



О ПРОЕКТИРОВАНИИ корпуса водоизмещающе- глизсирующего судна

Впервые в “КиЯ” № 166 за 1998 г. были рассмотрены водоизмещающие суда нового типа*. Их корпус состоит из двух частей — верхней (надводной) и нижней (подводной). Надводная часть опирается на широкую, скользящую по поверхности воды гидролыжу, а подводная, примыкающая к гидролыже снизу, является несущей и представляет собой узкое хорошо обтекаемое тело большого относительного удлинения.

Такие суда были названы автором *водоизмещающе-глизсирующими* (ВГ). Позднее это не совсем точное название было заимствовано и зарубежными изданиями**. Скольжение гидролыжи ВГ судна по поверхности воды может происходить с нулевым углом атаки и малой скоростью, когда динамическая подъемная сила практически отсутствует. Поэтому под *глизсированием* в данном случае следует понимать и простое скольжение гидролыжи по поверхности воды. Именно *скольжение* по поверхности отличает ВГ от обычных водоизмещающих судов, глубоко “вспахивающих”, подобно плугу, поверхность воды и порождающих поверхностные волны. У ВГ судов возмущения поверхности воды обусловлены лишь мелкоциклической верхней частью корпуса.

Столь радикальное изменение корпуса обычного водоизмещающего судна было инициировано следующими обстоятельствами. Работа надводной и подводной частей корпуса происходит в средах, отличающихся по плотности приблизительно в 800 раз, они имеют различное функциональное назначение. Вместе с тем, несмотря на тысячелетия существования водоизмещающих судов и многообразие обводов, это не получило отражения в их конструкции до настоящего времени. Четко выраженная конструктивная граница между надводной и подводной частями корпуса у современных водоизмещающих судов отсутствует***. На несовершенство современных скоростных малотоннажных судов указывают и явления в диапазоне переходных скоростей: образование мощного буруна, дифферент на корму, интенсивное волнообразование.

Теоретическое обоснование конструкции и данные ис-

* См. также относящиеся к этим судам патенты РФ № 2132795 (1996 г.) и 2148518 (1999 г.).

** Описание зарубежного ВГ судна — см. в немецком журнале “Skipper” № 8 за 2004 г., стр. 42-43, статья “Verdrängender Gleiter” (“Водоизмещающий глизсер”). По-видимому первые зарубежные публикации по ВГ судам относятся к 2002 г.

*** У судов с динамическим поддержанием (на подводных крыльях, глизсирующих) эта граница просматривается весьма четко: под водой находятся лишь имеющие незначительный объем и обтекаемую форму продольно ориентированные крылья, рули, гребные винты, их опоры.

пытаний ВГ судов приведены в № 192 “КиЯ”. Там речь шла о процессах *трения, вихреобразования и волнообразования*, которые имеют различный физический механизм, поэтому для их оптимизации требуются разные способы. Снижение *трения* предполагает ограничение *молекулярного переноса* (точнее — *микрпереноса*) импульса, что возможно за счет уменьшения поверхности и градиентов скорости. Для снижения вихреобразования необходимо повышение гидродинамической устойчивости течения, предотвращение явлений отрыва потока, повышение плавности обтекания: это снижает

интенсивность молярного обмена. Снижение *волновых потерь* возможно за счет уменьшения интенсивности и *экранирования* источника излучения волн. Теплотехническими аналогами этих процессов переноса при передаче тепла являются *теплопроводность, конвекция и излучение*, имеющие также молекулярную, молярную и радиационную природу соответственно. Снижение интенсивности этих процессов требует использования аналогичных методов, которые широко известны в теплотехнике. Эти общие физи-

ческие соображения и привели к необычной конструкции корпуса ВГ судна, в значительной степени устраняющей отмеченные противоречия.

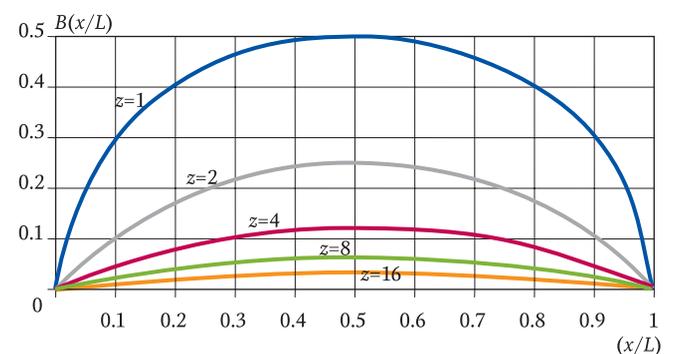
Анализ процессов гидродинамического сопротивления определил основной принцип формирования обводов: *чтобы получить максимальную ходкость подводного судна, сферу необходимо в достаточной степени “растянуть” в направлении движения. У надводного судна с полусферической подводной частью полусферу следует “растянуть” и экранировать* (см. статью автора в “КиЯ” №192).

Гидролыжа, скользящая по поверхности воды, используется в качестве экрана. Ее размерения определяют надводную обитаемость судна. Она же является конструктив-



Рис. 1

Рис. 2
Половинки двуугольников, рассчитанных по формуле (2) при $L=1$



ной границей, отражающей различия в условиях работы надводной и подводной частей ВГ судна. Ее экранирующий эффект предотвращает генерацию поверхностных волн и позволяет применить узкую и длинную хорошо обтекаемую водоизмещающую часть, минимизируя вихревые потери. Подводная часть является несущей и может быть выполнена в виде узкого двугольника, который, будучи экранированным, плавно прорезает набегающий поток, почти не образуя вихрей и не генерируя поверхностные волны. Поэтому для ВГ судов не существует "горба" волнового сопротивления, который ограничивает скорость обычных судов. ВГ суда мало отличаются по ходкости от обычных при $Fr = v/\sqrt{gL} < 0.4$, но имеют безусловные преимущества перед ними в диапазоне переходных скоростей. Они обводы позволяют распространить на этот диапазон основные достоинства водоизмещающих судов — экономичность и комфортабельность — за счет радикального снижения волновой и вихревой составляющих сопротивления ценой некоторого увеличения поверхности трения.

Для обеспечения максимальной ходкости КВЛ ВГ судна должна совпадать с плоскостью гидролыжи. Значительные перегрузки могут ухудшить ходкость такого судна. Однако ватерлиния не должна опускаться ниже плоскости гидролыжи. Это ограничение можно сформулировать в виде неравенства

$$\Delta D/D_0 < 1, \quad (1)$$

которое должно быть достаточно сильным, но менее, чем для обычных глиссирующих судов (здесь D_0 — расчетное водоизмещение; ΔD — допустимое изменение водоизмещения).

В №192 "КиЯ" приведены данные испытаний ВГ катера, построенного и испытанного австрийской компанией "Alsphere". Общее сопротивление такого судна удалось значительно уменьшить по сравнению с обычными водоизмещающими и глиссирующими судами в диапазоне переходных скоростей. Однако общий коэффициент сопротивления $\zeta = R/q_\infty \Omega$ построенного образца ВГ судна при этом все же значительно возрос с увеличением относительной скорости — числа Fr , что могло иметь место лишь при недостаточно полном подавлении волнообразования. На фото (рис. 1), сделанном при испытаниях, также хорошо видно, что источником волнообразования является носовая часть корпуса ВГ судна приблизительно на протяжении 1/3 длины корпуса. Это можно объяснить недостаточно полным экранированием нижней части корпуса в носовой части, где поверхность гидролыжи значительно приподнята над поверхностью воды.

Ниже излагаются основы проектирования корпуса ВГ судов в соответствии с представлениями автора.

При проектировании корпуса ВГ судна целесообразно использовать плоские двугольники, состоящие из одинаковых дуг окружности, расположенных симметрично оси x . Их обводы определяются формулой

$$\frac{B(x)}{2} = \pm L \frac{1}{4z} \left\{ \sqrt{(1+z^2)^2 - 4z^2 \left(2\frac{x}{L} - 1 \right)^2} + 1 - z^2 \right\}, \quad (2)$$

если задано относительное удлинение $z = L/B$ и максимальная длина L двугольника.

На рис. 2 представлены половинки таких двугольников с относительным удлинением $z = 1; 2; 4; 8; 16$. Малые значения z удобно использовать при формировании носового заострения верхней части корпуса; большие значения z — при проектировании его подводной части. Симметричная форма, плавность обводов таких двугольников обеспечивают хорошее обтекание. При заданной длине L максимальная площадь S достигается при минимальном периметре $2l$. Поэтому несущая часть корпуса такой формы при заданных длине L_n и высоте T_0 будет иметь максимальное расчетное водоизмещение D_0 при минимальной смачиваемой поверхности $2lT_0 + S$. Дости-

Геометрические параметры двугольников при различных удлинениях

$z=L/B$	α°	φ	R/L	l/L
1	180	0.78540	0.5	1.5708
2	106.26	0.68899	0.625	1.1591
3	73.74	0.68125	0.833	1.0725
4	56.14	0.67493	1.063	1.0412
5	45.24	0.67197	1.300	1.0265
6	37.85	0.67036	1.547	1.0184
7	32.52	0.66938	1.786	1.0136
8	28.50	0.66875	2.031	1.0104
9	25.36	0.66831	2.278	1.0082
10	22.84	0.66800	2.525	1.0067
11	20.78	0.66777	2.773	1.0055
12	19.05	0.66759	3.021	1.0046
13	17.59	0.66746	3.269	1.0039
14	16.34	0.66735	3.518	1.0034
15	15.26	0.66726	3.767	1.0030
16	14.31	0.66719	4.016	1.0026
17	13.47	0.66713	4.265	1.0023
18	12.72	0.66708	4.514	1.0021
19	12.05	0.66704	4.763	1.0018
20	11.45	0.66700	5.013	1.0017

Рис. 3. Углы заострения оконечностей

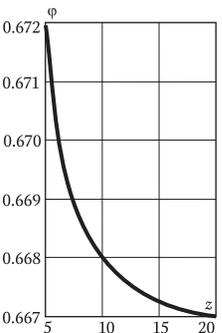
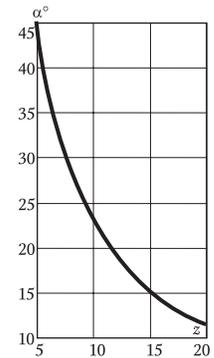


Рис. 4. Коэффициент общей полноты

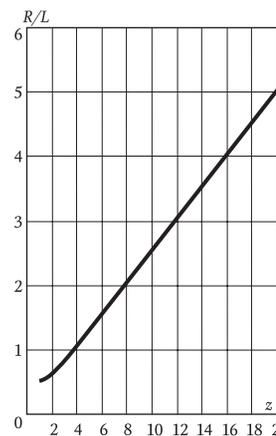


Рис. 5. Относительный радиус кривизны борта

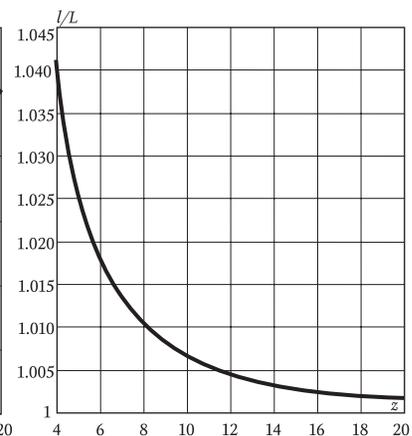


Рис. 6. Относительная длина развертки

гаются жесткость и простота конструкции, технологичность изготовления и удобство расчетов.

Практический интерес представляют следующие безразмерные параметры двугольников.

Углы α при вершинах двугольника, заданного относительного удлинения $z = L/B$, определяются формулой $\alpha^\circ = (180^\circ/\pi)4\text{arctg}(1/z)$. (3)

Коэффициент полноты $\varphi = S/LB$ (S — площадь двугольника)

$$\varphi = \frac{z}{4} \left[\left(z + \frac{1}{z} \right)^2 \text{arctg} \frac{1}{z} - \sqrt{\left(z + \frac{1}{z} \right)^2 - 4} \right]. \quad (4)$$

Относительный радиус образующих дуг в зависимости от $z = L/B$

$$R/L = 0.25(z+1/z). \quad (5)$$

Относительная длина дуги (развертки) двугольника l/L в зависимости от его относительного удлинения $z = L/B$ и угла α° :

$$l/L = 0.25(\alpha^\circ(\pi/180^\circ))(z+1/z). \quad (6)$$

Расчетные значения параметров двугольников представ-

лены в таблице и на графиках рис. 3–6.

На рис. 7 представлен ВГ корпус. Для преодоления набегающего потока воды и штормовых волн носовые заострения и форштевни имеют как нижняя, так и верхняя части корпуса. Элементы носового и кормового сужений в проекции на ОП представляют собой половинки двуугольников, форма которых описывается формулой (2). Обводы корпуса удается полностью обчислить и получить развертки. При этом используются элементы поверхности двух круглых конусов.

Расчет нижней части корпуса также осуществляется по формуле (2) при значениях $L_n=10.5$ м; $z_n=11.67$. Полученный график зависимости $B(x/L)$ характеризует распределение сил Архимеда по длине судна.

Прямоугольное сечение нижней части корпуса позволяет при минимальной осадке получить максимальную силу поддержания ВГ судна, но при его обтекании возникают перепады давления, вызывающие вторичные поперечные течения. Поэтому кромки днища нижней части корпуса следует скруглить, чтобы исключить образование вихрей (рис 7).

Конструктивная схема ВГ судна допускает установку винта большого диаметра (в данном случае около 700 мм), что позволяет обеспечить высокий пропульсивный КПД судна.

За расчетное водоизмещение принимаем объем нижней части корпуса

$$D_0 = \varphi_n L_n B_n T_0. \quad (7)$$

Здесь φ_n — коэффициент полноты нижней части корпуса, T_0 — его высота.

При $D = D_0$ плоскость гидролыжи совпадает с поверхностью воды. Возмущение поверхности воды и сопротивление ВГ судна при этом минимальное.

Площадь смоченной поверхности Ω_0 (при $D = D_0$) включает в себя площадь боковых стенок нижней части корпуса, гидролыжи и днища:

$$\Omega_0 = 2l_n T_0 + B_n [L_n - 0.5L_{bc}(1 - \varphi_{bc})] \quad (8)$$

или при $L_{bc} = L_n$ $\Omega_0 = 2l_n T_0 + 0.5B_n L_n (1 + \varphi_{bc})$, где l_n, T_0 — длина дуги двуугольника и высота нижней части корпуса, а индекс “bc” относится к носовому сужению гидролыжи на длине $0.5L_{bc}$.

Для оценки относительных величин смачиваемой поверхности Ω_x и объемного водоизмещения D_x любого судна удобно пользоваться коэффициентами



Рис.8. Схематическая модель ВГ судна, испытанная автором

$$k_{\Omega} = \frac{\Omega_x}{\Omega_{nc}} \Big|_{\text{при } D_x = D_{nc}} = \frac{\Omega_x}{\sqrt[3]{18\pi D_x^{2/3}}} \geq 1 \quad (9)$$

$$k_D = \frac{D_x}{D_{nc}} \Big|_{\text{при } \Omega_x = \Omega_{nc}} = 3\sqrt{2\pi} \frac{D_x}{\Omega^{3/2}} \leq 1,$$

причем $k_D = k_{\Omega}^{-3/2}$.

Здесь k_{Ω} характеризует, во сколько раз смачиваемая поверхность Ω_x больше поверхности полусферы Ω_{nc} того же объема $D_x = D_{nc}$, а k_D показывает, во сколько раз водоизмещение D_x меньше объема полусферы D_{nc} с той же смачиваемой поверхностью $\Omega_x = \Omega_{nc}$.

В диапазоне переходных скоростей были проведены испытания упрощенной ВГ модели $L_b=L_n=1.25$ м; $\Omega_0=0.54$ м²; $D_0=0.00744$ м³ (рис. 8). Абсолютная величина шероховатости смачиваемой поверхности составляла $k=0.4\div 0.5$ мм. Относительная величина $L/k=1250/0.5=2.5\times 10^{-3}$; $Re \cong (1.5\div 4)\times 10^6$, $Fr = v/(gL)^{1/2} = 0.42\div 1.12$.

Оказалось, что зависимость относительной силы сопротивления $R/\rho g D_0$ от безразмерной скорости $Fr = v/(gL)^{1/2}$ хорошо описывается квадратичной параболой

$$\frac{R}{\rho g D_0} = \frac{L \Omega_0}{2 D_0} \times \zeta \times Fr^2 \cong 45.4 \times \zeta \times Fr^2, \quad (10)$$

где $\zeta = R/(\rho v^2/2)\Omega_0 = \zeta_{тр} + \zeta_{\phi} + \zeta_{в} = 0.0066 \cong \text{const}$ — общий коэффициент сопротивления модели, который зависит лишь от шероховатости L/K , D/D_0 и числа Re .

Таким образом, критерий Fr выпадает из рассмотрения, что указывает на незначительность волнообразования.

Кроме того, оказалось, что

$$\zeta \cong \zeta_{тр} \gg \zeta_{\phi} + \zeta_{в}. \quad (11)$$

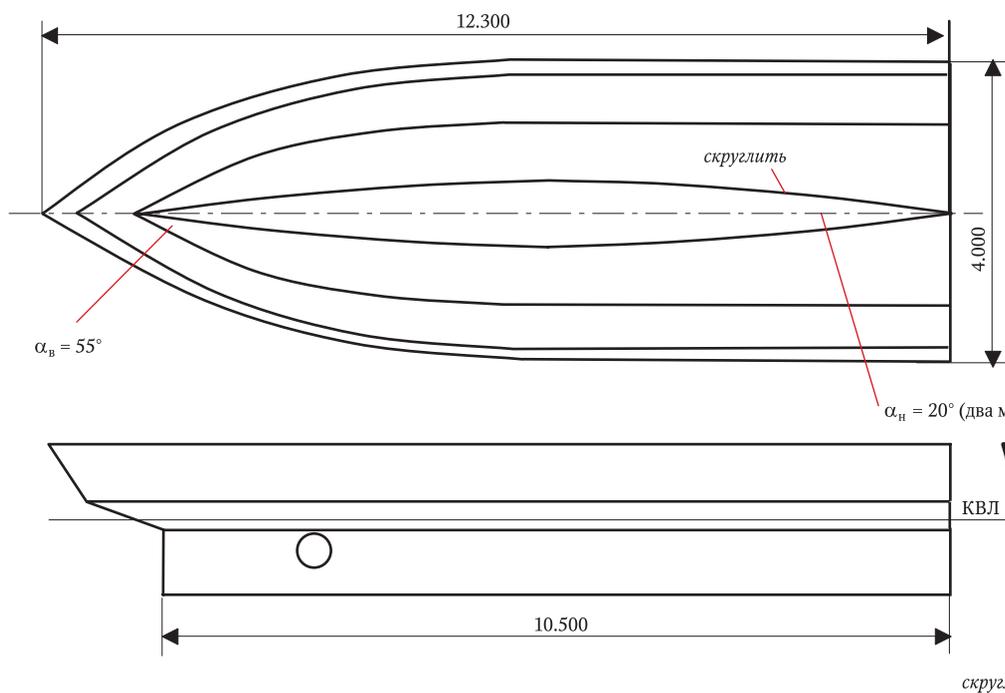


Рис.7. Эскиз теоретического чертежа мореходного ВГ судна

Основные параметры:

$$L_{\max} = 12.3 \text{ м}; B_{\max} = 4 \text{ м};$$

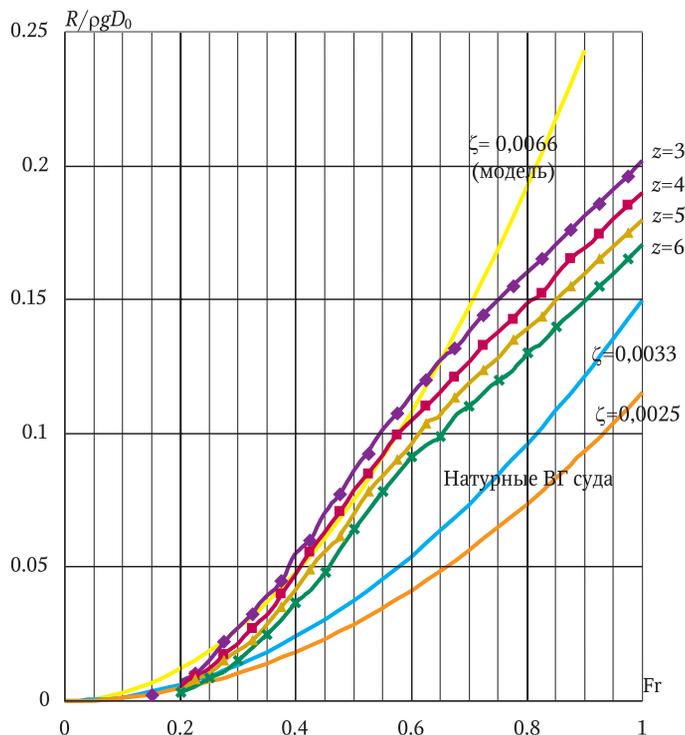
$$L_b = 10.5 \text{ м}; B_b = 2.4 \text{ м}; z_b = 4.375$$

$$L_n = 10.5 \text{ м}; B_n = 0.9 \text{ м}; z_n = 11.67$$

$$T_0 = 0.9 \text{ м}; D_0 = 6.3 \text{ м}^3; \Omega_0 = 40 \text{ м}^2$$

$$k_{\Omega} = 3.055; k_D = 0.187$$

Рис. 9. Зависимости относительной силы сопротивления от относительной скорости для ВГ судов с различными коэффициентами сопротивления ζ и современных быстроходных катеров различных относительных удлинений $z = 3\div 6$ по М. Хуберту



Иными словами, сопротивление ВГ модели, по крайней мере в первом приближении, оказалось равным сопротивлению плоской пластины такой же смачиваемой площади и шероховатости.

Чтобы перейти от модели к натурным судам, необходимо учесть различия в значениях чисел Re и L/k . Для натурального ВГ судна 12,5 м с окрашенной и шлифованной поверхностью абсолютная шероховатость $k = 0.02\text{--}0.03$ мм или $L/k = 12500/0.025 = 5 \times 10^5$. Соответственно для тех же значений числа Fr получим $Re \approx (0.5 \div 1.2) \times 10^8$ и $\zeta \approx \zeta_{тр} = 0.0025$. При на порядок более высокой шероховатости $L/k = 5 \times 10^4$, соответственно получим $\zeta \approx \zeta_{тр} = 0.0033$ (рис. 9). На график нанесены также кривые диаграммы М. Хуберта, применимой для катеров с обводами, рассчитанными на переходный режим, т.е. имеющими подъем днища к ватерлинии у транца (см. Д.А.Курбатов, "15 проектов судов для любительской постройки". Справочник, Л. "Судостроение", 1986).

Из рис. 9 следует, что при условии (11) эффект экономии потребной мощности получается значительно больший, чем у ВГ судов австрийской компании "Alsphere".

У обычных катамаранов уменьшение остаточного сопротивления достигается большими значениями z для поплавков, а у судов с уменьшенной площадью ватерлинии еще и экранированием их слоем воды. Можно показать (используя коэффициенты k_{Ω} и k_D), что смачиваемая поверхность, характеризующая возможности минимизации трения, у катамаранов обычно больше, чем у ВГ судов того же водоизмещения. Это дает основание предположить, что по ходкости ВГ суда не должны уступать современным катамаранам. Тем более это справедливо для судов с уменьшенной площадью ватерлинии. Однокорпусные ВГ суда объединили в себе большие удлинения z и экранирование при $\Omega_0 = \Omega_{\min}$.

Автор считает предлагаемый путь совершенствования наиболее перспективным для малотоннажных водоизмещающих судов. Он будет рад любой аргументированной критике в свой адрес и помощи в реализации данного проекта.

YANMAR
marine

двигатели дизель-генераторы мотопомпы

9-900 л.с.

9-75 л.с.

4-600 кВт

125-1000 л/мин.

телефон: (495) 937 8670, (812) 764 5216
www.yanmarmotors.ru

Крупнейший в Поволжье
Торговый Центр "АЗИМУТ"

**1500 кв. м
свободного выбора**

443106,
г. Самара
ул. Стара-Загора, 285
тел. (84-62) 58-89-25, 64-73-93
факс (84-62) 58-05-63
vipmaster@sama.ru
www.azimut-tc.ru