

УДК 629.5.015.2:629.5.022.1  
EDN: HNEVVM

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

## ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ И СОПРОТИВЛЕНИЕ БЫСТРОХОДНЫХ КРУГЛОСКУЛЫХ СУДОВ

**Объект и цель научной работы.** Объектом исследования являются быстроходные однокорпусные суда. Цель работы – теоретическое обоснование и обобщение результатов модельных испытаний систематических серий круглоскулых судов, построение обобщенной диаграммы для определения остаточного сопротивления и расчет полного сопротивления быстроходных круглоскулых судов.

**Материалы и методы.** Выполнен анализ результатов модельных испытаний систематических серий 64, SSPA и NPL. При анализе использованы законы сохранения энергии, методы теории подобия и размерностей. Для построения обобщенной диаграммы остаточного сопротивления использован метод наименьших квадратов.

**Основные результаты.** На основе анализа результатов буксировочных испытаний моделей систематических серий 64, SSPA и NPL установлено, что в переходном режиме движения остаточное сопротивление быстроходных круглоскулых судов в практическом диапазоне изменений параметров корпуса не зависит от формы корпуса. Величина остаточного сопротивления зависит, главным образом, от скорости движения, водоизмещения и длины судна по ватерлинии. Влияние всех других параметров незначительно. Относительное остаточное сопротивление круглоскулых судов с разной формой корпуса может быть представлено в виде единой обобщенной диаграммы, которая представляет собой совокупность линейных функций.

**Заключение.** Приведенные материалы могут быть использованы на ранних этапах проектирования быстроходных судов при выборе характеристик корпуса, расчета сопротивления движению и мощности главных двигателей.

**Ключевые слова:** быстроходные суда переходного режима движения, круглоскулая форма корпуса, обобщенная диаграмма остаточного сопротивления.

*Автор заявляет об отсутствии возможных конфликтов интересов.*

UDC 629.5.015.2:629.5.022.1  
EDN: HNEVVM

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

## MOTION AND RESISTANCE OF HIGH-SPEED ROUND BILGE SHIPS

**Object and purpose of research.** The object of research is high-speed monohulls. The purpose is theoretical substantiation and generalization of test results for a systematic series of round bilge ship models, plotting of generalized diagram for determination of residual resistance, and calculation of total resistance of high-speed round bilge ships.

**Materials and methods.** Analysis of test data obtained for model series 64, SSPA, and NPL is performed using the energy conservation laws, theory of similarity and scaling methods. The generalized diagram of residual resistance is plotted using the least square method.

**Main results.** Based on the analysis of test data obtained from towing tests of systematic series of models 64, SSPA, and NPL it is established that in the transient mode of operation the residual resistance of high-speed round bilge ships is independent of the hullform in a practical range of parametric variations. The residual resistance primarily depends on the ship speed,

*Для цитирования:* Аносов В.Н. Особенности движения и сопротивление быстроходных круглоскулых судов. Труды Крыловского государственного научного центра. 2023; 4(406): 49–58.

*For citations:* Anosov V.N. Motion and resistance of high-speed round bilge ships. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2023; 4(406): 49–58 (in Russian).

displacement and waterline length. The influence of other parameters is negligible. Relative residual resistance of round bilge ships with different hullforms can be presented as a general diagram containing a set of linear functions.

**Conclusion.** These data can be used in early design phase of high-speed ships for selection of the hull characteristics, resistance calculations and main engine power estimates.

**Keywords:** high-speed ships in transient modes, round bilge hullform, general diagram of residual resistance.

*The author declares no conflicts of interest.*

## Введение

### Introduction

Быстроходные однокорпусные суда находят широкое применение в современной морской практике: скоростные перевозки пассажиров и автомобилей, обеспечение работы морских объектов и т.п. Как правило, такие суда эксплуатируются в скоростном диапазоне, промежуточном между режимом плавания и глиссированием, – т.н. переходном режиме. Этот диапазон можно определить, используя понятие относительной скорости или число Фруда по водоизмещению

$$Fn_{\nabla} = \frac{v}{\sqrt{g \cdot \sqrt[3]{\nabla}}}, \quad (1)$$

где  $v$  – скорость, м/с;  $\nabla$  – объемное водоизмещение судна, м<sup>3</sup>;  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup> – ускорение свободного падения.

Условно принято считать, что переходному режиму движения соответствует диапазон чисел Фруда по водоизмещению от  $Fn_{\nabla} = 1$  до  $Fn_{\nabla} = 3$ .

На начальных этапах проектирования расчет сопротивления движению судна и определение тре-

буемой мощности могут быть сделаны на основе результатов буксировочных испытаний моделей систематических серий. Результаты испытаний 6 наиболее известных зарубежных систематических серий моделей круглоскулых судов приведены в работе [1].

Все результаты представлены в виде зависимостей относительного остаточного сопротивления  $R_R/\Delta$  ( $\Delta = \rho g \nabla$  – весовое водоизмещение модели) от относительной длины  $\psi = L/\sqrt[3]{\nabla}$  ( $L$  – длина судна по ватерлинии) при различных числах Фруда по водоизмещению. При этом полагают, что остаточное сопротивление модели  $R_R$  зависит только от числа Фруда. Его вычисляют как разность между полным сопротивлением модели  $R_T$  и сопротивлением трения плоской эквивалентной пластины  $R_F$ , которое зависит только от числа Рейнольдса, т.е.

$$R_R = R_T - R_F. \quad (2)$$

Основные особенности определения составляющих сопротивления при модельных испытаниях подробно рассмотрены в работах [1, 2].

Анализ характеристик моделей, результаты испытаний которых представлены в работе [1],

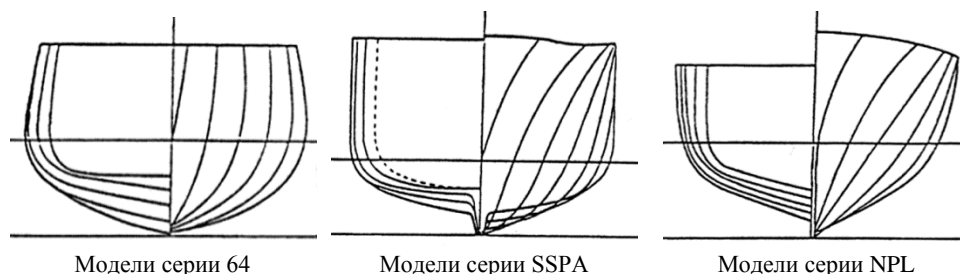
**Таблица 1.** Характеристики моделей круглоскулых судов

**Table 1.** Characteristics of round bilge ship models

	Серия 64	Серия NPL					Серия SSPA
Число моделей	27	5	6	4	4	3	9
Длина моделей по ватерлинии, м	3,05	2,54	2,54	2,54	2,54	2,54	3,29–4,42
$L/\sqrt[3]{\nabla}$	8,0–12,6	4,4–6,6	4,4–7,2	5,1–7,2	5,6–8,4	6,4–8,4	6,0–8,0
Удлинение $L/B$	8,45–18,26	3,33	4,55	5,41	6,25	7,50	4,62–8,21
Отношение ширины к осадке $B/T$	2,0–4,0	3,19–10,21	1,72–6,87	1,94–4,86	1,93–5,80	2,01–4,02	3,0–4,0
Коэффициент общей полноты $C_B$	0,35–0,55	0,397	0,397	0,397	0,397	0,397	0,4
Призматический коэффициент $C_p$	0,63	0,693	0,693	0,693	0,693	0,693	0,68
$k_{LV} = S/\sqrt{\nabla L}$	2,6–3,0	2,8–3,9	2,6–3,3	2,6–3,0	2,6–3,3	2,7–3,2	2,9–3,0

**Рис. 1.** Форма корпуса моделей серий 64, SSPA и NPL

**Fig. 1.** Hullform of model series 64, SSPA and NPL



показывает, что их целесообразно разделить на две группы в соответствии с их размерами. К первой группе можно отнести модели серий Нордстрема, Де Гроота и серии 63. Эти модели имели малую длину по ватерлинии (0,91–1,22 м) и соответственно малый вес. Ко второй группе отнесены модели серий SSPA, NPL и 64. Длина моделей этой группы лежит в диапазоне 2,54–4,42 м. Их характеристики приведены в табл. 1, форма обводов показана на рис. 1.

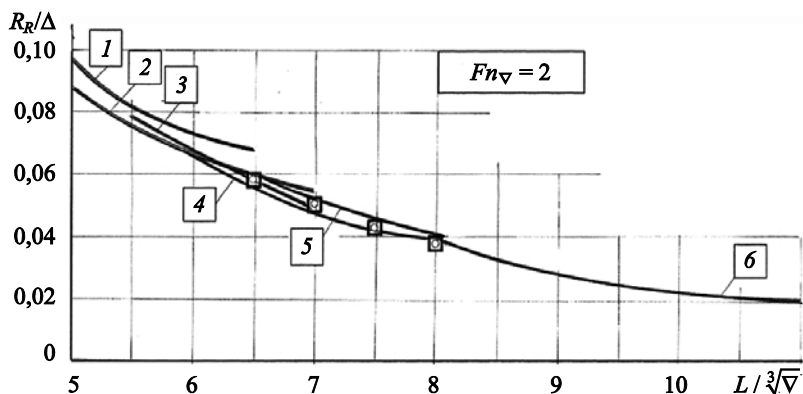
В работе [3] на основе анализа результатов модельных испытаний систематических серий SSPA, NPL и серии 64 отмечено, что при некоторых весьма малых ограничениях все данные по величине остаточного сопротивления этих моделей могут быть представлены в виде единой обобщенной диаграммы. Для примера, на рис. 2 для моделей разных серий приведены зависимости относительного остаточного сопротивления  $R_R/\Delta$  от относительной длины  $L/\sqrt[3]{V}$  при числе Фруда  $Fn_V = 2$ . Моделям серии NPL соответствуют кривые: № 1 ( $L/B = 3,3$ ), № 2 ( $L/B = 4,5$ ), № 3 ( $L/B = 5,41$ ), № 4 ( $L/B = 6,25$ ), № 5 ( $L/B = 7,5$ ). Кривая № 6 соответствует моделям серии 64 ( $L/B = 8,45$ – $18,3$ ). Точки, соответствующие

результатам испытаний моделей серии SSPA, обозначены значком □.

Можно видеть, что за исключением кривой № 1 результаты испытаний всех других моделей могут быть описаны единой кривой. Кривая № 1 соответствует моделям серии NPL с удлинением  $L/B = 3,3$ . Такое значение удлинения нехарактерно для подавляющего большинства быстроходных судов переходного режима движения [4]. Поэтому здесь эти результаты исключены из рассмотрения. Подобная ситуация имеет место и при других числах Фруда. Это обстоятельство позволяет представить результаты испытаний 53 моделей серий 64, SSPA и NPL (за исключением 5 моделей с удлинением  $L/B = 3,3$ ) с разной формой корпуса в виде единой обобщенной диаграммы для определения остаточного сопротивления круглоскулых судов.

В данной работе рассмотрено теоретическое обоснование для такого обобщения и приведена единая диаграмма для определения остаточного сопротивления круглоскулых быстроходных судов. Использование полученных результатов показано на примере расчета полного сопротивления движению реального быстроходного судна.

**Fig. 2.** Relative residual resistance  $R_R/\Delta$  versus relative length  $L/\sqrt[3]{V}$  at Froude number  $Fn_V = 2$  for models of different series. NPL series: curve No. 1 –  $L/B = 3,3$ , No. 2 –  $L/B = 4,5$ , No. 3 –  $L/B = 5,41$ , No. 4 –  $L/B = 6,25$ , No. 5 –  $L/B = 7,5$ ; 64 series: curve No. 6 –  $L/B = 8,45$ – $18,3$ ; SSPA series – points □



**Рис. 2.** Зависимости относительного остаточного сопротивления  $R_R/\Delta$  от относительной длины  $L/\sqrt[3]{V}$  при числе Фруда  $Fn_V = 2$  для моделей разных серий. Серия NPL: кривая: № 1 –  $L/B = 3,3$ , № 2 –  $L/B = 4,5$ , № 3 –  $L/B = 5,41$ , № 4 –  $L/B = 6,25$ , № 5 –  $L/B = 7,5$ ; серия 64: кривая № 6 –  $L/B = 8,45$ – $18,3$ ; серия SSPA – точки □

## Особенности движения кругло-скулого судна в переходном режиме. Параметры, определяющие величину остаточного сопротивления

Motion of round bilge ship in transient mode.  
 Parameters governing residual resistance

Рассмотрим прямолинейное движение судна с постоянной скоростью в несжимаемой вязкой жидкости. В этом случае составляющей сопротивления трения нет, и все сопротивление движению можно считать остаточным сопротивлением.

Пусть судно переместилось на расстояние, равное его длине по ватерлинии  $L$ . При этом произошло вытеснение объема жидкости, численно равное объемному водоизмещению судна  $\nabla$ . Этот объем жидкости должен переместиться в область за судном. При значительной скорости движения судна, соответствующей переходному режиму ( $1 < Fn_{\nabla} < 3$ ), этот процесс сопровождается значительными деформациями свободной поверхности. Вокруг носовой части судна вода поднимается, в кормовой части и за судном вода опускается. На рис. 3 показана фотография движения модели судна со скоростью, соответствующей  $Fn_{\nabla} = 2$ , и характер деформаций воды вдоль корпуса модели. Можно видеть, что форма поверхности воды вблизи судна имеет волнообразный характер. Причем гребень волны приходится на носовую часть судна. Посадка судна при этом изменяется. Именно такие особенности обтекания судна характерны для переходного режима движения.

При перемещении судна на расстояние  $L$  совершается работа, равная  $R_R L$ . Эта работа равна изменению кинетической и потенциальной энергии жидкости.

Изменение потенциальной энергии жидкости равно произведению веса вытесненной воды  $\rho g \nabla$  на величину подъема ее центра тяжести  $h$ . Из соображений размерности можно полагать, что  $h \sim \sqrt[3]{\nabla}$ , т.е. изменение потенциальной энергии воды пропорционально  $\rho g \nabla \cdot \sqrt[3]{\nabla}$ .

Изменение кинетической энергии жидкости пропорционально произведению массы вытесненной воды  $\rho \nabla$  на квадрат скорости судна  $v^2$ .

Приравнявая работу сил сопротивления изменению кинетической и потенциальной энергии, получим следующее соотношение:

$$R_R L = f_v \cdot \rho \nabla v^2 + f_h \cdot \rho g \nabla \sqrt[3]{\nabla}, \quad (3)$$

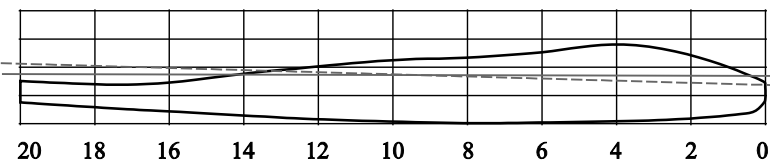
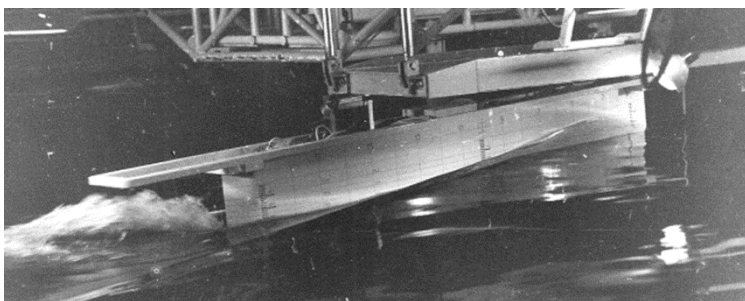
где  $f_v$  и  $f_h$  – некоторые неизвестные функции.

Разделив обе части соотношения (3) на величину  $L \rho g \nabla$ , получим выражение

$$\frac{R_R}{\rho g \nabla} = f_v \frac{v^2}{gL} + f_h \frac{\sqrt[3]{\nabla}}{L}. \quad (4)$$

Левая часть выражения (4) является относительным сопротивлением надводного судна при движении в жидкости без трения, т.е. равна относительному остаточному сопротивлению  $R_R/\Delta$ .

Первый член правой части выражения (4) характеризует изменение кинетической энергии жидкости при движении судна. Эта величина пропорциональна квадрату числа Фруда по длине. От чис-



**Рис. 3.** Характер деформаций свободной поверхности воды при движении модели круглоскулого судна в переходном режиме: вверху – движение модели,  $Fn_{\nabla} = 2$ ; внизу – форма поверхности воды вдоль корпуса модели (сплошная линия – ватерлиния модели в статическом состоянии; пунктирная линия – невозмущенная поверхность воды)

**Fig. 3.** Deformation pattern of free water surface at transient mode of round bilge ship operation: top – motion of model,  $Fn_{\nabla} = 2$ , bottom – free surface form along the model hull (solid line refers to the model waterline at rest, point line refers to still water)

ла Фруда по длине легко перейти к числу Фруда по водоизмещению  $\nabla$ :

$$\frac{v^2}{gL} = \frac{\sqrt[3]{\nabla}}{L} \frac{v^2}{g\sqrt[3]{\nabla}}. \quad (5)$$

Второй член в формуле (4) характеризует изменения потенциальной энергии жидкости при движении судна. Эта величина прямо пропорциональна параметру  $\sqrt[3]{\nabla}/L$ .

Формула (4) устанавливает связь между величиной остаточного сопротивления судна в переходном режиме со скоростью  $v$ , длиной по ватерлинии  $L$  и объемным водоизмещением  $\nabla$ . Таким образом, известный экспериментальный факт об определяющем влиянии этих параметров на величину остаточного сопротивления связан с процессом изменения кинетической и потенциальной энергии жидкости при движении судна. Как можно видеть, этот процесс практически не зависит от особенностей формы корпуса судна.

В то же время при движении судна в переходном режиме имеется ряд особенностей, которые при определенных обстоятельствах могут оказать влияние на сопротивление движению. Например, образование интенсивной брызговой струи в носовой части или вихреобразование на скулах. Влияние этих особенностей может зависеть от формы корпуса, но они имеют второстепенный характер.

С учетом зависимости (5) формула (4) может быть представлена в виде

$$\frac{R_R}{\Delta} = (f_v Fn_{\nabla}^2 + f_h) \frac{\sqrt[3]{\nabla}}{L}. \quad (6)$$

Функции  $f_v$  и  $f_h$  могут зависеть от относительной скорости движения судна  $Fn_{\nabla}$ . Поэтому в общем виде эта формула может быть записана:

$$\frac{R_R}{\Delta} = f(Fn_{\nabla}) \frac{\sqrt[3]{\nabla}}{L}. \quad (7)$$

Вид функции  $f(Fn_{\nabla})$ , а также область применимости формулы (7) могут быть установлены на основе анализа результатов систематических модельных испытаний.

## Обобщенная диаграмма для определения остаточного сопротивления круглоскулых судов

General diagram for determination of residual resistance of round bilge ships

Поскольку относительное остаточное сопротивление  $R_R/\Delta$  прямо пропорционально зависит от пара-

метра  $\sqrt[3]{\nabla}/L$ , то результаты испытаний моделей систематических серий можно представить в виде линейных функций

$$\frac{R_R}{\Delta} = A_r(Fn_{\nabla}) + B_r(Fn_{\nabla}) \frac{\sqrt[3]{\nabla}}{L}, \quad (8)$$

где параметры  $A_r$  и  $B_r$  зависят от числа Фруда.

Этот вывод иллюстрирует рис. 4, где показана зависимость относительного остаточного сопротивления  $R_R/\Delta$  от параметра  $\sqrt[3]{\nabla}/L$  при числах

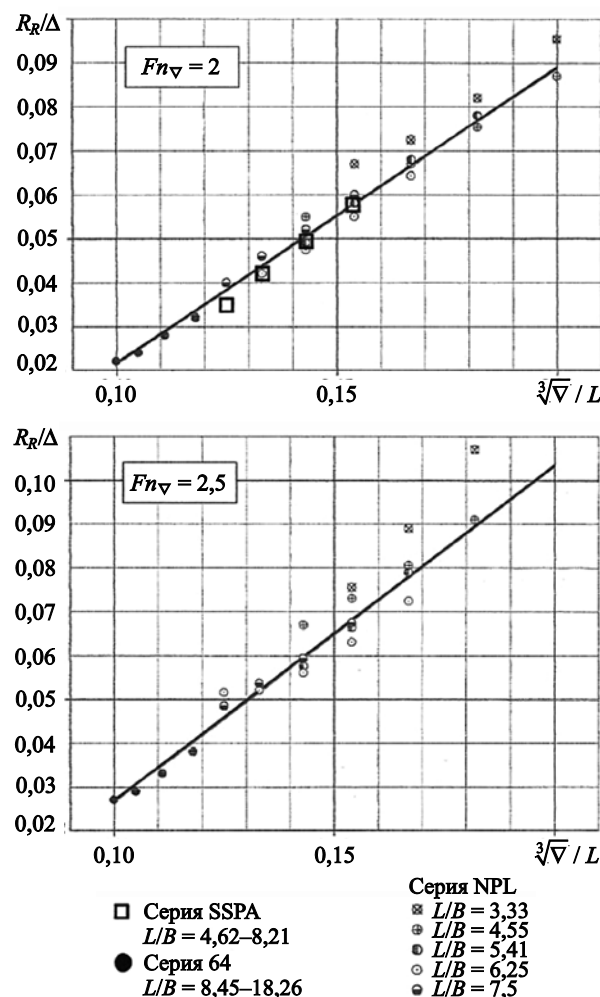


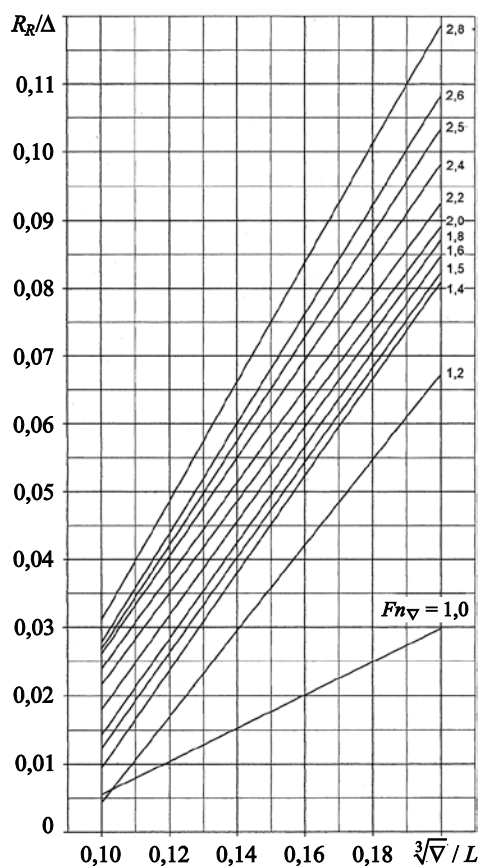
Рис. 4. Зависимость относительного остаточного сопротивления  $R_R/\Delta$  от параметра  $\sqrt[3]{\nabla}/L$  для моделей серий 64, NPL и SSPA при числах Фруда  $Fn_{\nabla} = 2$  и  $Fn_{\nabla} = 2,5$

Fig. 4. Relative residual resistance  $R_R/\Delta$  versus parameter  $\sqrt[3]{\nabla}/L$  for models of series 64, NPL and SSPA at Froude numbers  $Fn_{\nabla} = 2$  and  $Fn_{\nabla} = 2.5$

**Таблица 2.** Значения коэффициентов  $A_r$  и  $B_r$ , вычисленных на основе результатов модельных испытаний систематических серий 64, NPL и SSPA

**Table 2.** Coefficients  $A_r$  and  $B_r$  estimated on the basis of 64, NPL and SSPA-series model tests

$Fn_V$	$A_r$	$B_r$
1,0	-0,0187	0,2425
1,2	-0,0586	0,6292
1,4	-0,0621	0,7150
1,5	-0,0576	0,7000
1,6	-0,0563	0,7052
1,8	-0,0511	0,6909
2,0	-0,0459	0,6752
2,2	-0,0447	0,6859
2,4	-0,0461	0,7220
2,5	-0,0497	0,7656
2,6	-0,0527	0,8055
2,8	-0,0566	0,8772



**Рис. 5.** Обобщенная диаграмма для определения остаточного сопротивления круглобильных судов

**Fig. 5.** General diagram for determination of residual resistance of round bilge ships

Фруда  $Fn_V = 2$  и  $Fn_V = 2,5$  для моделей рассматриваемых серий. Если, как и раньше, исключить из рассмотрения точки, соответствующие моделям серии NPL с  $L/B = 3,3$ , то можно видеть, что все остальные точки хорошо ложатся на прямые линии. Такой же результат имеет место и при других числах Фруда в диапазоне  $Fn_V = 1,0 \div 2,8$ .

Коэффициенты  $A_r$  и  $B_r$  в выражении (8) были определены методом наименьших квадратов. Для этого использованы результаты модельных испытаний систематических серий 64, NPL и SSPA. Значения коэффициентов при различных числах Фруда приведены в табл. 2.

На рис. 5 показаны зависимости относительно остаточного сопротивления  $R_R/\Delta$  от параметра  $\sqrt[3]{V}/L$  при различных числах Фруда  $Fn_V$ , вычисленные по формуле (8). Эту диаграмму можно назвать обобщенной диаграммой для определения остаточного сопротивления быстроходных круглобильных судов, т.к. она построена на основе результатов испытаний 53 моделей серий 64, SSPA и NPL с разной формой корпуса.

Зависимость коэффициентов  $A_r$  и  $B_r$  от числа Фруда по водоизмещению показана на рис. 6 (черные точки). Аппроксимация этой зависимости полиномом третьей степени имеет вид

$$\left. \begin{aligned} A_r &= 0,3444 - 0,6638Fn_V + 0,3531Fn_V^2 - 0,0600Fn_V^3 \\ B_r &= -3,4343 + 6,5306Fn_V - 3,3596Fn_V^2 + 0,5653Fn_V^3 \end{aligned} \right\} (9)$$

Эта аппроксимация показана на рис. 6 сплошной линией.

Значения коэффициентов  $A_r$  и  $B_r$ , вычисленных по формулам (9), приведены в табл. 3. Точность вычисления коэффициентов  $A_r$  и  $B_r$  может быть повышена, если для аппроксимации использовать полиномы более высоких порядков.

## Расчет сопротивления движению быстроходных круглобильных судов

Resistance calculations for high-speed round bilge ships

Сопротивление воды движению голого корпуса судна  $R_T$  представляют в виде суммы сопротивления трения  $R_F$  и остаточного сопротивления  $R_R$ ,

$$R_T = R_F + R_R. \quad (10)$$

При этом полагают, что остаточное сопротивление  $R_R$  зависит только от числа Фруда, а сопротивление трения  $R_F$  зависит только от числа Рейнольдса [2].

При одинаковых значениях чисел Фруда  $Fn_{\nabla}$  и параметра  $\sqrt[3]{\nabla}/L$  относительное остаточное сопротивление модели и натурного судна равны, т.е.

$$\frac{R_R}{\Delta} = \frac{R_{Rs}}{D}, \quad (11)$$

где  $R_{Rs}$  и  $D$  – остаточное сопротивление и весовое водоизмещение натурного судна.

Отсюда остаточное сопротивление натурного судна равно

$$R_{Rs} = \frac{R_R}{\Delta} \cdot D. \quad (12)$$

Относительное остаточное сопротивление  $R_R/\Delta$  может быть определено по обобщенной диаграмме (рис. 5) или вычислено по формуле (8).

Сопротивление трения натурного судна  $R_{Fs}$  вычисляется по формуле

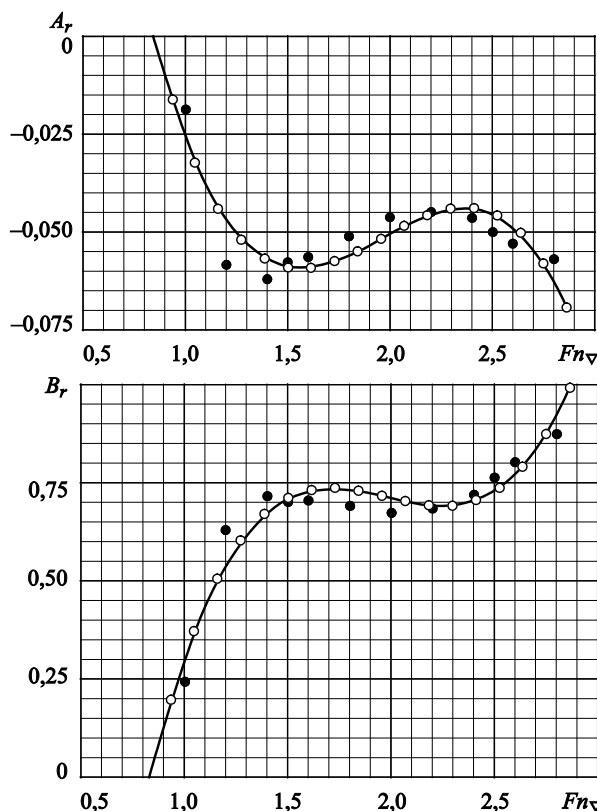
$$R_{Fs} = (C_{F0} + C_A) \frac{\rho \cdot v_s^2}{2} S_s, \quad (13)$$

где  $S_s$  – смоченная поверхность натурного судна;  $\rho$  – плотность воды (для натурн);  $v_s$  – скорость натурного судна.

Коэффициент трения эквивалентной плоской пластины  $C_{F0}$  вычисляют по формуле Прандтля – Шлихтинга или по формуле ИТТС 1957 г. [2].

Корреляционный коэффициент  $C_A$ , который также называют надбавкой на шероховатость, учитывает ряд факторов. Прежде всего это разница между гидравлически 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 натурных судов. В отечественной практике для быстроходных судов обычно принимают  $C_A = 0,4 \cdot 10^{-3}$ . В табл. 4 приведены типичные значения коэффициента  $C_A$ , принятые за рубежом [1]. Можно отметить, что в настоящее время для защиты корпуса судов часто применяют специальные краски и синтетические пленки, которые могут значительно улучшить качество поверхности судна и тем самым позволяют снизить величину надбавки на шероховатость  $C_A$ .



**Рис. 6.** Зависимость коэффициентов  $A_r$  и  $B_r$  от числа Фруда по водоизмещению: черные точки соответствуют значениям, вычисленным по экспериментальным данным; сплошная линия – аппроксимация полиномом третьей степени

**Fig. 6.** Coefficients  $A_r$  and  $B_r$  versus displacement Froude number: black points are values calculated from test data, solid line refers to third-order polynomial approximations

**Таблица 3.** Значения коэффициентов  $A_r$  и  $B_r$ , вычисленных по формулам (9)

**Table 3.** Coefficients  $A_r$  and  $B_r$  calculated from formulas (9)

$Fn_{\nabla}$	$A_r$	$B_r$
1,0	-0,0255	0,2972
1,2	-0,0460	0,5368
1,4	-0,0571	0,6698
1,5	-0,0588	0,7078
1,6	-0,0592	0,7290
1,8	-0,0557	0,7324
2,0	-0,0505	0,7113
2,2	-0,0453	0,6935
2,4	-0,0439	0,7045
2,5	-0,0456	0,7324
2,6	-0,0491	0,7773
2,8	-0,0627	0,9238

**Таблица 4.** Типичные значения коэффициента корреляции  $C_A$  [1]

**Table 4.** Typical values of correlation coefficient  $C_A$  [1]

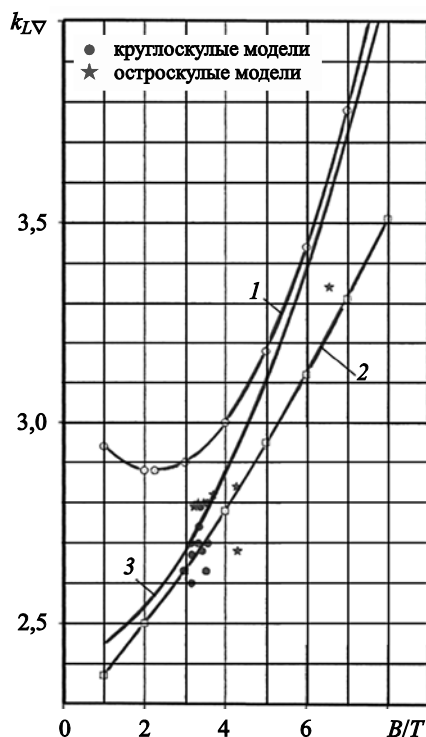
Длина судна по ватерлинии, м	$C_A \cdot 10^3$
12,5	0,60
25,0	0,55
50,0	0,45
100	0,35

Смоченная поверхность корпуса судна может быть определена по формуле Тэйлора

$$S = k_{LV} \cdot \sqrt{\nabla L}, \quad (14)$$

где  $k_{LV}$  – безразмерный коэффициент смоченной поверхности.

Данные о величине коэффициента  $k_{LV}$  для моделей разных серий приводятся в работах [1, 5, 6].



**Рис. 7.** Зависимость коэффициента смоченной поверхности  $k_{LV}$  от  $B/T$ : 1 – формула (15); 2 – формула (16); 3 – формула (17)

**Fig. 7.** Coefficient of wetted surface  $k_{LV}$  versus  $B/T$ : 1 – formula (15); 2 – formula (16); 3 – formula (17)

Например, для моделей серии SSPA в работе [5] приведена формула

$$k_{LV} = 4 \left[ 0,77 - 0,045 \left( \frac{B}{T} \right) + 0,01 \left( \frac{B}{T} \right)^2 \right], \quad (15)$$

где  $B/T$  – отношение ширины судна к осадке.

На основе анализа данных по смоченным поверхностям моделей 7 серий Мерсер и Савицкий получили формулу [5]

$$k_{LV} = 2,262 \left[ 1 + 0,046 \left( \frac{B}{T} \right) + 0,0029 \left( \frac{B}{T} \right)^2 \right]. \quad (16)$$

В работе [6] приведены данные по величине коэффициентов  $k_{LV}$  для большого количества моделей круглоскулых и остроскулых судов.

Величина смоченной поверхности корпуса судна и ее зависимость от  $B/T$  может быть вычислена по теоретическому чертежу. На основании расчетов смоченной поверхности судна с типичными обводами переходного режима движения была получена следующая формула для коэффициента  $k_{LV}$ :

$$k_{LV} = 2,42 + 0,0135 \left( \frac{B}{T} \right) + 0,0247 \left( \frac{B}{T} \right)^2. \quad (17)$$

На рис. 7 для сравнения показаны зависимости коэффициента смоченной поверхности  $k_{LV}$  от отношения  $B/T$  для моделей серии SSPA (формула (15)), значения, вычисленные по формуле Мерсера – Савицкого (формула (16)) и по формуле (17). На рисунке также показаны значения  $k_{LV}$  для круглоскулых (точки) и остроскулых (звездочки) моделей, взятые из работы Де Гроота [6].

Таким образом, сопротивление воды движению голого корпуса натурного судна равно

$$R_{Ts} = (C_{F0} + C_A) \frac{\rho \cdot v_s^2}{2} S_s + \frac{R_R}{\Delta} \cdot D. \quad (18)$$

Сопротивление движению реального судна может включать еще ряд составляющих: сопротивление выступающих частей, сопротивление воздуха и т.п.

## Пример расчета сопротивления движению и скорости круглоскулого быстроходного судна

Case study: calculation of round bilge ship resistance and speed

В качестве примера использования приведенных выше результатов выполнен расчет сопротивления движению и скорости хода автомобильно-



**Таблица 5.** Расчет сопротивления и требуемой мощности круглоскулого автомобильно-пассажирского парома типа FMF 95 m Kattogat

**Table 5.** Calculation of resistance and required power for round bilge car-passenger ferry of FMF 95 m type Kattogat

1	$F_{nV}$	1,60	1,80	2,00
2	$v_s$ , м/с	16,69	18,79	20,88
3	$v_{sk}$ , уз	32,5	36,6	40,6
4	$R_R/\Delta$	0,034	0,0375	0,041
5	$R_{R_s}$ , кН	467,6	515,8	563,9
6	$C_{F0} + C_A$	$1,929 \cdot 10^{-3}$	$1,910 \cdot 10^{-3}$	$1,890 \cdot 10^{-3}$
7	$R_{F_s}$ , кН	271,7	341,0	416,6
8	$R_{T_s}$ , кН	739,3	856,8	980,5
9	$\eta$	0,65	0,68	0,71
10	$N_e$ , кВт	18 982	23 675	28 834

пассажирского парома типа FMF 95 m Kattogat, построенного норвежской верфью Mjellem & Karlsen Verf [7].

Корпус судна имеет круглоскулые обводы. Основные характеристики парома [7]:

- длина по ватерлинии –  $L = 86,4$  м,
- ширина по ватерлинии –  $B = 14,4$  м,
- осадка –  $T = 3,6$  м,
- водоизмещение –  $D = 1402$  т = 13 754 кН.

Приняты следующие значения физических характеристик воды: плотность –  $\rho = 1025$  кг/м<sup>3</sup>; кинематическая вязкость –  $\nu = 1,163 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с.

Коэффициент статической нагрузки  $C_V = \nabla/L^3 = 2,12 \cdot 10^{-3}$ , соответствующее значение параметра  $\sqrt[3]{\nabla}/L = 0,128$ .

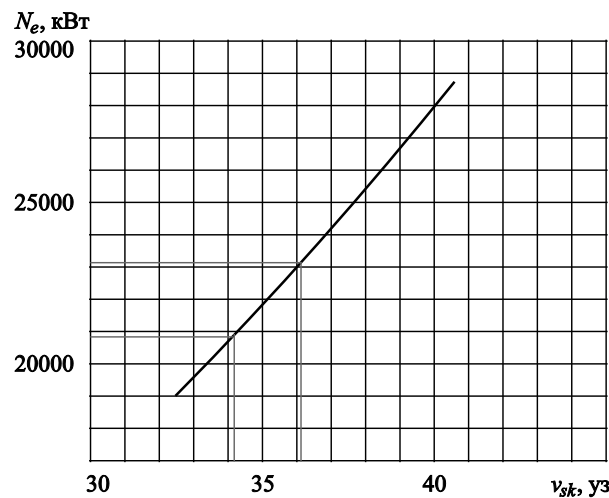
Коэффициент трения эквивалентной пластины вычислен по формуле Прандтля – Шлихтинга; коэффициент шероховатости принят –  $C_A = 0,4 \cdot 10^{-3}$ . Коэффициент смоченной поверхности, вычисленный по формуле (17), равен  $k_{LV} = 2,87$ ; смоченная поверхность корпуса определена по формуле (14)  $S_s = 986,6$  м<sup>2</sup>.

Основные результаты, полученные в процессе расчета, приведены в табл. 5. В строке 4 приведены значения коэффициента остаточного сопротивления  $R_R/\Delta$ , определенного по обобщенной диаграмме для круглоскулых судов (рис. 5). По величине полного сопротивления  $R_{T_s} = R_{R_s} + R_{F_s}$  (строка 8, табл. 5) может быть вычислена буксировочная мощность судна при различной скорости  $N = R_{T_s} v_s$ . Для определения требуемой мощности необходимо знать пропульсивный КПД судна. В данном расчете за пропульсивный КПД судна принят КПД водометов

Kamewa. Эти данные приведены в работе [8]. Значения КПД, принятые в расчете, приведены в строке 9 табл. 5. Мощность главных двигателей, требуемая для движения судна, равна

$$N_e = \frac{R_{T_s} v_s}{\eta}. \quad (19)$$

Зависимость требуемой мощности от скорости парома типа FMF 95 m Kattogat показана на рис. 8. Максимальной мощности главных двигателей судна  $N_e = 23 200$  кВт соответствует скорость



**Рис. 8.** Расчетная зависимость требуемой мощности от скорости для автомобильно-пассажирского парома типа FMF 95 m Kattogat

**Fig. 8.** Required power versus speed for car-passenger ferry of FMF 95 m type Kattogat

$v_{sk} = 36,2$  уз. Эксплуатационной мощности судна  $N_e = 20\,880$  кВт соответствует скорость  $v_{sk} = 34,2$  уз. Строителем судна заявлена эксплуатационная скорость  $v_{sk} = 35$  уз.

## Заключение

### Conclusion

На основе анализа буксировочных испытаний моделей систематических серий 64, SSPA и NPL установлено следующее:

1. В переходном режиме движения при  $L/B > 4,5$  в диапазоне изменения коэффициента статической нагрузки  $C_V = \nabla/L^3$  от 0,001 до 0,008 остаточное сопротивление круглоскулых судов зависит главным образом от скорости движения, водоизмещения и длины судна по ватерлинии; форма корпуса судна на величину остаточного сопротивления не влияет.
2. Относительное остаточное сопротивление круглоскулых судов  $R_R/\Delta$  может быть представлено в виде единой обобщенной диаграммы, которая представляет собой совокупность линейных функций от параметра  $\sqrt[3]{\nabla}/L$ . Коэффициенты линейных функций зависят от числа Фруда по водоизмещению. Для практических целей такое представление более удобно и наглядно, чем многочисленные диаграммы, содержащие нелинейные зависимости  $R_R/\Delta = f(L/\sqrt[3]{\nabla}, Fn_V)$ .
3. Приведенные материалы могут быть использованы на ранних этапах проектирования быстроходных судов при выборе характеристик корпуса, расчета сопротивления движению и мощности главных двигателей.

## Список использованной литературы

1. *Oossanen P. van.* Resistance prediction of small high-speed displacement vessels: state of the art // International Shipbuilding Progress. 1980. Vol. 27, No. 313. P. 212–224. DOI: 10.3233/ISP-1980-2731301.
2. *Войткунский Я.И.* Сопротивление движению судов. 2-е изд., перераб. и доп. Ленинград : Судостроение, 1988. 286, [1] с.
3. *В.Н. Аносов.* Некоторые гидродинамические аспекты проектирования быстроходных однокорпусных и многокорпусных судов переходного режима движения // Труды Центрального научно-исследовательского института им. акад. А.Н. Крылова. 1996. Вып. 2(286). С. 7–15.
4. *В.Н. Аносов.* Быстроходные суда в конце XX столетия. Санкт-Петербург : Политехника, 2002. 172 с.

5. *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.
6. *De Groot D.* Resistance and propulsion of motor-boats // International Shipbuilding Progress. 1955. Vol. 2, No. 6. P. 61–80. DOI: 10.3233/ISP-1955-2602.
7. *Mjellem and Karlsen* delivers 95m monohull // Fast Ferry International. 1995. Vol. 34, No. 7. P. 15–19.
8. *Kamewa AB* // Jane's High-Speed Marine Transportation. 2001–2002 / Ed. *Stephen J. Phillips*. 34<sup>th</sup> Ed. Coulsdon : Jane's Information Group, 2001. P. 431–433.

## References

1. *Oossanen P. van.* Resistance prediction of small high-speed displacement vessels: state of the art // International Shipbuilding Progress. 1980. Vol. 27, No. 313. P. 212–224. DOI: 10.3233/ISP-1980-2731301.
2. *Войткунский Я.И.* Ship resistance. 2<sup>nd</sup> edition, rev. and enl. Leningrad : Sudostroyeniye, 1988. 286 p. (in Russian).
3. *Anosov V.N.* Some hydrodynamic design aspects of high-speed monohull and multi-hull ships of transient operating mode // Transactions of the Krylov Central Research Institute. 1996. Vol. 2(286). P. 7–15 (in Russian).
4. *Anosov V.N.* High-speed ships at the end of XX century. St. Petersburg : Polytechnika. 2002. 172 p. (in Russian).
5. *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.
6. *De Groot D.* Resistance and propulsion of motor-boats // International Shipbuilding Progress. 1955. Vol. 2, No. 6. P. 61–80. DOI: 10.3233/ISP-1955-2602.
7. *Mjellem and Karlsen* delivers 95m monohull // Fast Ferry International. 1995. Vol. 34, No. 7. P. 15–19.
8. *Kamewa AB* // Jane's High-Speed Marine Transportation. 2001–2002 / Ed. *Stephen J. Phillips*. 34<sup>th</sup> Ed. Coulsdon : Jane's Information Group, 2001. P. 431–433.

## 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: 12.07.23  
Принята в печать / Accepted: 04.12.23  
© Аносов В.Н., 2023