

DOI.org/10.5281/zenodo.807783
УДК 629.5.01

А.Н. Зиневич, М.В. Китаев

ЗИНЕВИЧ АНДРЕЙ НИКОЛАЕВИЧ – магистрант Инженерной школы,

e-mail: Andrej-zinevich@yandex.ru

КИТАЕВ МАКСИМ ВЛАДИМИРОВИЧ – к.т.н., доцент кафедры кораблестроения

и океанотехники Инженерной школы, e-mail: kitaev.mv@dvfu.ru

Дальневосточный федеральный университет

Суханова ул., 8, Владивосток, 690091

Сравнительный анализ методов расчета ледовой ходкости ледоколов

Аннотация: При проектировании ледоколов и судов ледового плавания наиболее важными являются показатели их ледовой ходкости, особенно в сплошных льдах, определяющие функциональные возможности конкретного судна. К настоящему времени известно большое количество эмпирических методов, позволяющих осуществить численную оценку ходовых качеств ледокола в сплошных льдах. Эти методы отличаются по количеству учитываемых параметров формы корпуса судна и по достоверности получаемых результатов.

В данной работе приведены результаты сравнительного анализа существующих методов расчета сопротивления движению ледокола в сплошных льдах. Рассмотрены эмпирические методы, предложенные В.И. Каштеляном, Д.Д. Максutowым, О.В. Фадеевым, Г. Линдквистом, К. Risca, Я.И. Войткунским и др. Авторами статьи выполнено сравнение результатов расчетов с опубликованными данными натурных и модельных испытаний ледоколов «Ермак» и «Москва».

Ключевые слова: ледовая ходкость, ледокол, сопротивление движению судна.

Введение

В последнее время все больше внимания уделяется созданию технических средств и способов разработки природных месторождений углеводородов в Арктических морях, что влечет за собой необходимость создания ледокольного флота и флота обеспечения.

Очевидным фактом является то, что разработка и совершенствование методов расчета показателей ледовой ходкости ледоколов и судов ледового плавания является актуальной задачей с точки зрения будущих возможностей и перспектив.

Сложность рассматриваемой задачи во многом обусловлена проблемами, связанными с моделированием ледяного покрова вследствие неоднородности его физико-механических свойств, зависящих от толщины, температуры, солёности, структуры, пористости, возраста и других параметров, учесть которые в ходе модельного эксперимента не всегда представляется возможным.

Первые исследования, связанные с определением сопротивления движению судна в сплошных льдах, были проведены русскими инженерами Р.И. Рунгербергом и В.И. Афанасьевым (см. [3]). Значительный вклад в развитие науки о ледовой ходкости судов внесли адмирал С.О. Макаров и академик А.Н. Крылов, проводившие экспериментальные исследования, в основе которых были результаты натурных и модельных испытаний ледокола «Ермак» [3]. В научной сфере хорошо известны труды и достижения таких исследователей, как А.В. Бронников, И.В. Виноградов, Е.М. Грамузов, В.А. Зуев, Б.П. Ионов, Л.Н. Ногид, Ю.А. Шиманский [1, 2, 4, 5] и др.

Для упрощения предварительных расчетов, связанных с оценкой ходовых качеств ледоколов в сплошных льдах, отечественными и зарубежными учеными были разработаны эмпирические методы, позволяющие на начальных стадиях проектирования оценить влияние основных параметров формы корпуса ледокола на его ледовое сопротивление. Как правило, такие методы отличаются как по структуре составляющих их основу формул, количеству учитываемых параметров формы корпуса судна, так и по достоверности получаемых результатов.

В настоящем исследовании ставится задача сравнения различных методов расчета ледовой ходкости ледоколов в сплошных льдах по числу параметров, учитывающих особенности формы корпуса судна, и по достоверности получаемых с их помощью результатов. Это сравнение, мы полагаем, даст возможность выбрать наиболее точный метод, позволяющий выполнять экспресс-оценки ледовой ходкости на начальных этапах проектирования.

Описание методов расчета ледового сопротивления

Прежде всего нам необходимо сравнить результаты выполненных расчетов с опубликованными данными модельных и натурных испытаний ледоколов «Ермак» [3] и «Москва» [2].

Как правило, методы расчета сопротивления движению ледоколов в сплошных льдах используют ряд допущений, например лед считается сплошным и незаснеженным, без торосов, равной толщины (по всей оцениваемой площади) и обладает одинаковыми физико-механическими свойствами. Кроме того, в большинстве методов расчетный диапазон скоростей движения ледокола в сплошных льдах составляет величину в диапазоне от 0 до 4 уз. Далее мы более подробно рассмотрим методы, выбранные в настоящем исследовании для сравнительного анализа ледовой ходкости ледоколов.

Метод оценки ледового сопротивления, разработанный В.И. Каштеляном [3]:

$$R = B * h * (0,058 * \sigma_p + 5,25 * h * \gamma_l + 0,07B^{0,65}), \quad (1)$$

где B – ширина ледокола, м; h – заданная толщина льда, м; σ_p – предел прочности льда на изгиб, кПа; γ_l – удельный вес льда, кН/м³.

Метод, предложенный Б.П. Ионовым в работах [2, 6] и основанный на результатах натурных испытаний отечественных ледоколов:

$$R = R_1 + R_2 + R_3; \quad (2)$$

$$R_1 = 0,014 * \sigma_p * h^2 * (a_1 * B + f_t * a_2 * L); \quad (3)$$

$$R_2 = 0,013g(\rho - \rho_l)hB[a_1 \sin a_n + f_t a_2 (1 + \cos a_n)] \frac{\tan a_n}{\tan a_n + B/L}; \quad (4)$$

$$R_3 = 1,8 * \rho_l g h B^2 * Fr_B \left(1 + \frac{1}{\cos a_n}\right) * \left(\frac{\tan^2 a_n}{2 * g * a_n - B/L} + f_t\right), \quad (5)$$

где L , B – длина и ширина судна соответственно, м; h – заданная толщина льда, м; σ_p – предел прочности льда на изгиб, кПа; f_t – динамический коэффициент трения льда о судовую сталь и льда о лед (в расчетах принимается 0,08); g – ускорение силы тяжести, м/с²; ρ – плотность морской воды, т/м³; ρ_l – плотность льда, т/м³; a_n – угол носового заострения конструктивной ватерлинии (КВЛ), град.; $Fr_B = \frac{V}{\sqrt{gB}}$ – число Фруда по ширине ледокола; V – скорость судна, м/с.

В рассматриваемом методе коэффициенты, учитывающие форму шпангоутов, определяются по формулам:

$$a_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{0,57}{\sin \beta_i} * (1,6 * \cos \beta_i + 0,11); \quad (6)$$

$$a_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sin \beta_i}, \quad (7)$$

где n – число теоретических шпангоутов; β_i° – угол между касательной к обводу шпангоута и вертикалью, град.

Метод расчета ледового сопротивления, разработанный В.И. Каштеляном, основан на результатах модельных испытаний ледокола «Ермак» [3]:

$$R = 0,04 * B \sigma_p h \mu_0 + 3,6 * \rho_l * B * h^2 * \mu_0 + 0,25 * B^{1,65} * h * V * \eta_2^{-1}, \quad (8)$$

где μ_0, η_2 – условные измерители ледовых качеств, предложенные Ю.А. Шиманским [7].

Метод расчета ледового сопротивления, предложенный зарубежным исследователем К. Riska [10]:

$$R = C_1 + C_2 * V, \quad (9)$$

где коэффициенты C_1 и C_2 определяются по формулам:

$$C_1 = f_1 \frac{1}{\frac{2T}{B} + 1} B L_{pp} h + (1 + 0.021\phi) * (f_2 * B * h^2 + f_3 * L_{нб} * h^2 + f_4 B L_{нб} h), \quad (10)$$

$$C_2 = (1 + 0.63\phi) * (g_1 * h^{1.5} + g_2 * B * h) + g_3 * h * \left(1 + 1.2 * \frac{T}{B}\right) \frac{B^2}{\sqrt{L}}, \quad (11)$$

где L_{pp} – длина между перпендикулярами, м; ϕ – угол наклона форштевня, град; $L_{нб}$ – длина наибольшая; T – осадка судна, м; L – длина расчетная, м; $f_1 \div f_4$ и $g_1 \div g_3$ коэффициенты, численные значения которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения констант $f_1 \div f_4$ и $g_1 \div g_3$

№	Обозначение	Значение	Размерность
1	f_1	0,23	кН/м ³
2	f_2	4,58	кН/м ³
3	f_3	1,47	кН/м ³
4	f_4	0,29	кН/м ³
5	g_1	18,9	кН/(м/с*м ^{1,5})
6	g_2	0,67	кН/(м/с*м ²)
7	g_3	1,55	кН/(м/с*м ^{2,5})

Метод, рассмотренный Г. Линдквистом в работе [8], основан на разделении полного ледового сопротивления на составляющие:

- сопротивление разрушению льда:

$$R_c = F_V \frac{\tan\phi + f_t \frac{\cos\phi}{\cos\psi}}{1 - f_t \frac{\sin\phi}{\cos\psi}}, \quad (12)$$

где $F_V = \frac{1}{2} \sigma_p * h^2$ – сила вертикального давления, необходимая для разрушения льда;

$\psi = \arctan\left(\frac{\tan\phi}{\sin\alpha}\right)$ – коэффициент, учитывающий форму и обводы шпангоутов; ϕ – угол наклона форштевня, град.; α – угол наклона КВЛ, град.

- сопротивление разрушению льда изгибом:

$$R_b = \frac{27}{64} \sigma_p * B * \frac{h^{1.5}}{\sqrt{12(1-\nu^2)*g*\rho_l}} * \frac{\tan\psi + f_t \cos\phi}{\cos\psi \sin\alpha} * \left(1 + \frac{1}{\cos\psi}\right), \quad (13)$$

где E – модуль Юнга, Па; ν – коэффициент Пуассона (в расчетах принят 0.33).

- сопротивление притапливанию льда:

$$R_s = (\rho - \rho_l) * g * h * B * \left(T * \frac{B+T}{B+2T} + k\right), \quad (14)$$

где коэффициент k рассчитывается по формуле:

$$k = f_t \left(0,7L - \frac{T}{\tan \phi} - \frac{B}{4 \cdot \tan \alpha} \right) + T * \cos \phi * \cos \psi * \sqrt{\frac{1}{\sin \phi^2} + \frac{1}{\tan \alpha^2}} \quad (15)$$

В методе Г. Линдквиста предполагается, что все три составляющие ледового сопротивления линейно зависят от скорости движения судна, что позволяет конечную формулу записать в следующем виде:

$$R_i = (R_c + R_b) * \left(1 + 1,4 * \frac{v}{\sqrt{g * h}} \right) + R_s * \left(1 + 9,4 * \frac{v}{\sqrt{gL}} \right). \quad (16)$$

Метод, разработанный В.И. Каштеляном совместно с О.В. Фадеевым [4] (далее Каштелян–Фадеева), является упрощенным, он описывается следующей зависимостью:

$$R_{л} = 5,9 \left[1,0 + 0,4 \left(\frac{L}{B^2} - 1 \right) \right] h^{4/3} B. \quad (17)$$

Метод, предложенный Д.Д. Максutowым [5], основан на использовании формулы

$$R_{ч.л} = B * \frac{h}{\eta_1} (0,2\sigma_p h + 1,58v), \quad (18)$$

где η_1 – условный измеритель ледовых качеств судна, определяемый аналогично измерителю η_2 в формуле (8).

Метод, предложенный зарубежными исследователями в работе [2], исходит из результатов натурных испытаний ледоколов зарубежной постройки. Его основа – результаты регрессионного анализа, представленные в виде следующих зависимостей:

$$R = R_{BR} + R_B + R_C; \quad (19)$$

$$R_{BR} = C_{BR} * \sigma_f^{0,8} * h^{1,5} + B^{0,1} v^{0,4}; \quad (20)$$

$$R_B = C_B * \rho_w * g * h^{1,5} B * L^{0,5}; \quad (21)$$

$$R_C = C_C * \rho_w * g^{0,5} h * B * L^{0,5} * v; \quad (22)$$

$$C_{BR} = 7; C_B = 0,12; C_C = 0,13.$$

Анализ методов расчета ледового сопротивления

Каждый из рассмотренных методов оценки ледовой ходкости ледоколов в сплошных льдах обладает определенными преимуществами и недостатками. Одни методы позволяют выполнить экспресс-оценку ледового сопротивления при минимальном количестве данных по судну, другие позволяют оценить влияние формы корпуса на ледовое сопротивление, но являются более «сложными» в вычислительном плане.

В настоящем исследовании анализ рассмотренных методов расчета ледового сопротивления основан на их сравнении по количеству параметров, позволяющих учитывать особенности формы корпуса ледокола и физико-механические свойства льда.

В качестве критерия оценки принято отклонение расчетного значения ледового сопротивления от значения, полученного в результате натуральных и модельных испытаний, выполненных для ледоколов «Москва» и «Ермак» соответственно. Результаты сравнительного анализа приведены в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение методов расчета ледового сопротивления ледоколов

Метод	Учитываемые параметры		Кол-во параметров
	Судна	Льда	
Каштеляна	$v, B, \alpha, \beta,$	$h, \sigma_f, \rho_{\text{л}}$	7
Каштеляна–Фадеева	L_{pp}, B	h	3
Каштеляна (экспресс-оценка)	B	$h, \sigma_f, \rho_{\text{л}}$	4
Ионова	$v, f_i, B, L_{pp}, \beta, \alpha_0, \alpha$	$h, \sigma_f, \rho_{\text{л}}$	13
Максутова	v, B, α, β	h, σ_f	6
Riska	$v, L_{\text{нб}}, L_{pp}, B, T, \varphi, g_i, f_i$	h	9
Линдквиста	$L_{pp}, B, T, \varphi, \alpha, f_i, v$	$h, \sigma_f, \rho_{\text{л}}, \rho, E, v$	13
Регрессионный метод	L_{pp}, B	h, σ_f, ρ	5

Исходя из анализа данных, приведенных в табл. 2, констатируем: наиболее полно особенности формы корпуса судна и характеристики льда учитываются в методах, предложенных Б.П. Ионовым и Г. Линдквистом.

Адекватность рассмотренных методов определим, сравнив их с данными натуральных и модельных испытаний, проведенных для ледоколов «Москва» и «Ермак» соответственно. Результаты сравнительного анализа для ледокола «Ермак» приведены на рис. 1.

Расчеты выполнялись для толщины льда 0,6 м. Результаты сравнительного анализа показывают, что наиболее точным методом оценки ледовой ходкости применительно к обводам, характерным для ледокола «Ермак», является метод, предложенный В.И. Каштеляном. Результат вполне предсказуемый, так как этот метод разрабатывался на основе модельных испытаний именно этого ледокола (точность методики обеспечивается настроечными коэффициентами). При этом погрешность вычислений на всем диапазоне расчетных скоростей составляет < 10%.

Далее, с учетом выявленных значений погрешностей расчетных методов, следует метод Каштеляна–Фадеева с погрешностью в диапазоне от 25 до 33%. Погрешность метода Г. Линдквиста – от 18 до 43%.

Погрешности остальных рассмотренных в настоящем исследовании методов расчета ледовой ходкости ледоколов в сплошных льдах превышают величину 50%.

Полученные результаты лишь подтверждают тот факт, что погрешность расчетов, выполненных с использованием известных эмпирических зависимостей, может быть достаточно большой, достигая порядка 200% [2].

Объяснение данному факту можно дать следующее. Во-первых, многие методы основаны на результатах модельных и натуральных испытаний конкретных ледоколов. То есть учитывают особенности формы корпуса конкретных судов. При отклонении параметров формы корпуса рассматриваемого судна от параметров корпуса судна, испытанного в ледовом бассейне, очевидно, что результаты будут отличаться. Во-вторых, рассмотренные методы разработаны в различное время: одни пригодны для определения ходкости судов старой постройки, другие – применимы для новых судов. В результате в методах первой и второй группы не учитываются особенности формы корпуса, которые не задаются в рассмотренных методах в явном виде, но оказывают существенное влияние на конечный результат расчетов. В-третьих, при моделировании не всегда удается соблюсти «полное» соответствие модельного льда натурному, что вносит свои коррективы в расчеты. Это и есть основные причины, оказывающие влияние на результаты оценочных расчетов, выполненных с использованием эмпирических методов.

Аналогичным образом на рисунках 2 и 3 представлены результаты сравнительного анализа, выполненного для ледокола «Москва».

Исходя из анализа результатов расчетов, представленных на рисунках 2 и 3, мы убеждаемся: метод, предложенный Б.П. Ионовым, имеет меньшую вычислительную погрешность во всем рассматриваемом диапазоне скоростей $V_s = 0,5 \div 4,0$ уз. и при толщинах льда диапазона $h = 0,9 \div 1,4$ м. Максимальная погрешность равна 17%, а минимальная $\approx 3\%$. Неплохие результаты дают методы В.И. Каштеляна (в зависимости от толщины льда и скорости движения судна погрешность изменяется от 3 до 50%) и методика Д.Д. Максудова, погрешность которой лежит в диапазоне от 2 до 30% (в зависимости от толщины льда и скорости движения судна).

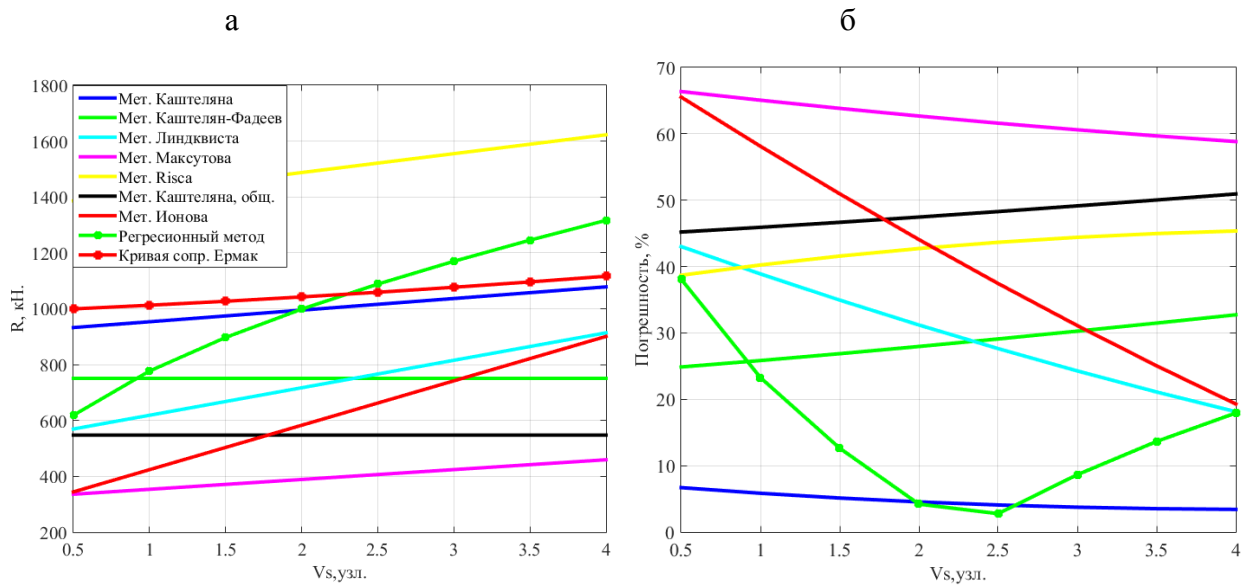


Рис. 1. Сравнение результатов расчетов с модельными данными ледокола «Ермак». а – ледовое сопротивление; б – погрешность относительно модельных данных.

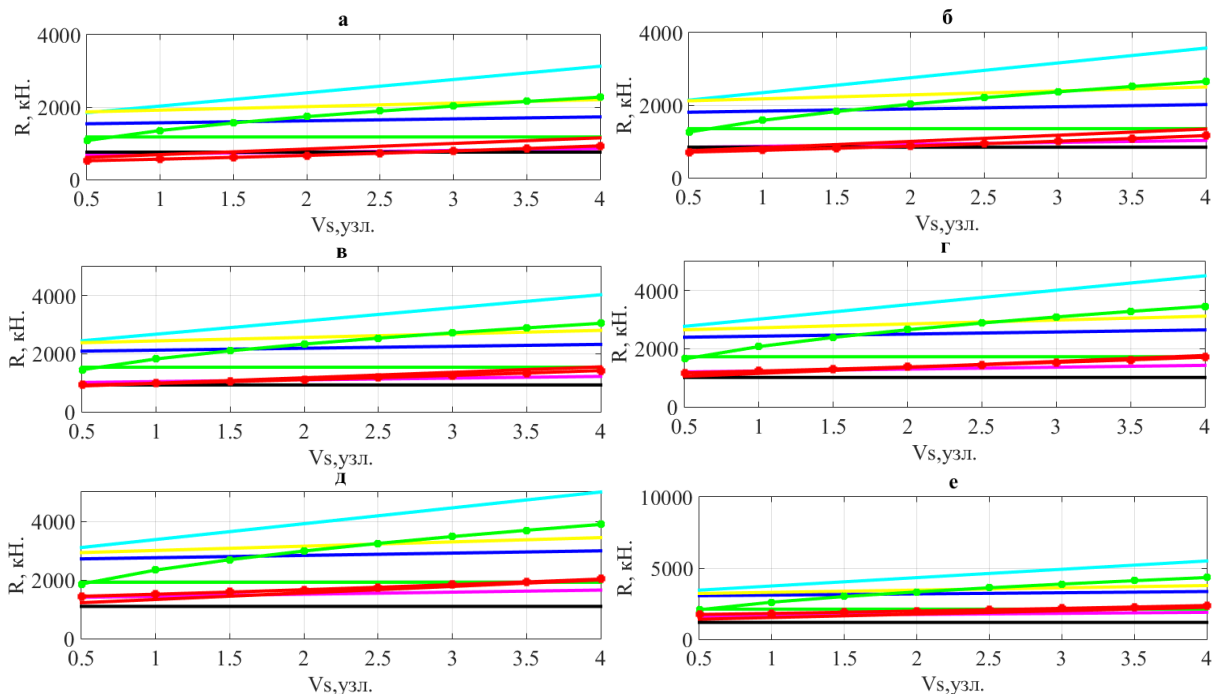


Рис. 2. Зависимость ледового сопротивления ледокола «Москва» от скорости при толщине льда: а – $h = 0,9$ м; б – $h = 1,0$ м; в – $h = 1,1$ м; г – $h = 1,2$ м; д – $h = 1,3$ м; е – $h = 1,4$ м.

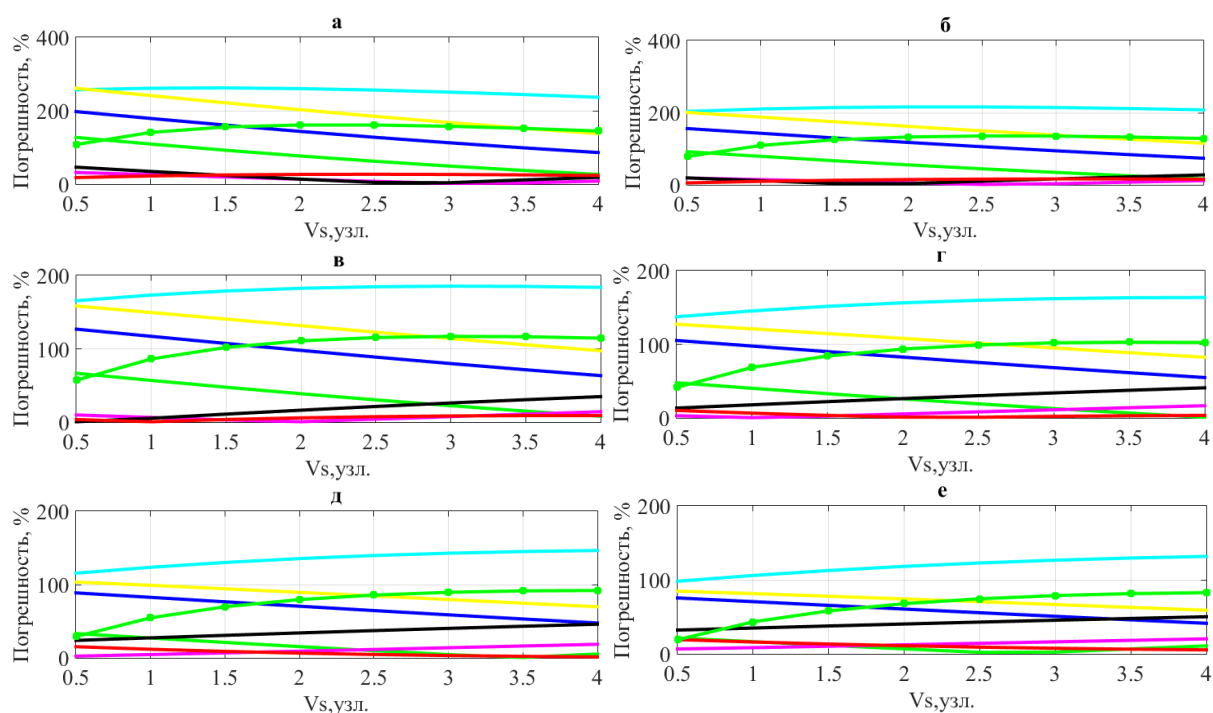


Рис. 3. Зависимость погрешности от скорости ледокола «Москва» при толщине льда: а – $h = 0,9$ м; б – $h = 1,0$ м; в – $h = 1,1$ м; г – $h = 1,2$ м; д – $h = 1,3$ м; е – $h = 1,4$ м;

Заключение

Результаты сравнительного анализа методов расчета ледовой ходкости ледоколов в сплошных льдах позволяют сделать вывод о том, что точность эмпирических методов может изменяться в широких пределах (от 2 до 250%) и зависит от типа и характеристик рассматриваемого судна, скорости его движения и толщины льда.

При проектировании ледоколов и судов ледового плавания использовать эмпирические методы возможно лишь для выполнения предварительных оценок ходовых качеств судна во льдах. Некоторые методы, учитывающие значительное количество параметров, характеризующих форму корпуса судна, позволяют количественно (с определенной точностью) и качественно оценить влияние этих параметров на ледовую ходкость рассматриваемого судна, что крайне важно при выполнении научных поисковых исследований с целью оптимизации формы корпуса. То есть эти методы вполне могут использоваться на начальных этапах проектирования ледоколов. Более точные результаты позволяют получить лишь модельные испытания в ледовом бассейне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бронников А.В. Суда ледового плавания. Особенности проектирования. Л.: Ленинградский Ордена Ленина корабельный институт, 1984. 98 с.
2. Ионов Б.П., Грамузов Е.М., Зуев В.А. Проектирование ледоколов: монография. СПб.: Судостроение, 2013. 512 с.
3. Каштелян В.И., Позняк И.И., Рывлин А.Я. Сопротивление льда движению судна / под ред. В.И. Неганова. Л.: Судостроение, 1968. 239 с.
4. Каштелян В.И., Фадеев О.В., Пол Л.Г. Выбор основных параметров ледокольно-транспортных судов // Судостроение. 1979. Т. 12. С. 4–6.
5. Максутов Д.Д. Сопротивление движению транспортных судов в сплошных льдах // Тр. ААНИИ. 1973. Т. 309. С. 27–34.
6. Справочник по теории корабля: в 3-х т. / под ред. Я.И. Войткунского. Т. 1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители. Л.: Судостроение, 1985. 768 с.
7. Шиманский Ю.А. Условные измерители ледовых качеств судна // Тр. ААНИИ, 1938. Т. 130. С. 5–19.

8. Lindqvist G.A. Straightforward Method for Calculation of Ice Resistance of Ships. 10th Intl Conference, Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, 12–16 June, 1989. Luleaa, Sweden, Proc, vol. 2, p. 722-735.
9. Seong-Rak Cho, Seong-Yeop Jeong, Sungsu Lee, Kook-Jin Kang. Development of a Predication formula for ship resistance in level ice. SME 2014, 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Vol. 10: Polar and Arctic Science and Technology, San Francisco, California, USA, June 8–13, 2014. doi:10.1115/OMAE2014-23681
10. Suyuthi A., Leira B.J., Riska K. Full Scale Measurement on Level Ice Resistance of Icebreaker. Trondheim, Norway, 2011.

[THIS ARTICLE IN ENGLISH SEE NEXT PAGE](#)

Shipbuilding

DOI.org/10.5281/zenodo.807783

Zinevich A., Kitaev M.

ANDREY ZINEVICH, MS Student, e-mail: Andrej-zinevich@yandex.ru
MAKSIM KITAEV, Candidate of Engineering Sciences, Senior Lecturer, Department of Shipbuilding and Ocean Technique, e-mail: kitaev.mv@dvfu.ru
School of Engineering
Far Eastern Federal University
8 Sukhanova St., Vladivostok, Russia, 690091

The comparative analysis of the methods of calculating the icebreaking capability of icebreakers

Abstract: When designing icebreakers and ice ships, the most important is their icebreaking capability which determines the efficiency of each individual vessel. Nowadays, there are many empirical approaches enabling one to carry out a numerical assessment of the performance characteristics of icebreakers in solid ice. Those approaches differ by the amount of parameters of the shape of the vessel's hull and by the reliability of the obtained results. The article presents the results of the comparative analysis of the existing methods of calculating the resistance of the motion of the ship in solid ice. Considered are the empirical methods advanced by V.I. Kashtelyan, D.D. Maksytov, O.V. Fadeev, G. Lindqvist, K. Riska, Ju. I. Voitkunsky, a.o. The authors have compared the result of calculations with the published data of full-scale and simulated tests of the icebreakers *Ermak* and *Moskva*.

Key words: icebreaking capability, icebreaker, resistance to the vessel.

REFERENCES

1. Bronnikov A.V. Ice navigation vessels. Design features. L., Shipbuilding, 1984, 98 p.
2. Ionov B.P., Gramuzov E.M. Ice propulsion ability of vessels. SPb., Shipbuilding, 2013, 512 p.
3. Kashtelyan V.I., Poznyak I.I., Rylvlin A.Ya. Ice resistance to the motion of the vessel. L., Shipbuilding, 1968, 239 p.
4. Kashtelyan V.I., Fadeev O.V., Pol L.G. The choice of the main parameters of icebreaking cargo ships. L., Shipbuilding, 1979(12):4-6.
5. Maksutov D.D. Resistance to the movement of cargo vessels in solid ice. Works AARI. 1973(309):27-34.
6. Voitkunski Y.I. et al. Reference book on ship theory. Vol. 1. Hydromechanics. Vessel resistance. St. Petersburg, Sudostroenie, 1985, 768 p.
7. Shimanski Y.A. Conventional gauges of the ice qualities of a ship. Works AARI. 1938(130):5-19.
8. Lindqvist G.A. Straightforward Method for Calculation of Ice Resistance of Ships. 10th Intl Conference, Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, 12–16 June, 1989. Luleaa, Sweden, Proc, vol. 2, p. 722-735.
9. Seong-Rak Cho, Seong-Yeop Jeong, Sungsu Lee, Kook-Jin Kang. Development of a Predication formula for ship resistance in level ice. SME 2014, 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Vol. 10: Polar and Arctic Science and Technology, San Francisco, California, USA, June 8–13, 2014. doi:10.1115/OMAE2014-23681
10. Suyuthi A., Leira B.J., Riska K. Full Scale Measurement on Level Ice Resistance of Icebreaker. Trondheim, Norway, 2011.