

УДК 629.125.8.07

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ БУКСИРОВОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ В ОПЫТОВОМ БАСЕЙНЕ С ПОМОЩЬЮ ДВУХ МОДЕЛЕЙ ГЛИССИРУЮЩЕГО СУДНА

В. В. БАБЕНКО *, Александр И. КУЗНЕЦОВ **, Анатолий И. КУЗНЕЦОВ **, В. В. МОРОЗ *

* *Институт гидромеханики НАН Украины, Киев*

** *Украинский государственный морской технический университет, Николаев*

Получено 24.04.2003

Приводится методика проведения в опытном бассейне буксировочных испытаний, цель которых – определение коэффициента остаточного сопротивления и смоченной поверхности глиссирующего судна. Отличительной особенностью методики является то, что буксировочные испытания проводятся с помощью двух геометрически подобных, но изготовленных в разных масштабах, моделей. Эффективность методики продемонстрирована на примере определения коэффициента остаточного сопротивления и смоченной поверхности глиссирующего тримарана, состоящего из выдвинутого вперед центрального корпуса и двух несимметричных боковых корпусов. По сравнению с традиционной методикой настоящая методика позволяет упростить технологию проведения буксировочных испытаний и повысить точность измерений.

Викладено методику проведення в дослідному басейні буксировочних випробувань, метою яких є визначення коефіцієнта залишкового опору і змоченої поверхні глісуючого судна. Відмінною особливістю методики є та обставина, що буксировочні випробування проводяться за допомогою двох геометрично схожих, але виготовлених у різних масштабах, моделей. Ефективність методики продемонстровано на прикладі визначення коефіцієнта залишкового опору та змоченої поверхні глісуючого тримарана, що складається із висунутого вперед центрального корпусу і двох несиметричних бічних корпусів. В порівнянні з традиційною методикою ця методика дозволяє спростити технологію проведення буксировочних випробувань і підвищити точність вимірювань.

The technique of realization in a ship-research station of towing-basin tests is resulted, the purpose of which is the definition of a factor of residuary resistance and wetted surface of a planning vessel. A distinctive feature of a technique is that the towing-basin tests are conducted with the help two geometrically similar, but manufactured in different scales, models. The efficiency of a technique is demonstrated on an example of definition of a factor of residuary resistance and wetted surface of a planning trimaran consisting of a pushed forward center casing and two asymmetrical lateral bodies. As contrasted to traditional technique the present technique allows to simplify technique of realization of towing-basin tests and to increase accuracy of measurements.

ВВЕДЕНИЕ

Глиссирующие суда находят широкое применение в малотоннажном судостроении. В соответствии с гипотезой о независимости составляющих сопротивления [1], согласно которой гидромеханические процессы, вызывающие возникновение отдельных составляющих сопротивления, происходят независимо один от другого, принято разделять буксировочное сопротивление глиссирующего судна R_x (буксировочное сопротивление есть сопротивление воды и воздуха буксируемого судна при отсутствии на нем движителей) на составляющие части, каждая из которых зависит только от одного из свойств жидкости:

$$R_x = R_f + R_w + R_b + R_\phi + R_{в.ч.} + R_a;$$

где $R_f = R_{f_0} + \Delta R_f$ – сопротивление трения, представляющее собой сумму сопротивления трения эквивалентной технически гладкой пластины R_{f_0} и надбавки на шероховатость ΔR_f ; R_w – вол-

новое сопротивление корпуса судна; R_b – брызговое сопротивление корпуса судна; R_ϕ – сопротивление формы корпуса судна; $R_{в.ч.}$ – сопротивление выступающих частей; R_a – аэродинамическое сопротивление надводной части корпуса судна. Если при этом не учитывать сопротивление выступающих частей $R_{в.ч.}$ и аэродинамическое сопротивление R_a , то такая величина представляет собой буксировочное сопротивление голого корпуса.

В практике судостроения широкое распространение получил способ представления буксировочного сопротивления голого корпуса [1], в соответствии с которым буксировочное сопротивление голого корпуса состоит из сопротивления трения R_f , приравняваемого к сопротивлению трения эквивалентной технически гладкой пластины, и остаточного сопротивления R_o , равного сумме волнового сопротивления R_w , брызгового сопротивления R_b и сопротивления формы R_ϕ . Таким образом, буксировочное сопротивление глиссирующего судна может быть представлено в следующем виде:

$$R_x = R_f + R_o + R_{в.ч.} + R_a.$$

В соответствии с теорией гидродинамического подобия буксировочное сопротивление судна может быть представлено в виде

$$R_x = \xi \frac{\rho v^2}{2} \Omega,$$

где ξ – безразмерный коэффициент полного сопротивления; ρ – массовая плотность воды; v – скорость движения судна; Ω – смоченная поверхность корпуса.

Согласно принятой структуре сопротивления, безразмерный коэффициент полного сопротивления может быть представлен в виде

$$\xi = \xi_f + \xi_o + \xi_{в.ч.} + \xi_a.$$

Точность определения коэффициента остаточного сопротивления ξ_o и величины смоченной поверхности Ω играют при этом определяющую роль в расчете буксировочного сопротивления натурального глиссирующего судна.

В последнее время проявляется повышенный интерес к идее создания многокорпусных глиссирующих судов [2]. Обусловлено это тем, что однокорпусные глиссирующие суда на высоких скоростях движутся с углами дифферента 1...2° (т. е. существенно меньшими оптимальных (см. рис.1)). Попытка увеличить ходовой дифферент на однокорпусном судне за счет смещения центра тяжести в корму или за счет увеличения удлинения корпуса приводит в первом случае к потере устойчивости движения в продольно-вертикальной плоскости (возникает движение, которое называется "дельфинирование"), а во втором случае – к снижению поперечной остойчивости судна.

При использовании многокорпусной схемы масса судна распределяется между несколькими несущими поверхностями, удлинение каждой из которых существенно больше удлинения смоченной поверхности однокорпусного глиссера. Имея на больших скоростях углы дифферента, близкие к оптимальным, корпуса многокорпусных глиссеров могут обладать гидродинамическим качеством (отношение весового водоизмещения глиссера в состоянии покоя к силе сопротивления), превышающим качество однокорпусных судов с аналогичными характеристиками. К сожалению, в настоящее время отсутствуют эффективные расчетные методики определения коэффициента остаточного сопротивления ξ_o и величины смоченной поверхности Ω глиссирующих судов со сложной

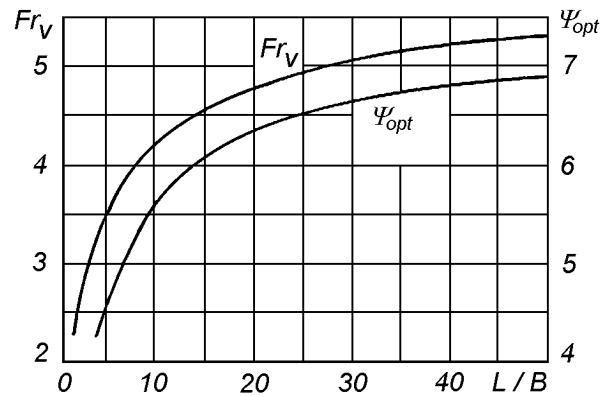


Рис. 1. Влияние удлинения плоской пластины на границу перехода к режиму глиссирования Fr_V и на оптимальное значение угла ходового дифферента ψ_{opt}

формой корпуса, и в частности – многокорпусных. Поэтому их определение основано главным образом на эксперименте с моделями в опытовом бассейне исходя из равенства коэффициентов остаточного сопротивления модели $\xi_{ом}$ и натурального судна $\xi_{он}$ при условии равенства чисел Фруда модели $Fr_{Vм}$ и натурны $Fr_{Vн}$, т. е.

$$\xi_{ом} = \xi_{он} \quad \text{при} \quad Fr_{Vм} = Fr_{Vн},$$

где $Fr_V = v/\sqrt{g\sqrt[3]{V}}$ – число Фруда, вычисленное по объемному водоизмещению; g – ускорение силы тяжести; V – объемное водоизмещение судна в состоянии покоя. Кроме того, число Фруда Fr_V является важным параметром, характеризующим степень развития гидродинамических сил, действующих на корпус судна, и процесс перехода судна из режима плавания в режим глиссирования. Так, при числах Фруда $Fr_V \geq 3$ наступает режим глиссирования и глиссирующее судно при этом на 95...97% поддерживается за счет гидродинамических сил.

В соответствии с традиционной методикой [3] проведения буксировочных испытаний с использованием одной модели глиссирующего судна смоченная поверхность определяется, как правило, путем фотографирования подводной части корпуса модели (рис. 2, а), на которую нанесена координатная сетка, позволяющая судить о величине смоченной поверхности (рис. 2, б) при различных скоростях движения. Определенная таким образом смоченная поверхность модели используется для определения коэффициента остаточного сопротивления глиссирующего судна по формуле

$$\xi_{ом} = \xi_{он} = \frac{2 R_m}{\rho v_m^2 \Omega_m} - \xi_f, \quad (1)$$

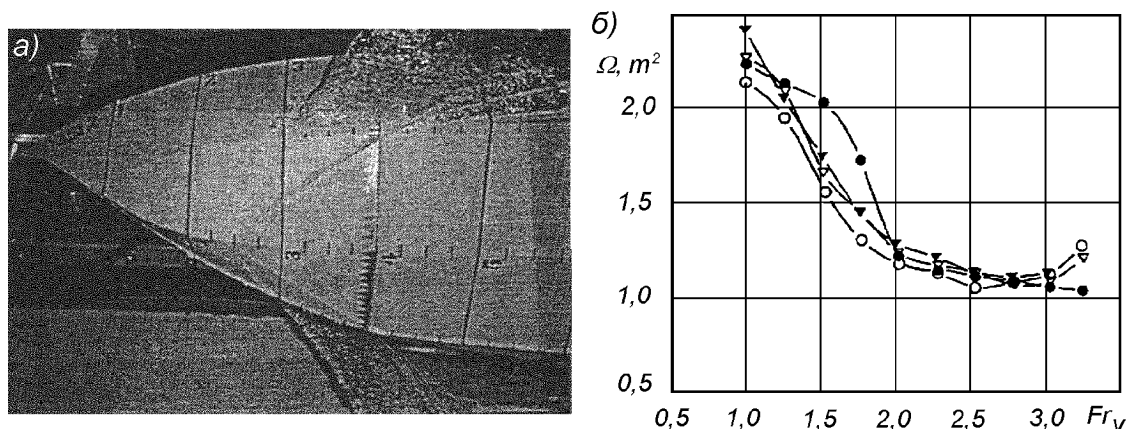


Рис. 2. Определение смоченной поверхности модели глссирующего судна путем фотографирования подводной части корпуса:
 а - фотография подводной части, б - зависимость величины смоченной поверхности от числа Фруда

где R_M – полное сопротивление модели; v_M – скорость движения модели судна; Ω_M – смоченная поверхность модели; ξ_f – коэффициент сопротивления трения модели.

Учитывая, что у глссирующих судов пограничный слой является турбулентным по всей длине, то для определения коэффициента сопротивления трения технически гладкой эквивалентной пластины применяют формулы Прандтля-Шлихтинга, Шенхера, "мадридскую" (ИТТС-1957) и др. [1].

К сожалению, такая традиционная методика определения коэффициента остаточного сопротивления и смоченной поверхности малоэффективна при проведении буксировочных испытаний в опытовом бассейне моделей многокорпусных глссирующих судов, характерные обводы корпусов которых показаны на рис. 3.

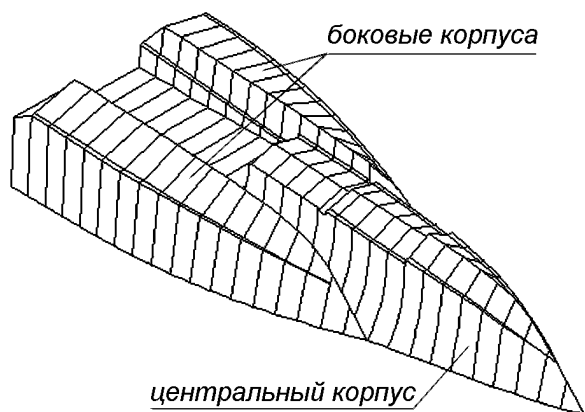


Рис. 3. Внешний вид подводной части корпуса современного трехкорпусного глссирующего судна

В этом случае, очень трудно зафиксировать ве-

личину смоченной поверхности, так как корпуса имеют сложные обводы, а также не совсем понятно, каким образом брызговые струи, образующиеся в межкорпусном пространстве, взаимодействуют с соединительными конструкциями корпуса.

В настоящей работе изложена эффективная методика проведения буксировочных испытаний в опытовом бассейне с помощью двух моделей, которая позволяет повысить точность и формализовать сам процесс определения коэффициента остаточного сопротивления и смоченной поверхности многокорпусного глссирующего судна.

СУТЬ МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ БУКСИРОВОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ С ПОМОЩЬЮ ДВУХ МОДЕЛЕЙ

Равнодействующую R всех гидродинамических сил, действующих на глссирующее судно, можно представить в виде нескольких слагаемых, как изображено на рис. 4,

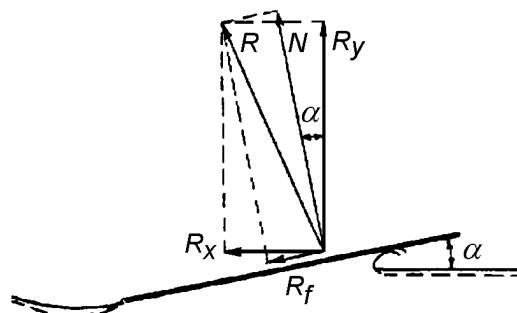


Рис. 4. Схема сил, действующих на глссирующее судно

из которого видно, что

$$R_f = R_x \cos \alpha - R_y \sin \alpha,$$

где R_f – сила сопротивления трения; R_x – буксировочное сопротивление; $R_y \approx \Delta$ – подъемная сила, которая равна весовому водоизмещению судна; N – нормальная составляющая гидродинамических сил; α – угол ходового дифферента судна.

Отсюда можно получить величину буксировочного сопротивления как

$$R_x = R_y \operatorname{tg} \alpha + \frac{R_f}{\cos \alpha}.$$

Учитывая, что $\operatorname{tg} \alpha \approx \alpha$, а $\cos \alpha \approx 1$, имеем

$$R_x = \Delta \alpha + R_f = \Delta \alpha + \xi_f \frac{\rho v^2}{2} \Omega.$$

Первое слагаемое в этом уравнении представляет собой остаточное сопротивление глиссирующего судна, а второе – сопротивление трения. Таким образом, если имеем две геометрически подобные модели, но изготовленные в разных масштабах, то для большей из них можем записать

$$R_{x6} = \Delta_6 \alpha_6 + \xi_{f6} \frac{\rho v_6^2}{2} \Omega_6,$$

а для меньшей модели

$$R_{xm} = \Delta_m \alpha_m + \xi_{fm} \frac{\rho v_m^2}{2} \frac{\Omega_6}{k^2},$$

где индекс "6" свидетельствует о том, что указанные величины относятся к большей модели, а индекс "м" – к меньшей. Здесь k – масштаб меньшей модели относительно большей.

При равных числах Фруда угол ходового дифферента обеих моделей будет одинаковым. Поэтому можно записать, что

$$\alpha_6 = \alpha_m = \frac{R_{x6}}{\Delta_6} - \xi_{f6} \frac{\rho v_6^2}{2} \Omega_6 = \frac{R_{xm}}{\Delta_m} - \xi_{fm} \frac{\rho v_m^2}{2} \frac{\Omega_6}{k^2},$$

где величины $R_{x6}/\Delta_6 = \varepsilon_6$ и $R_{xm}/\Delta_m = \varepsilon_m$ представляют собой обратное гидродинамическое качество соответственно большей и меньшей моделей. Решая уравнение относительно смоченной поверхности, получаем ее величину (с учетом замыкания бортов и соединительных конструкций корпуса)

$$\Omega_6 = \frac{\varepsilon_m - \varepsilon_6}{\xi_{fm} \frac{\rho}{2 \Delta_m k^2} v_m^2 - \xi_{f6} \frac{\rho}{2 \Delta_6} v_6^2}, \quad (2)$$

где ξ_{fm} и ξ_{f6} – коэффициенты силы трения соответственно меньшей и большей моделей, вычисленные как коэффициенты силы трения эквивалентной пластины.

Следует, однако, заметить, что при моделировании по числу Фруда во избежание погрешностей, связанных с использованием небольших моделей, движущихся с низкими скоростями, необходимо стремиться к тому, чтобы меньшая модель имела достаточно большие абсолютные размеры. Это необходимо для того, чтобы силы поверхностного натяжения были малы по сравнению с силами инерции, и действием поверхностного натяжения можно было пренебречь. Основываясь на результатах работы [4] (см. рис. 5) применительно

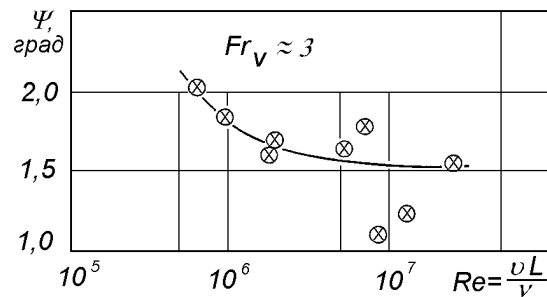


Рис. 5. Зависимость ходового дифферента модели глиссирующего судна от числа Рейнольдса

к рассматриваемой методике проведения буксировочных испытаний с помощью двух моделей можно заключить, что равенства углов ходового дифферента на большой и малой моделях можно достичь при условии, что размеры и скорость движения меньшей модели позволяют получить числа Рейнольдса не менее, чем $2 \cdot 10^6$.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛЕЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Для проверки эффективности методики были изготовлены и испытаны в опытовом бассейне две геометрически подобные модели глиссирующего тримарана, внешние обводы корпуса которого показаны на рис. 3. Модели были изготовлены из армированного деревом конструкционного пенопласта, при этом большая модель имела длину 1900 мм и была в два раза больше малой. Весовое водоизмещение большой модели в состоянии покоя при этом составило 340 Н, а водоизмещение малой – 42.5 Н. Наружная поверхность моделей была обработана в соответствии с формой корпуса, укреплена армирующим слоем стеклоткани, зашпаклевана и окрашена водостойкой крас-

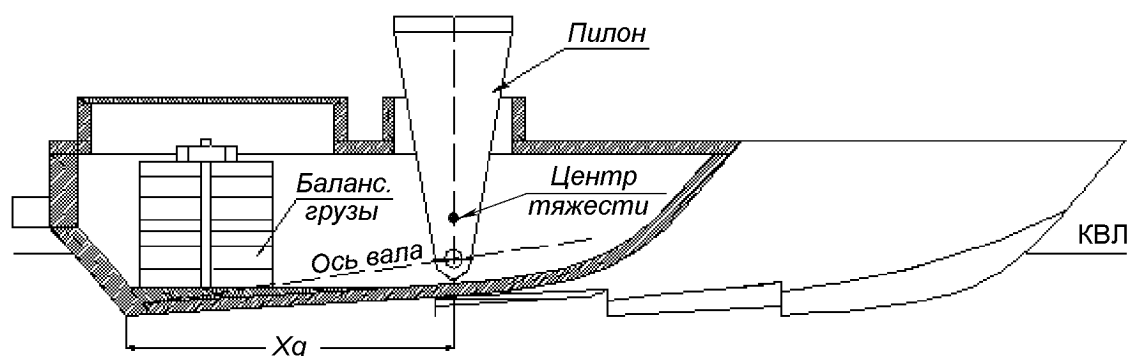


Рис. 6. Схема подвески модели к буксировочному устройству

кой. Внутри модели были полыми. Подвеска моделей к буксировочному устройству осуществлялась посредством двух пилонов, расположенных в боковых корпусах. Схема установки пилонов показана на рис.6. В нижней части пилон было предусмотрено шарнирное его соединение с моделью (с помощью подшипника скольжения), которое исключало влияние трения в подвеске на дифферент модели во время ее движения. Точка подвески модели к пилону размещалась в районе ее центра тяжести. Выход пилон на верх через палубу модели был оформлен в виде люка с комингсом. Размеры люка для пилон были таковыми, что модели могли беспрепятственно принимать дифферент до 15 градусов. Испытания моделей проводились в опытном бассейне Института гидромеханики НАН Украины с использованием гравитационной буксировочной системы [5]. Длина бассейна составляет 50 м, ширина - 6.8 м, а максимальный уровень налива воды - 3.5 м (во время проведения испытаний уровень воды составлял 2.5 м). Крепление модели к буксировочной системе осуществлялось с помощью тросового ромба, который позволяет модели во время движения принимать естественную посадку. На рис. 7 показана большая модель тримарана, запряженная в буксировочную систему опытового бассейна, на плаву.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Обе модели испытаны в опытном бассейне в широком диапазоне скоростей буксировки, что позволило исследовать не только режим развитого глиссирования ($Fr_V \geq 3$), но также режим плавания ($Fr_V \leq 1$) и переходный режим ($1 < Fr_V < 3$).

Сводный график зависимости обратного гидродинамического качества ε от числа Фруда Fr_V ,

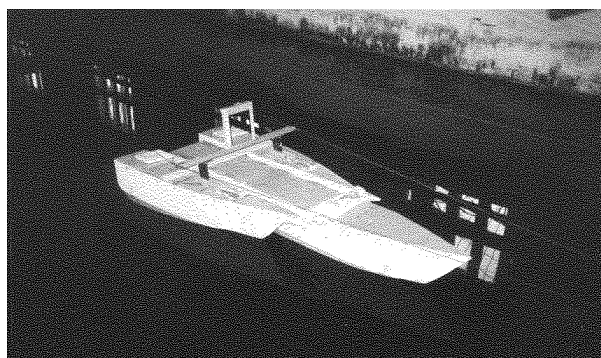
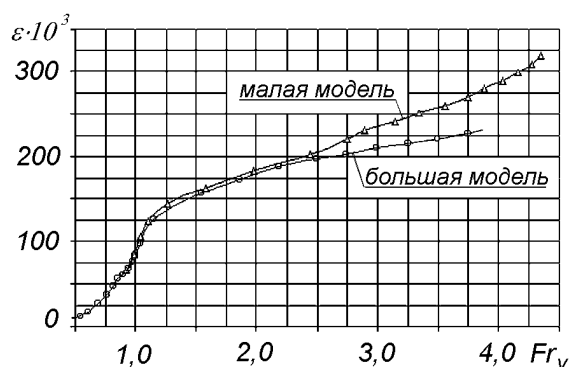


Рис. 7. Большая модель тримарана, запряженная в буксировочную систему

вычисленного по объемному водоизмещению, для обеих моделей приведен на рис. 8.

Рис. 8. Сводный график зависимости обратного гидродинамического качества ε от числа Фруда Fr_V

Обращает на себя внимание то обстоятельство, что до чисел Фруда, равных 2.5, обе зависимости идут эквидистантно на близком друг относительно друга расстоянии. И только после чисел Фруда, больших 2.5, наблюдается заметное расхо-

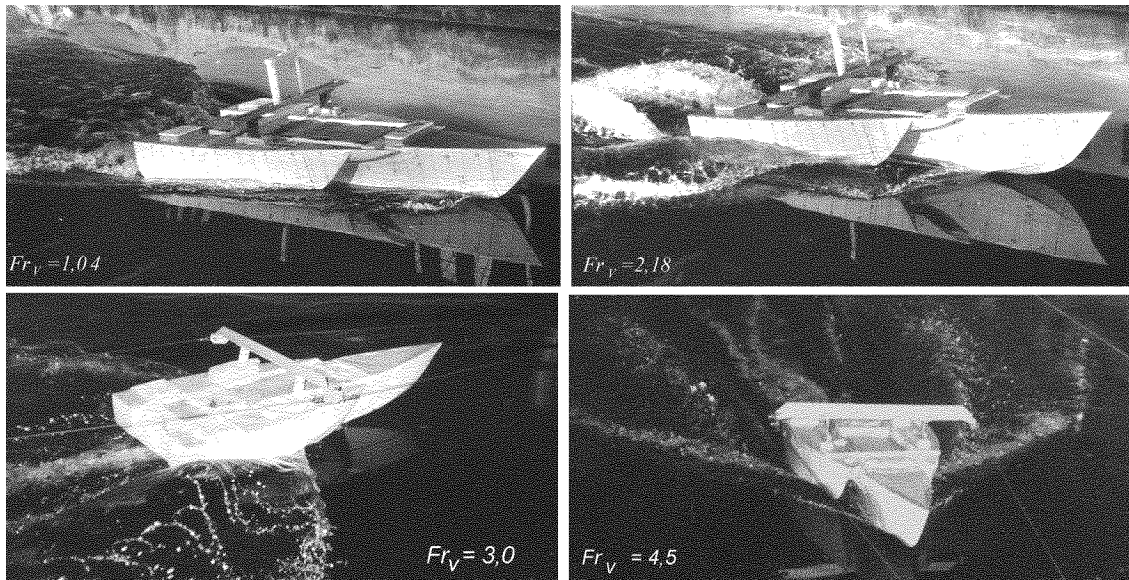


Рис. 9. Волновая картина, образующаяся при различных режимах движения моделей

ждение зависимостей. Это обусловлено тем, что для глиссирующего судна при скоростях хода, соответствующих водоизмещающему режиму плавания и большей части переходного режима, в общем балансе силы буксировочного сопротивления доминирующими являются волновая составляющая и сопротивление формы. Доля сопротивления трения в общем балансе силы буксировочного сопротивления – незначительная. Однако в силу разности масштабов моделей в общем балансе силы буксировочного сопротивления малой модели сила сопротивления трения занимает большую долю, и поэтому кривая зависимости обратного гидродинамического качества малой модели проходит несколько выше кривой гидродинамического качества большой модели.

При числах Фруда, больших 2.5, обе модели начинают переходить к режиму глиссирования и картина волнообразования при этом резко меняется: практически исчезают поперечные волны, а интенсивность продольных снижается. Это приводит к тому, что доля сопротивления трения в общем балансе буксировочного сопротивления возрастает. Поэтому становится явно заметной разница между кривыми зависимостей обратного гидродинамического качества малой и большой моделей.

На рис. 9 представлены фотографии большой (верхняя пара фотографий) и малой (нижняя пара фотографий) моделей, движущихся в диапазоне чисел Фруда от 1 до 4.5 (т. е. в переходном режиме движения и режиме глиссирования).

Как известно [1], в режиме плавания и начальной стадии переходного режима смоченная поверхность глиссирующего судна изменяется мало и приблизительно равна смоченной поверхности, вычисленной при расчете кривых элементов теоретического чертежа. При дальнейшем увеличении скорости происходит всплытие модели и смоченная поверхность резко уменьшается. Как свидетельствуют экспериментальные данные [3] по исследованию изменения смоченной поверхности в процессе выхода судна на режим глиссирования, основная доля уменьшения величины смоченной поверхности приходится на завершающую стадию переходного режима движения (рис. 2, б). В режиме же глиссирования смоченная поверхность уменьшается незначительно. Таким образом, подставляя в формулу (2) значения ε (рис. 8), полученные при равных числах Фруда и соответствующие режиму глиссирования, вычисляем величину смоченной поверхности большой модели с учетом замыкания внутренних бортов и соединительных конструкций. При этом коэффициенты сопротивления трения моделей, входящие в состав формулы (2), определяли по "мадридской формуле" (ИГТС-1957)

$$\xi_f = \frac{0,075}{(\log Re - 2)^2},$$

где Re – число Рейнольдса, вычисленное по длине действующей ватерлинии. На рис. 10 представлена зависимость относительной величины смоченной поверхности (отношение величины смочен-

ной поверхности к характерной площади, в качестве которой принята величина, равная объемному водоизмещению в степени $2/3$ от числа Фруда. Зависимость вычисленного по формуле (1) коэф-

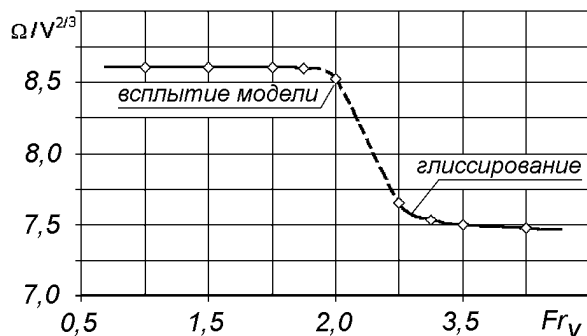


Рис. 10. Зависимость величины относительной смоченной поверхности от числа Фруда

фициента остаточного сопротивления ξ_o от числа Фруда приведена на рис. 11. Наблюдается удовле-

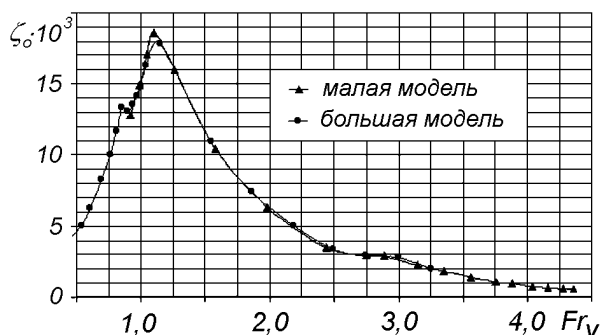


Рис. 11. Зависимость коэффициента остаточного сопротивления от числа Фруда

творительное согласование между результатами, полученными как с помощью большой модели, так и с помощью малой модели. В большей мере это поясняется тем, что для глиссирующих судов при их движении в водоизмещающем и переходном

режимах определяющими являются сопротивление формы и силы волновой природы. Из рис. 11 видно, что на границе этих режимов ($Fr_V \approx 1$) коэффициент остаточного сопротивления как раз и достигает максимальных значений. Кроме того, использованная для вычисления сопротивления трения моделей корреляционная кривая ИТТС-1957 также способствовала получению удовлетворительного результата при обработке данных эксперимента, поскольку она является предпочтительной при использовании моделей небольшого размера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенная методика проведения буксировочных испытаний в опытовом бассейне с помощью двух моделей позволяет повысить точность и формализовать процесс определения смоченной поверхности и коэффициента остаточного сопротивления глиссирующего судна со сложными обводами корпуса. Результаты проведенных экспериментальных исследований свидетельствуют об эффективности изложенной методики в опытовых бассейнах, оборудованных буксировочной системой гравитационного типа.

1. Егоров И. Т., Буньков М. М., Садовников Ю. М. Ходкость и мореходность глиссирующих судов. – Л: Судостроение, 1978. – 336 с.
2. Дубровский В. А. Многокорпусные суда. – Л: Судостроение, 1986. – 434 с.
3. Delgado-Saldivar G. Test results of a planing hull series // 24th American Towing Tank Conference. – University of New Orleans, Louisiana, 1992. – P. 305–310.
4. Latorre R., Ryan S. Scaling of main spray generated by planing surfaces // 24th American Towing Tank Conference. – Texas A&M University, College Station, Texas, 1995. – P. 175–182.
5. Павленко Г. Е. Сопротивление воды движению судов. – М: Морской транспорт, 1956. – 505 с.