

УДК 629.124.791

Е.М. Грамузов, Н.Е. Тихонова

## МЕТОД УЧЕТА ВЛИЯНИЯ СНЕГА НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ЛЕДОКОЛА ЗА СЧЕТ ПРИВЕДЕННОЙ ТОЛЩИНЫ СПЛОШНОГО ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Предложен метод учета влияния снега на сопротивление ледокола. Для этого использована приведенная толщина льда.

*Ключевые слова:* сплошной ледяной покров, снег, сопротивление ледокола, толщина льда.

Встречающиеся в природе ледовые условия весьма разнообразны, и почти невозможно найти совершенно идентичные ледовые условия. Практически не встречается чистый ледяной покров, он всегда в той или иной мере покрыт снегом. Для того чтобы можно было сравнивать ледопроездимость судов по натурным данным, полученным в ледовых условиях, отличающихся между собой толщиной льда и снега, удобно использовать приведённую толщину льда. Под ней понимается условная толщина незаснеженного ровного сплошного ледяного покрова, при которой ледокол испытывает такое же ледовое сопротивление, как и при наличии снега на ледяном покрове.

Для получения зависимостей, позволяющих определить приведённую толщину льда, использовались расчётные методы для вычисления ледового сопротивления и сопротивления снега движению речного ледокола, наиболее полно учитывающие особенности формы его корпуса [1, 2].

Чистое ледовое сопротивление представлено в виде

$$R = \sum_{j=1}^m k_j r_j, \quad (1)$$

где  $r_j$  - комбинация определяющих ледовое сопротивление факторов, связанная с некоторым физическим процессом;  $k_j$  - эмпирический коэффициент.

Выражение (1) для  $R$  в силовой интерпретации выглядит:

$$R = R_{p_{ст}} + R_{p_v} + R_{o_{ст}} + R_{o_v}, \quad (2)$$

где  $R_{p_{ст}}, R_{p_v}$  - статическая и зависящая от скорости составляющие сопротивления разрушению;  $R_{o_{ст}}, R_{o_v}$  - аналогичные составляющие сопротивления обломков льда.

С учетом сказанного напишем выражения для комбинаций определяющих факторов  $r_j$ .

$$r_{p_{ст}} = \frac{h^4}{D\alpha} \left[ \left( 1 + f\gamma_{лт\phi} \right) + k_{c\phi} \gamma_{c\phi} \sqrt{\frac{\operatorname{tg}\varphi_{2\phi}}{1 + \operatorname{tg}^2\varphi_{2\phi}} \frac{D\alpha^2}{h}} + \right. \\ \left. + 0.66(1 + \Phi_{лт})B\alpha + k_{c\phi} \Phi_c \frac{D\alpha^3 B}{h} \right]; \\ r_{p_v} = Fr_h \operatorname{tg}\varphi_{1\phi} r_{p_{ст}}; \\ r_{o_{ст}} = (\rho - \rho_l)gh\Omega_l(\Phi_n + f\Phi_{лт}); \\ r_{o_v} = \rho_l h B v^2 \left[ \left( 1 + \frac{0.019}{(0.215 + Fr_h \operatorname{tg}\varphi_{1\phi})} \frac{\rho}{\rho_l} \frac{1}{\alpha h} \right) (\Phi_u + f\Phi_{лт}) + \right. \\ \left. + 2 \frac{\rho}{\rho_l} \frac{\Omega_l}{Bh} (\Phi_r + f\Phi_{лт}) \right], \quad (3)$$

где  $k_{сф} = 1.5 \cdot 10^{-3} \text{кПа}^{-1}$ ,  $k_{сф} = 0.5 \cdot 10^{-3} \text{кПа}^{-1}$ ;

$\text{tg}\varphi_{1\phi}$ ,  $\sqrt{\text{tg}\varphi_{2\phi}/(1-\text{tg}^2\varphi_{2\phi})}$ ,  $\gamma_{лт\phi}$ ,  $\gamma_{сф}$ ,  $\Phi_{лт}$ ,  $\Phi_{с}$ ,  $\Phi_{п}$ ,  $\Phi_{пт}$ ,  $\Phi_{и}$ ,  $\Phi_{ит}$ ,  $\Phi_{г}$ ,  $\Phi_{гт}$ , - коэффициенты формы носовой оконечности;  $h$ ,  $D$ ,  $\alpha$  - толщина, цилиндрическая жесткость и параметр изгиба пластины на упругом основании;  $\rho$  и  $\rho_{л}$  - плотность воды и льда;  $v$ ,  $Fr_h$  - скорость хода, число Фруда по глубине;  $f$  - коэффициент трения льда о корпус судна;  $g$  - ускорение свободного падения;  $B$  - ширина по КВЛ;  $\Omega_{л}$  - площадь поверхности корпуса, облегаемой битым льдом.

Эмпирические коэффициенты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения эмпирических коэффициентов

Обозначение	$k_{рсм}$	$k_{рв}$	$k_{осм}$	$k_{ов}$
Единица измерения	кПа <sup>2</sup>	кПа <sup>2</sup>	-	-
Значения	$1,3 \cdot 10^6$	$4,7 \cdot 10^6$	2,7	0,88

Сопротивление снега рассчитывается по формуле

$$R_c = k_{сн} g h_c \Omega_{л} (\Phi_{п} - f \Phi_{пт}).$$

$$k_{сн} = 0.3 \Gamma / \text{м}^3 \quad (4)$$

Расчёт производился для проектов речных ледоколов Р47, 16, 1105, 1191 следующим образом. Для различных толщин льда и скоростей движения судна вычислялось суммарное сопротивление снега и льда, затем подбиралась толщина незаснеженного льда, для которой сопротивление равнялось полученной ранее величине суммарного сопротивления. Результаты расчётов выборочно приведены на графиках (рис. 1).

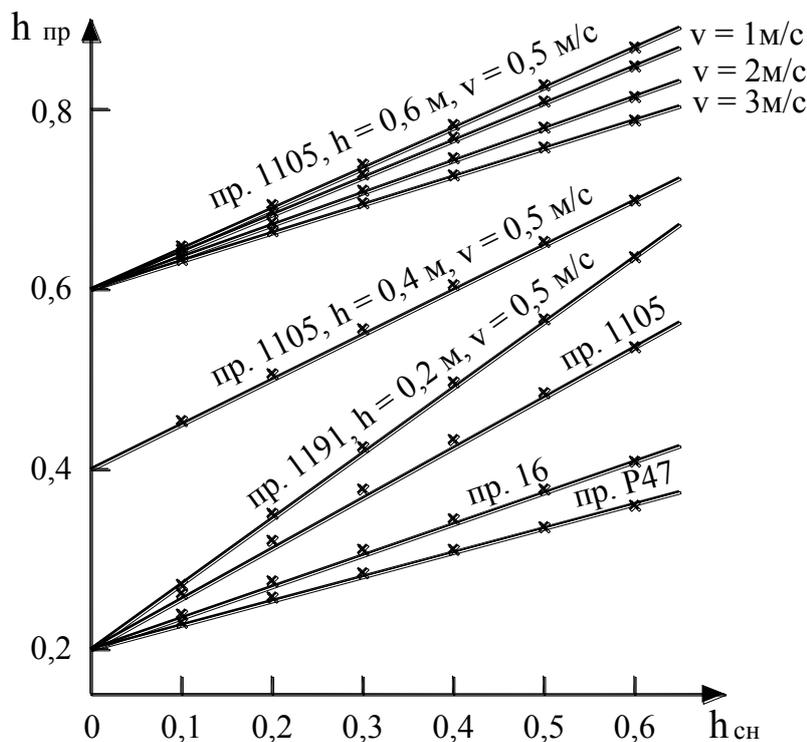


Рис. 1. Графики зависимостей приведённой толщины льда от толщины снега, толщины льда, скорости судна и проекта судна

Из анализа рис. 1 следует, что существует линейная зависимость, связывающая между собой толщины льда и снега и приведённую толщину льда  $h_{пр}$ .

$$h_{пр} = h + kh_{сн}, \quad (5)$$

где  $k$  – коэффициент приведения толщины снега к толщине льда.

При определении коэффициентов приведения  $k$  использовался метод наименьших квадратов. Эти коэффициенты получены для всех перечисленных ранее проектов речных ледоколов при разных толщинах льда и скоростях движения судна.

Как видно из рис. 1, коэффициент  $k$  зависит от скорости судна, толщины льда и проекта судна.

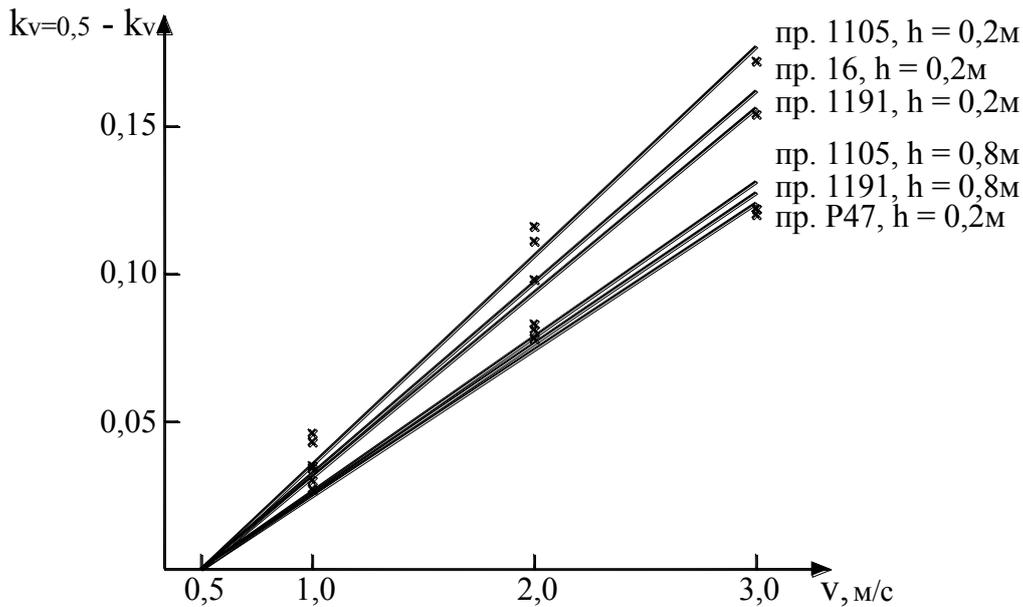


Рис. 2. Графики зависимостей уменьшения коэффициента  $k$  от его значения при скорости судна равной 0,5 м/с до значения при текущей скорости судна от скорости, толщины льда и проекта судна

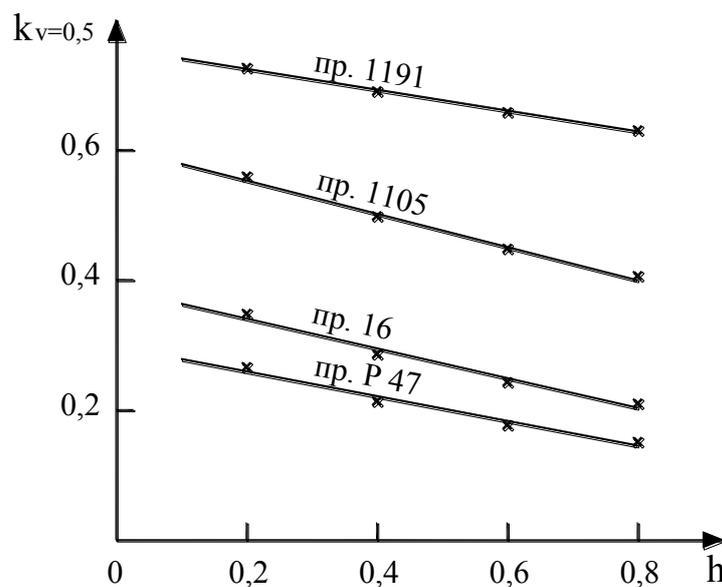


Рис. 3. Графики зависимостей значения коэффициента  $k$  при скорости судна равной 0,5 м/с от толщины льда и проекта судна

На рис. 2 приведены графики зависимостей уменьшения коэффициента  $k$  от его значения при скорости судна равной 0,5 м/с ( $k_{v=0,5}$ ) до значения при текущей скорости судна ( $k_v$ ) от скорости, толщины льда и проекта судна.

Из рис. 2 следует, что разность  $k_{v=0,5} - k_v$  зависит от скорости судна и практически не зависит от проекта судна и от толщины льда. Зависимость разности  $k_{v=0,5} - k_v$  от скорости судна можно аппроксимировать линейной регрессией:

$$k_{v=0,5} - k_v = a_0 + a_1 v \text{ или } k_v = k_{v=0,5} - a_0 - a_1 v.$$

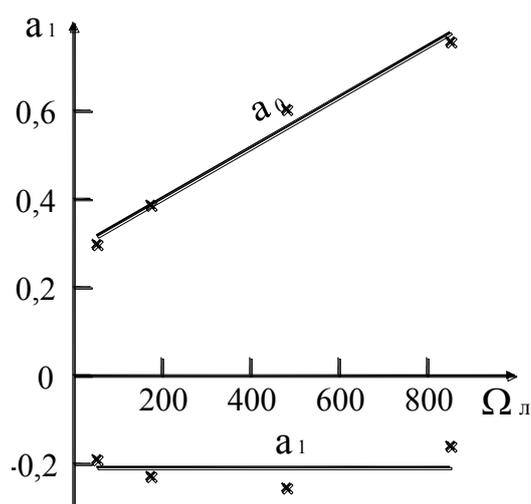
На рис. 3 приведены графики зависимостей коэффициента  $k_{v=0,5}$  от толщины льда и проекта судна.

Как видно из рис. 3, между коэффициентом  $k_{v=0,5}$  и толщиной льда также существует линейная зависимость, т.е. можно записать:

$$k_{v=0,5} = a_0 + a_1 h. \quad (6)$$

Коэффициенты  $a_0$  и  $a_1$  из уравнения (2) различны для разных проектов судов. В качестве параметра, характеризующего проект судна, была принята площадь зоны облегания корпуса судна льдом ( $\Omega_{\text{л}}$ ). Такой выбор был сделан на основании анализа формул для расчёта сопротивления льда и снега. Лишь некоторые составляющие сопротивления льда движению судна, а именно сопротивление притапливанию льдин и гидродинамическая часть сопротивления, обусловленная сопротивлением воды движению льдин, зависит от  $\Omega_{\text{л}}$ . В то же время между  $\Omega_{\text{л}}$  и величиной сопротивления снега существует прямо пропорциональная зависимость. Величина приведённой толщины льда зависит от того, какую долю составляет сопротивление снега от суммарного сопротивления. С увеличением  $\Omega_{\text{л}}$  эта доля растёт, и наоборот. В расчётной формуле для определения сопротивления снега не участвуют толщина льда и скорость судна, поэтому с ростом этих величин доля сопротивления снега от суммарного сопротивления уменьшается, и приведённая толщина льда также уменьшается.

На рис. 4 приведены графики зависимостей коэффициентов  $a_0$  и  $a_1$  из (6) от  $\Omega_{\text{л}}$ .



**Рис. 4. Графики зависимостей коэффициентов линейной регрессии из выражения (6) от площади зоны облегания судна льдом**

Как видно из рис. 4, коэффициент  $a_0$  линейно зависит от  $\Omega_{\text{л}}$ , а коэффициент  $a_1$  практически от неё не зависит.

С учётом сказанного получается следующая зависимость для определения коэффициента приведения:

$$k = a_0 + a_1\Omega_{л} + a_2h + a_3v. \quad (7)$$

Коэффициенты  $a_0 \div a_3$  определены с помощью метода наименьших квадратов. Окончательно выражение (7) запишется:

$$k = 0,284 + 0,575 \cdot 10^{-3}\Omega_{л} - 0,164h - 0,048v. \quad (8)$$

Учитывая, что площадь зоны облепания корпуса льдом в соответствии со схемой, принятой в [3], приближённо равна площади конструктивной ватерлинии от носового перпендикуляра до конца цилиндрической вставки, её следует вычислять по формуле:

$$\Omega_{л} = (L_{нз}\alpha_{нз} + L_{цв})B$$

где  $L_{нз}$  – длина носового заострения;  $\alpha_{нз}$  – коэффициент полноты носовой ветви КВЛ.

В табл. 2 приведены значения  $\Omega_{л}$  для проектов речных ледоколов.

Таблица 2

## Значения величины площади зоны облепания судна льдом

№ проекта	P47	16	1105	1191
$\Omega_{л}, м^2$	53	175	482	853

Формула (8) получена для толщин льда в диапазоне 0,2÷0,8 м, толщин снега в диапазоне 0÷0,6 м и скоростей движения судна в диапазоне 0,5÷3 м/с. Шаг для вычисления коэффициента  $k$  составил: по толщине льда – 0,2 м; по толщине снега – 0,1 м; по скорости движения судна – 0,5 м/с.

Для оценки точности аппроксимации таблично заданной функции выражением (8) вычислены средние квадратичные отклонения  $\sigma$  значений коэффициента  $k$ , а также максимальные отклонения, взятые по модулю  $\delta_{\max}$ . Эти отклонения составили:  $\sigma = 0,017$ ;  $\delta_{\max} = 0,055$ .

Можно предположить, что рассматриваемая выборка из генеральной совокупности может представлять всю совокупность, так как охвачены все проекты речных ледоколов, имеющие к тому же сильно отличающуюся друг от друга площадь зоны облепания судна льдом, все толщины льда, которые речной ледокол может преодолевать непрерывным ходом, а также толщины снега и скорости движения судна, реально встречающиеся на внутренних водных путях. Максимальная возможная ошибка при вычислении эффективной толщины льда по предложенной формуле будет при толщине снега 0,6 м и составит 3 см, что не превышает точности натуральных измерений. Разумеется, что точность расчётных значений определена по отношению к используемым методам определения ледового сопротивления.

В качестве примера покажем значения коэффициентов приведения  $k$  для случая, когда приведённая толщина ледяного покрова равна предельной, преодолеваемой ледоколом с минимальной устойчивой скоростью 0,5 м/с. Расчёты выполнены для относительной толщины снежного покрова  $h_{сн}/h = 0,5$  и приведены в табл. 3. В таблице также даны значения относительной приведённой толщины льда  $h_{пр}/h$  и предельных толщин льда, для которых проводились расчёты.

Таблица 3

## Коэффициенты приведения в предельных льдах

№ проекта	P47	16	1105	1191
$h_{пр}$	0,35	0,35	0,75	0,75
$k$	0,26	0,34	0,42	0,68
$h_{пр}/h$	1,13	1,17	1,21	1,34

Анализ проведённых исследований показывает, что приведённая толщина ледяного покрова с учётом снега зависит не только от толщины льда и снега, но и от геометрических параметров ледокола и скорости его движения. Это можно объяснить различной ролью отдельных составляющих в общем балансе ледового сопротивления.

Наличие снега на ледяном покрове существенно увеличивает приведённую толщину льда, а, следовательно, и полное ледовое сопротивление движению ледокола. Для приведённого в качестве примера расчётного случая движения речных ледоколов в предельных льдах коэффициент приведения снега колеблется в пределах  $0,26 \div 0,68$ , а приведённая толщина льда возрастает по сравнению с незаснеженным льдом в  $1,13 \div 1,34$  раза.

#### Библиографический список

1. **Ионов, Б.П.** Ледовая ходкость судов / Б.П. Ионов, Е.М. Грамузов. – СПб.: Судостроение. 2001. – 512 с.
2. **Грамузов, Е.М.** Сопротивление снега при движении ледокола // Проектирование средств продления навигации: межвуз. сб. / Горьков. политехн. ин-т. – Горький, 1986. С. 59–71.
3. **Зуев, В.А.** Взаимодействие судов со льдом: учеб. пособие / В.А. Зуев, Е.М. Грамузов; Горьков. политехн. ин-т. – Горький, 1988. – 89 с.
4. **Зуев, В.А.** Средства продления навигации на внутренних водных путях / В.А. Зуев. – Л.: Судостроение, 1986. – 207 с.
5. **Сазонов, К.Е.** Теоретические основы плавания судов во льдах / К.Е. Сазонов. – СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2010. – 274 с.

*Дата поступления  
в редакцию 18.10.2011*

**Е.М. Gramuzov, N.E. Tihonova**

#### **METHOD OF ACCOUNTING FOR THE INFLUENCE OF SNOW ON THE RESISTANCE ICEBREAKER DUE REDUCED THICKNESS SOLID ICE COVER**

We propose a method of accounting for the influence of snow on the resistance of the icebreaker. Reduced thicknesses of the ice are used for this.

*Key words:* solid ice cover, snow, ice breaker resistance, the thickness of ice.