D. Mathematical Analysis of the Ice-breaking by Air Cushion Platform // Transport Canada. № 1, Sept. 1977, pp. 1-13.