

УДК 629.5.015.2:629.5.022.1
EDN: TJENOX

В.Н. Аносов
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

АНАЛИТИКО-СТАТИСТИЧЕСКИЙ СПОСОБ РАСЧЕТА СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ БЫСТРОХОДНЫХ СУДОВ

Объект и цель научной работы. Объектом являются быстроходные однокорпусные суда. Цель – теоретический расчет остаточного и полного сопротивления быстроходных круглоскулых судов в переходном режиме движения.

Материалы и методы. Используются общие законы механики, теория размерностей, результаты модельных испытаний систематических серий 64, SSPA и NPL, метод наименьших квадратов.

Основные результаты. Получена формула для расчета остаточного и полного сопротивления движению быстроходных круглоскулых судов в широком диапазоне эксплуатационных скоростей. Относительное сопротивление движению выражается через два безразмерных параметра – число Фруда по водоизмещению и коэффициент статической нагрузки судна. Выполнены контрольные расчеты остаточного и полного сопротивления движению модели быстроходного пассажирского судна при трех водоизмещениях. Проведено сопоставление результатов расчетов с результатами модельных испытаний.

Заключение. Полученные результаты могут быть использованы на ранних этапах проектирования быстроходных судов для расчета сопротивления движению и мощности главных двигателей.

Ключевые слова: быстроходные суда, формула, остаточное сопротивление, полное сопротивление движению.
Автор заявляет об отсутствии возможных конфликтов интересов.

UDC 629.5.015.2:629.5.022.1
EDN: TJENOX

V.N. Anosov
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

ANALYTICAL AND STATISTICAL CALCULATION METHOD FOR FAST-CRAFT RESISTANCE

Object and purpose of research. This paper discusses fast monohull vessels. The aim of the research is the theoretical calculation of the residual and total resistance of high-speed round-bilge vessels in transitional mode of movement.

Materials and methods. General laws of mechanics, theory of dimensions, the results of model tests of the systematic series 64, SSPA and NPL, and the least squares method were used.

Main results. Calculation formula has been obtained for residual and total resistance of fast round-bilge vessels in a wide range of operational speeds. Resistance of the vessel is presented in a relative form, as two dimensionless parameters: displacement-Froude number and static load coefficient. Control calculations of residual and total resistance of fast passenger vessel model at three drafts were performed. Their results were compared with model test data.

Conclusion. The results of this study could be used at early design stages fast vessels to calculate their resistance and power demand.

Keywords: fast vessels, formula, residual resistance, total resistance to movement.
The author declares no conflicts of interest.

Для цитирования: Аносов В.Н. Аналитико-статистический способ расчета сопротивления движению быстроходных судов. Труды Крыловского государственного научного центра. 2024; 3(409): 59–65.

For citations: Anosov V.N. Analytical and statistical calculation method for fast-craft resistance. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2024; 3(409): 59–65 (in Russian).

Введение

Introduction

При расчете сопротивления движению быстроходного однокорпусного судна полагают, что сопротивление голого корпуса R_T можно представить в виде двух независимых составляющих: сопротивление трения R_F и остаточного сопротивления R_R . Сопротивление трения вычисляют как силу трения плоской эквивалентной пластины при обтекании турбулентным потоком воды. Остаточное сопротивление определяют на основе результатов испытаний модели судна в опытовом бассейне [1].

На ранних стадиях проектирования судна для определения сопротивления движению в ряде случаев используют результаты модельных испытаний систематических серий быстроходных судов. В работе [2] приведены диаграммы для определения остаточного сопротивления моделей шести систематических серий быстроходных круглоскулых судов. На этих диаграммах относительное остаточное сопротивление судна R_R/Δ (Δ – весовое водоизмещение судна) представлено в виде нелинейных зависимостей от относительной длины $\psi = L/\sqrt[3]{\nabla}$ (L – длина судна по ватерлинии, ∇ – объемное водоизмещение судна) при различных числах Фруда по водоизмещению $Fn_{\nabla} = v/\sqrt{g \cdot \sqrt[3]{\nabla}}$ (v – скорость судна, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения).

В работах [3, 4] показано, что результаты испытаний моделей систематических серий 64, NPL и SSPA при незначительных ограничениях могут быть представлены в виде единой обобщенной диаграммы, которая представляет собой совокупность линейных зависимостей относительного остаточного сопротивления R_R/Δ от параметра $\sqrt[3]{\nabla}/L$. Коэффициенты линейных функций зависят от числа Фруда по водоизмещению Fn_{∇} .

Параметр $\sqrt[3]{\nabla}/L$ и относительная длина $\psi = L/\sqrt[3]{\nabla}$ являются разными формами представления одного из основных параметров, характеризующих ходовые качества быстроходных судов, – коэффициента статической нагрузки

$$C_{\nabla} = \frac{\nabla}{L^3}. \quad (1)$$

Связь между этими величинами имеет вид

$$\sqrt[3]{\nabla}/L = \sqrt[3]{C_{\nabla}}, \quad \psi = 1/\sqrt[3]{C_{\nabla}}. \quad (2)$$

Таким образом, результаты модельных испытаний систематических серий круглоскулых быстроходных судов показывают, что относительное остаточное сопротивление быстроходного судна зависит главным образом от числа Фруда Fn_{∇} и коэффициента статической нагрузки C_{∇} . Влияние всех других параметров на остаточное сопротивление быстроходного судна незначительно.

В работах [3, 4] получена формула для относительного остаточного сопротивления R_R/Δ быстроходного судна в виде

$$\frac{R_R}{\Delta} = (f_v Fn_{\nabla}^2 + f_h) \frac{\sqrt[3]{\nabla}}{L}. \quad (3)$$

Здесь f_v и f_h – неизвестные функции, которые могут быть определены по результатам модельных испытаний.

Формула (3) получена из условия равенства работы сил сопротивления изменению кинетической и потенциальной энергии при движении судна в несжимаемой жидкости. В данной работе рассмотрен способ определения функций f_v и f_h , входящих в формулу (3), на основе результатов испытаний моделей систематических серий 64, NPL и SSPA. Для примера выполнен расчет остаточного и полного сопротивления модели быстроходного пассажирского судна при различных значениях коэффициента статической нагрузки и проведено сопоставление полученных результатов с результатами испытаний этой модели в опытовом бассейне.

Расчет остаточного сопротивления быстроходного круглоскулого судна

Calculation of residual resistance of a fast round-bilged vessel

Формулу (3) можно переписать в следующем виде

$$\frac{R_R \cdot L}{\Delta \cdot \sqrt[3]{\nabla}} = f_v Fn_{\nabla}^2 + f_h. \quad (4)$$

Для быстроходных круглоскулых судов зависимость

$$\frac{R_R \cdot L}{\Delta \cdot \sqrt[3]{\nabla}} \equiv W_R \quad (5)$$

от числа Фруда Fn_{∇} при различных значениях коэффициента статической нагрузки C_{∇} может быть построена с помощью обобщенной диаграммы остаточного сопротивления [3, 4]. Эта диаграмма является статистическим обобщением основных законо-

мерностей изменения остаточного сопротивления быстроходных круглоскулых судов.

Характер зависимости функции W_R от Fn_{∇}^2 при пяти значениях коэффициента статической нагрузки в диапазоне от $C_{\nabla} = 1,95 \cdot 10^{-3}$ до $C_{\nabla} = 4,66 \cdot 10^{-3}$ показан на рис. 1. Этот диапазон изменения C_{∇} характерен для пассажирских быстроходных однокорпусных судов, многофункциональных судов снабжения (суда типа OSV) и отчасти для быстроходных однокорпусных автомобильно-пассажирских паромов [4, 5].

На рис. 1 изменение функции W_R в диапазоне от $Fn_{\nabla} = 1,0$ до $Fn_{\nabla} = 2,8$ показано сплошной линией. Анализ характеристик коммерческих быстроходных судов показывает, что они, как правило, эксплуатируются в диапазоне относительных скоростей $1,5 \leq Fn_{\nabla} \leq 2,5$ [4, 5]. Как видно из рис. 1, в этом диапазоне характер изменения функции W_R от Fn_{∇}^2 близок к линейным зависимостям. Коэффициенты f_v и f_h , входящие в выражение (4), могут быть определены методом наименьших квадратов по данным, которые иллюстрирует рис. 1.

Расчеты показали, что при различных коэффициентах статической нагрузки C_{∇} значения f_v близки между собой и их средняя величина равна $f_v = 0,0319$.

Величина f_h зависит от коэффициента статической нагрузки. Эта зависимость показана на рис. 2 сплошной линией. Линейная аппроксимация этой зависимости на рис. 2 показана пунктиром. Ее уравнение имеет вид

$$f_h = 2,203 \frac{\sqrt[3]{\nabla}}{L} - 0,0921 = 2,203 \cdot \sqrt[3]{C_{\nabla}} - 0,0921. \quad (6)$$

Таким образом, формулу (4) можно представить в виде

$$\begin{aligned} \frac{R_R \cdot L}{\Delta \cdot \sqrt[3]{\nabla}} &= 0,0319 Fn_{\nabla}^2 + 2,203 \frac{\sqrt[3]{\nabla}}{L} - 0,0921 = \\ &= 0,0319 Fn_{\nabla}^2 + 2,203 \cdot \sqrt[3]{C_{\nabla}} - 0,0921. \end{aligned} \quad (7)$$

При различных значениях C_{∇} эти зависимости показаны на рис. 1 прямыми пунктирными линиями в диапазоне чисел Фруда от $Fn_{\nabla} = 1,4$ до $Fn_{\nabla} = 2,8$.

Из выражения (7) можно получить формулу для определения относительного остаточного сопротивления быстроходного круглоскулого судна

$$\frac{R_R}{\Delta} = \left(0,0319 Fn_{\nabla}^2 + 2,203 \frac{\sqrt[3]{\nabla}}{L} - 0,0921 \right) \cdot \frac{\sqrt[3]{\nabla}}{L}. \quad (8)$$

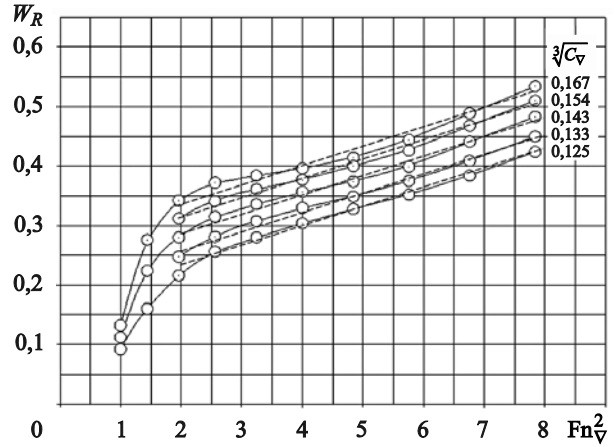


Рис. 1. Зависимость функции W_R от Fn_{∇}^2 для быстроходных круглоскулых судов

Fig. 1. $W_R (Fn_{\nabla}^2)$ function for fast round-bilge vessels

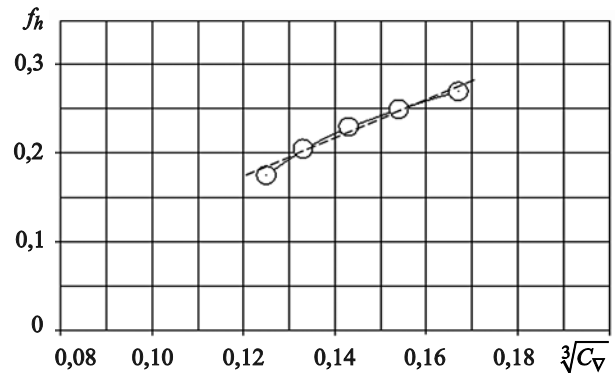


Рис. 2. Зависимость функции f_h от коэффициента статической нагрузки для быстроходных круглоскулых судов

Fig. 2. Parameter f_h as function of static load coefficient for fast round-bilge vessels

Или, используя коэффициент статической нагрузки C_{∇} , эту формулу можно записать

$$\frac{R_R}{\Delta} = \left(0,0319 Fn_{\nabla}^2 + 2,203 \cdot \sqrt[3]{C_{\nabla}} - 0,0921 \right) \cdot \sqrt[3]{C_{\nabla}}. \quad (9)$$

Расчет сопротивления трения быстроходного судна

Friction resistance calculation for fast vessel

Расчет сопротивления трения R_F быстроходного судна выполняют по известной формуле [1]

$$R_F = C_F \frac{\rho \cdot v^2}{2} S, \quad (10)$$

где S – смоченная поверхность судна; ρ – плотность воды; v – скорость судна; $C_F = C_{F0} + C_A$ – коэффициент трения.

Коэффициент трения эквивалентной плоской пластины C_{F0} вычисляют по формуле Прандтля – Шлихтинга или по формуле ИТТС 1957 г. [1]. Корреляционный коэффициент C_A , который также называют надбавкой на шероховатость, учитывает ряд факторов. Прежде всего это разница между гидравлической гладкой поверхностью буксируемой модели и шероховатой поверхностью реального судна.

Кроме того, могут быть и другие причины, которые не моделируются при буксировочных испытаниях моделей. Величину коэффициента C_A выбирают так, чтобы результаты пересчета результатов модельных испытаний наилучшим образом совпадали с результатами испытаний натуральных судов. Для буксируемых моделей судов, как правило, принимают $C_A = 0$.

Сопротивление трения судна можно также представить в безразмерном виде

$$\frac{R_F}{\Delta} = 0,5C_F Fn_V^2 \frac{S}{\sqrt{2/3}}. \quad (11)$$

Относительная смоченная поверхность $S/\sqrt{2/3}$ может быть выражена через коэффициент смоченной поверхности

$$k_{LV} = \frac{S}{\sqrt{V} \cdot L}. \quad (12)$$

Связь между этими величинами имеет вид [2]

$$\frac{S}{\sqrt{2/3}} = \sqrt{\frac{L}{V^{1/3}}} k_{LV}. \quad (13)$$

Поэтому формулу (11) можно записать в виде

$$\frac{R_F}{\Delta} = 0,5C_F Fn_V^2 \cdot k_{LV} \cdot \sqrt{\frac{L}{V^{1/3}}}. \quad (14)$$

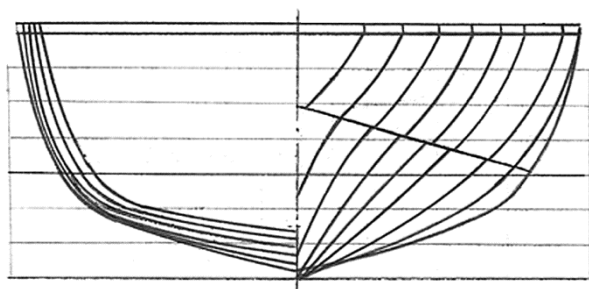


Рис. 3. Форма корпуса буксируемой модели быстроходного пассажирского судна

Fig. 3. Hull shape of towed fast passenger vessel model

Относительное сопротивление трения можно также выразить через коэффициент статической нагрузки C_V

$$\frac{R_F}{\Delta} = 0,5C_F Fn_V^2 \cdot k_{LV} \cdot \frac{1}{C_V^{1/6}}. \quad (15)$$

Относительная смоченная поверхность $S/\sqrt{2/3}$ и коэффициент k_{LV} зависят от отношения ширины судна к осадке B/T . Для приближенной оценки этих величин в работах [2–4, 6] приведен ряд формул.

Расчет сопротивления движению быстроходного круглобильного судна. Сопоставление результатов расчета с экспериментом

Calculation of resistance of fast round-bilge vessel. Calculation results vs experimental data

Полное сопротивление движению голого корпуса судна R_T равно сумме сопротивления трения R_F и остаточного сопротивления R_R . В ряде случаев при анализе и сопоставлении характеристик быстроходных судов удобнее использовать величину относительного сопротивления

$$\frac{R_T}{\Delta} = \frac{R_R}{\Delta} + \frac{R_F}{\Delta}. \quad (16)$$

Относительное остаточное сопротивление круглобильного быстроходного судна в диапазоне эксплуатационных скоростей можно вычислить по формуле (8) или (9), относительное сопротивление трения – по формулам (14) или (15).

Таким образом, полное относительное сопротивление голого корпуса быстроходного круглобильного судна можно представить в виде

$$\frac{R_T}{\Delta} = \left(0,0319Fn_V^2 + 2,203 \frac{\sqrt[3]{V}}{L} - 0,0921 \right) \cdot \frac{\sqrt[3]{V}}{L} + 0,5C_F Fn_V^2 \cdot k_{LV} \cdot \sqrt{\frac{L}{V^{1/3}}} \quad (17)$$

или

$$\frac{R_T}{\Delta} = \left(0,0319Fn_V^2 + 2,203 \cdot \sqrt[3]{C_V} - 0,0921 \right) \cdot \sqrt[3]{C_V} + 0,5C_F Fn_V^2 \cdot k_{LV} \cdot \frac{1}{C_V^{1/6}}. \quad (18)$$

Для оценки практической пригодности полученных выше результатов были выполнены расче-

Таблица 1. Характеристики буксируемой модели

Table 1. Characteristics of the towed model

| № | Вес модели Δ , кгс | Длина по ватерлинии L , м | Смоченная поверхность S , м ² | Коэффициент статической нагрузки $C_V \cdot 10^3$ |
|---|---------------------------|-----------------------------|--|---|
| 1 | 572,5 | 5,379 | 5,214 | 3,68 |
| 2 | 490,7 | 5,344 | 4,944 | 3,22 |
| 3 | 409,7 | 5,306 | 4,680 | 2,74 |

ты остаточного и полного сопротивления модели быстроходного пассажирского судна. Форма корпуса модели показана на рис. 3, основные характеристики модели приведены в табл. 1. Результаты расчетов сопоставлены с результатами буксировочных испытаний модели.

Результаты расчетов остаточного и полного сопротивления, а также результаты буксировочных испытаний модели приведены на рис. 4–6.

Расчеты относительного сопротивления модели R_T/Δ выполнены по формуле (18). Коэффициенты смоченной поверхности k_{LV} (формула (12)) вычислены по фактическим величинам ∇ , L и S модели.

Сопоставление результатов расчетов с результатами модельных испытаний показывает, что в диапазоне эксплуатационных скоростей ($Fn_V \cong 1,5-2,5$) расчетные значения остаточного сопротивления $(R_R/\Delta)_p$ и полного сопротивления $(R_T/\Delta)_p$ близки к соответствующим экспериментальным величинам $(R_R/\Delta)_э$ и $(R_T/\Delta)_э$. Точность расчетов можно оценить величиной относительной погрешности определения остаточного сопротивления

$$\delta_R = \frac{(R_R/\Delta)_э - (R_R/\Delta)_p}{(R_R/\Delta)_э} \quad (19)$$

и полного сопротивления

$$\delta_T = \frac{(R_T/\Delta)_э - (R_T/\Delta)_p}{(R_T/\Delta)_э} \quad (20)$$

Значения этих величин для середины рассматриваемого скоростного диапазона ($Fn_V \approx 2,0$) приведены в табл. 2. Такие величины погрешностей при определении сопротивления движению и требуемой мощности судна допустимы на ранних стадиях проектирования [7].

Можно отметить, что при водоизмещении модели $\Delta = 409,7$ кгс выполнен дополнительный расчет коэффициента смоченной поверхности k_{LV} по приближенной формуле [3, 4]

$$k_{LV} = 2,42 + 0,0135 \left(\frac{B}{T} \right) + 0,0247 \left(\frac{B}{T} \right)^2 \quad (21)$$

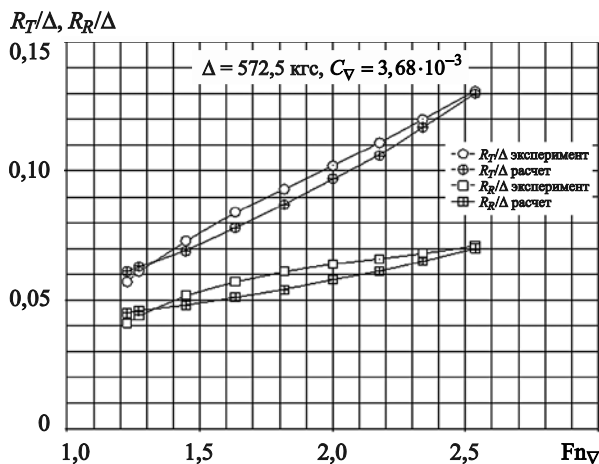


Рис. 4. Сопоставление результатов расчета остаточного и полного сопротивления модели с экспериментом ($C_V = 3,68 \cdot 10^{-3}$)

Fig. 4. Calculation results vs experimental data (residual and total resistance), $C_V = 3,68 \cdot 10^{-3}$

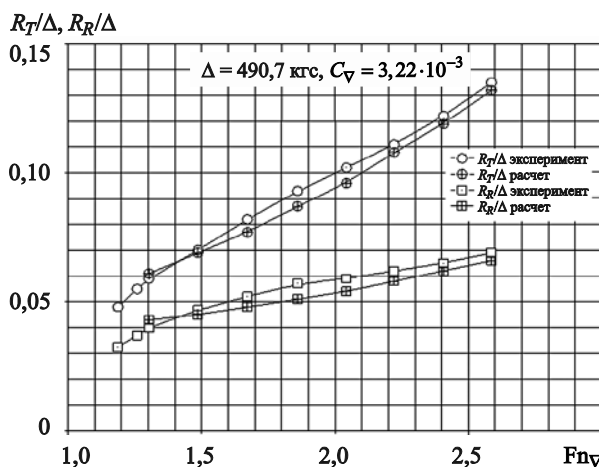


Рис. 5. Сопоставление результатов расчета остаточного и полного сопротивления модели с экспериментом ($C_V = 3,22 \cdot 10^{-3}$)

Fig. 5. Calculation results vs experimental data (residual and total resistance), $C_V = 3,22 \cdot 10^{-3}$

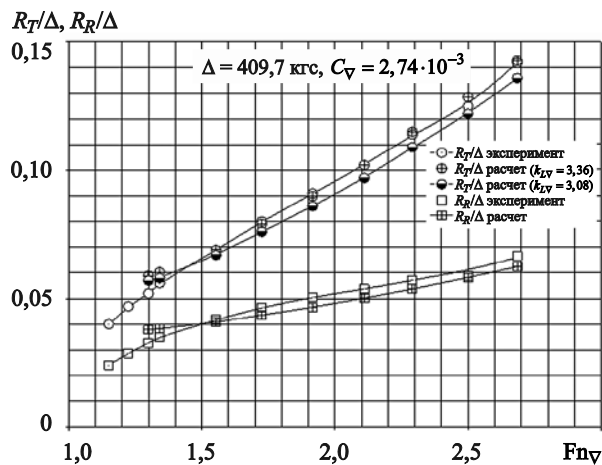


Рис. 6. Сопоставление результатов расчета остаточного и полного сопротивления модели с экспериментом ($C_V = 2,74 \cdot 10^{-3}$)

Fig. 6. Calculation results vs experimental data (residual and total resistance), $C_V = 2,74 \cdot 10^{-3}$

Таблица 2. Относительная погрешность расчета остаточного и полного сопротивления движению модели быстроходного судна

Table 2. Relative calculation error for residual and total resistance of fast vessel model

| № | Вес модели, кгс Число Фруда F_{nV} | $\delta_R, \%$ | $\delta_T, \%$ |
|---|---|----------------|----------------|
| 1 | 572,5 2,0 | 9,4 | 4,9 |
| 2 | 490,7 2,04 | 8,5 | 5,9 |
| 3 | 409,7 2,11 | 6,5 | 4,9 |

Величина $B/T = 5,9$ принята равной среднему значению для быстроходных пассажирских паромов [4]. В этом случае $k_{LV} = 3,36$. Результаты расчета полного сопротивления также показаны на рис. 6. Можно видеть, что в этом случае расчетное значение полного сопротивления движению модели практически совпало с результатами модельных испытаний.

Заключение

Conclusion

Формула (3), которая легла в основу приведенного выше расчета сопротивления движению быстро-

ходных круглоскулых судов, получена аналитическим способом с помощью общих законов механики и теории размерностей [3, 4].

Для определения входящих в формулу неизвестных функций f_v и f_h использованы результаты испытаний моделей систематических серий 64, NPL и SSPA. При этом выявлены статистические закономерности изменения остаточного сопротивления в зависимости от числа Фруда F_{nV} и коэффициента статической нагрузки C_V , а также определена область, где эти закономерности могут быть аппроксимированными простейшими линейными функциями.

Эту область можно обозначить следующими границами:

- по числу Фруда – $1,4 \leq F_{nV} \leq 2,8$;
- по коэффициенту статической нагрузки – $1,95 \leq C_V \cdot 10^3 \leq 4,63$.

Статистический анализ характеристик натуральных судов показывает, что в пределах этой области эксплуатируется большинство быстроходных коммерческих судов [4, 5]. Для судов, которые по своим характеристикам выходят за эти пределы (например, для более «тяжелых» катеров и судов военного назначения), вид приведенных выше формул должен быть уточнен. Для этого необходимо использовать дополнительные данные по сопротивлению буксируемых моделей. Возможно, также возникнет необходимость использовать аппроксимации более высокого порядка.

Выполненные оценки погрешностей расчета сопротивления движению показывают, что приведенные формулы могут быть использованы на ранних этапах проектирования быстроходных круглоскулых судов при условии, что характеристики этих судов укладываются в обозначенные границы.

Список использованной литературы

1. *Войткунский Я.И.* Сопротивление движению судов. 2-е изд., перераб. и доп. Ленинград : Судостроение, 1988. 286, [1] с.
2. *Oossanen P. van.* Resistance prediction of small high-speed displacement vessels: state of the art // International Shipbuilding Progress. 1980. Vol. 27, № 313. P. 212–224. DOI: 10.3233/ISP-1980-2731301.
3. *Аносов В.Н.* Особенности движения и сопротивление быстроходных круглоскулых судов // Труды Крыловского государственного научного центра. 2023. Вып. 4(406). С. 49–58.
4. *Аносов В.Н.* Теория и методы проектирования быстроходных однокорпусных судов. Санкт-Петербург : Крыловский государственный научный центр, 2023. 124 с.

5. *Аносов В.Н.* Быстроходные суда в конце XX столетия. Санкт-Петербург : Политехника, 2002, 172 с.
6. *Fung S.C.* Resistance prediction and parametric studies for high-speed displacement hulls // *Naval Engineers Journal*. 1987. Vol. 99, No. 2. P. 64–80. DOI: 10.1111/j.1559-3584.1987.tb02100.x.
7. *Heather R.G.* Some preliminary design considerations for fast displacement ships and planning craft // *Design techniques for advanced marine vehicles and high speed displacement ships : Thirteenth Graduate School*. Delft : Delft University of Technology, 1989. Pag. var., 44 p. (13th WEGEMT Graduate School ; Lecture 4).
5. *Anosov V.N.* High-speed ships at the end of XX century. St. Petersburg : Polytechnika. 2002. 172 (*in Russian*).
6. *Fung S.C.* Resistance prediction and parametric studies for high-speed displacement hulls // *Naval Engineers Journal*. 1987. Vol. 99, No. 2. P. 64–80. DOI: 10.1111/j.1559-3584.1987.tb02100.x.
7. *Heather R.G.* Some preliminary design considerations for fast displacement ships and planning craft // *Design techniques for advanced marine vehicles and high speed displacement ships : Thirteenth Graduate School*. Delft : Delft University of Technology, 1989. Pag. var., 44 p. (13th WEGEMT Graduate School ; Lecture 4).

References

1. *Voitkumsky Ya.I.* Ship resistance. 2nd edition, rev. and enl. Leningrad : Sudostroyeniye, 1988. 286 p. (*in Russian*).
2. *Oossanen P. van.* Resistance prediction of small high-speed displacement vessels: state of the art // *International Shipbuilding Progress*. 1980. Vol. 27, № 313. P. 212–224. DOI: 10.3233/ISP-1980-2731301.
3. *Anosov V.N.* Motion and resistance of high-speed round bilge ships // *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2023. Vol. 4(406). P. 49–58.
4. *Anosov V.N.* Theory and methods of fast monohull vessel design. St. Petersburg : Krylov State Research Centre, 2023. 124 p. (*in Russian*).

Сведения об авторе

Аносов Виктор Николаевич, к.т.н., ведущий научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. E-mail: avnkr@mail.ru.

About the author

Viktor N. Anosov, Cand. Sci. (Eng.), Lead Researcher, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. E-mail: avnkr@mail.ru.

Поступила / Received: 20.02.24
Принята в печать / Accepted: 22.08.24
© Аносов В.Н., 2024