

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лебедева Марина Петровна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник. ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» *lmp45@yandex.ru*
Васильева Анастасия Борисовна – ассистент. ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
Инютина Татьяна Николаевна

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lebedeva Marina Petrovna – Candidate of Engineering, Senior Research Fellow. Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping *lmp45@yandex.ru*
Vasileva Anastasija Borisovna – assistant. Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
Injutina Tatjana Nikolaevna

УДК 629.122

С. С. Метелица

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАСХОДА ГАЗА ДЛЯ СОЗДАНИЯ ВОЗДУШНОЙ КАВЕРНЫ НА ДНИЩЕ КАТАМАРАНОВ

Показан один из путей значительного снижения гидродинамического сопротивления движению скоростного судна. Выявлены наиболее существенные факторы, влияющие на величину сопротивления движению судов на воздушной каверне (СВК). Одним из существенных факторов, влияющих на экономичность эксплуатации СВК, является минимально возможный расход энергии, затрачиваемой на подачу воздуха и поддержание избыточного давления в камере каверны. В связи с этим была сформулирована и опытным путем решена задача по поиску оптимального расхода газа для создания каверны. Приведена методика проведения эксперимента по нахождению оптимального расхода газа для создания каверны. Показаны результаты решения экспериментальной задачи по нахождению оптимальной величины расхода воздуха Q для создания воздушной каверны на днище высокоскоростного катамарана. Приведены зависимости расхода газа при различных скоростях движения и различных водоизмещениях судна. Проведен сравнительный анализ величины буксировочного сопротивления изолированного корпуса катамарана, оборудованного воздушной каверной, и корпуса высокоскоростного катамарана.

Ключевые слова: воздушная каверна, оптимизация расхода газа, зона автономности, буксировочное сопротивление, высокоскоростной катамаран.

Введение

Быстроходные суда — суда на подводных крыльях (СПК), глиссеры, суда с малой площадью ватерлинии, суда на воздушной подушке (СВП), экранопланы — важный показатель технического прогресса. В условиях стремительно развивающихся технологий сокращение времени морских перевозок является одной из важнейших задач современного судостроения.

Способом повышения скорости судов длительное время являлось улучшение формы их обводов (например, использование бульбов в носовой оконечности, уменьшение угла входа носовых ватерлиний), а также совершенствование энергетической установки. Кардинального снижения сопротивления удалось достичь за счет применения гидроаэродинамической разгрузки, приводящей к выходу из воды либо всего корпуса, либо его части. Разгрузка может достигаться за счет использования подводных крыльев, воздушной подушки, воздушных крыльев и глиссирования корпуса. Такие суда получили общее название — суда с динамическими принципами поддержания (далее — СДПП). Вследствие выхода корпуса СДПП из воды уменьшаются волновое сопротивление и сопротивление трения. При этом волновое сопротивление в крейсерском режиме практически

исчезает. При выходе на крейсерский режим волновое сопротивление может быть существенным и определяющим для выбора энергетической установки скоростного судна.

В настоящее время одним из перспективных путей развития скоростного флота является применение динамических принципов поддержания на многокорпусных судах. Особенностью скоростных многокорпусных судов, сочетающих гидростатическое и гидродинамическое поддержание, является многообразие применяемых при их создании технических решений в части принципиальных проектной, конструктивной и гидродинамической компоновок и их возможных сочетаний [1] — [3].

Одним из возможных направлений создания высокоскоростных многокорпусных судов, позволяющего добиться существенного снижения сопротивления воды движению, является применение воздушной каверны [4]. Наличие на днище судна воздушной прослойки, подчиняющейся закономерностям развитой кавитации, т. е. искусственной каверны, позволяет изолировать от трения о воду его участок, покрытый каверной, что приводит к снижению сопротивления трения [5]. Для снижения величины полного гидродинамического сопротивления воды движению судна необходимо создать на его днище такую каверну, которая обеспечила бы снижение составляющей трения, существенно превышающее вызываемое наличием каверны возможное увеличение остаточного сопротивления.

Следует заметить, что в течение продолжительного периода времени работы по применению воздушной каверны на днище проводились исключительно с однокорпусными судами [6]. Многочисленные эксперименты и создание опытных образцов скоростных судов подтвердили эффективность применения воздушных каверн для снижения гидродинамического сопротивления. Так, для глиссирующих катеров со скоростями хода $Fr_D > 3,0$ удалось достичь снижения величины гидродинамического сопротивления на величину до 30 %. С учетом работы нагнетателей для поддержания избыточного давления в каверне можно снизить значение мощности силовой установки до 12 % [7], [8].

Постановка задачи

Применение воздушной каверны на высокоскоростных катамаранах открывает перспективу снижения гидродинамического сопротивления не только за счет сопротивления трения, но и за счет уменьшения волнового сопротивления вследствие благоприятной интерференции волновых систем корпусов катамарана. Задачей данного исследования стало определение оптимальной величины расхода газа, подаваемого для создания каверны. В данном случае под оптимальным значением понимается такое значение расхода газа, при котором достигается максимальное снижение величины буксировочного сопротивления при минимальных затратах мощности, идущих на создание каверны. Помимо этого были поставлены задачи исследования зависимости необходимого расхода газа от скорости и от водоизмещения.

Методика проведения экспериментального исследования

Модельные испытания рассматриваемых буксируемых моделей проводились в опытовом бассейне ОАО «ЦКБ по СПК им. Р. Е. Алексеева». Опытный бассейн имеет следующие характеристики:

- длина, $L = 74,5$ м;
- ширина, $B = 4,0$ м;
- глубина, $T = 0,7 - 0,9$ м.

Максимальная скорость буксировочной тележки может достигать 11 м/с.

Одной из особенностей бассейна является наличие специального автоматизированного измерительного комплекса, обеспечивающего измерения параметров движения моделей с воздушной каверной на днище в условиях спокойной и взволнованной поверхности воды, изучение колебательных процессов на неустановившихся режимах движения и физических явлений, происходящих в воздушной каверне, и т. п. В состав автоматизированного измерительного комплекса входят

датчики замеров регистрируемых параметров, первичные преобразователи, устанавливаемые на моделях и буксировочной тележке, а также автоматизированная система измерений «МОДЕРН», состоящая из блока автоматики «КАМАК» и компьютера со встроенной платой согласования, расположенной на пульте управления.

Система выполнена на базе современной вычислительной компьютерной техники и отечественных технологий. При этом используется пакет прикладных программ MultiPet, работающих в операционной системе Windows при использовании драйверов: wsg1d; wsg32d; hPool; hFlood; Grader собственной разработки, а также пакетов стандартных программ Microsoft Excel, Microsoft Word и Corel. Система позволяет одновременно по 16 каналам проводить измерения, сбор, регистрацию параметров модельных испытаний в реальном масштабе времени, их длительное хранение, экспресс-обработку с построением графических зависимостей параметров, замеряемых в ходе эксперимента, а также выполнять окончательную обработку результатов и получение машинописного текста.

Во время испытаний также проводилось визуальное наблюдение за колебательными процессами и брызгообразованием, происходящими при движении модели, с использованием видеосистемы, созданной на базе виброустойчивой видеокамеры, и установленного на буксировочной тележке видеоконтрольного устройства.

Технологическая последовательность проведения экспериментальных работ в опытовом бассейне по отработке гидродинамических компоновок многокорпусных судов с воздушной каверной на днище состояла из следующих основных этапов:

– разработка теоретических и рабочих чертежей буксируемой модели с воздушной каверной на днище и ее изготовление. Основной задачей на данном этапе был правильный выбор судна, близкого по своим характеристикам к требованиям технического задания на проект, и возможности более рационального размещения камеры для воздушной каверны;

– основная программа испытаний по исследованию необходимого расхода газа для создания воздушной каверны. Кроме проведения стандартных калибровок основных параметров движения модели на данном этапе испытаний определялся один из главных элементов судна с воздушной каверной на днище — расход воздуха, идущего на создание воздушной каверны. Для этого на предполагаемой расчетной скорости движения модели V исследовалось в широком диапазоне количество расходуемого воздуха и оценивалось его влияние на величину сопротивления: момент, когда количество расходуемого воздуха не оказывает влияния на величину сопротивления, является началом зоны автомодельности, а количество расходуемого воздуха Q — оптимальным, рекомендуемым для использования на проектируемом судне. При этом количество воздуха рассчитывалось по формуле

$$Q_{\text{нат}} = m^{5/2} \cdot Q,$$

где m — масштаб модели; $Q = 3600 \pi D^2 \sqrt{P_{\text{ст}}}$, м³/ч, где $P_{\text{ст}}$ — статическое давление во всасывающем коллекторе вентилятора, мм вод. ст; D — внутренний диаметр всасывающего коллектора вентилятора, м.

Важной составляющей этой части испытаний являлась оценка смоченной поверхности судна на различных режимах движения, функционирование воздушной каверны. Установленные на своде камеры воздушной каверны и по бортам модели контактные датчики измерительного комплекса с достаточной степенью точности определяли границы смоченной поверхности. При этом смоченная поверхность свода камеры воздушной каверны по своему физическому состоянию разделяется на три зоны [1].

I зона — собственно воздушная каверна, где свод камеры находится в воздухе.

«Основная зона, обеспечивающая эффективность воздушной каверны за счет уменьшения смоченной поверхности, как следствие, существенного снижения сопротивления трения»;

II зона — зона пульсации воздушно-водяной эмульсии.

«Резервная зона, обеспечивающая, пусть незначительную, но дополнительную, порой крайне необходимую, скорость»;

III зона — зона смоченной поверхности, где днище находится в контакте с водой.

Схема буксируемой модели и оборудования, необходимого для проведения испытаний, приведена на рис. 1.

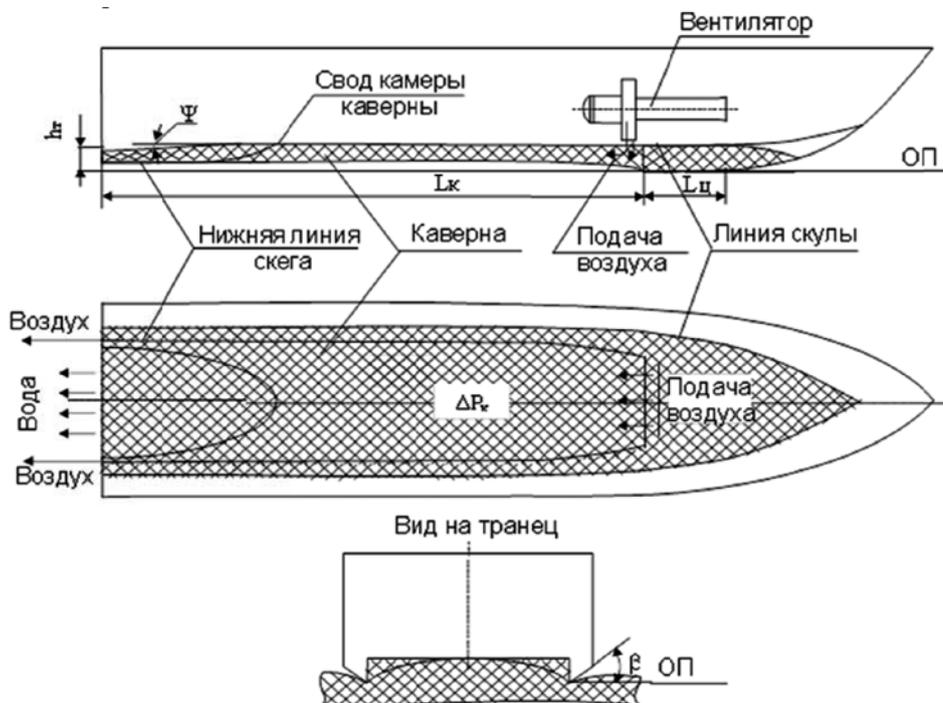


Рис. 1. Схема подачи воздуха для создания каверны на буксируемой модели

Замер расхода воздуха производится с помощью трубки Пито, смонтированной во всасывающем патрубке коллектора электровентилятора. Схема установки представлена на рис. 2.

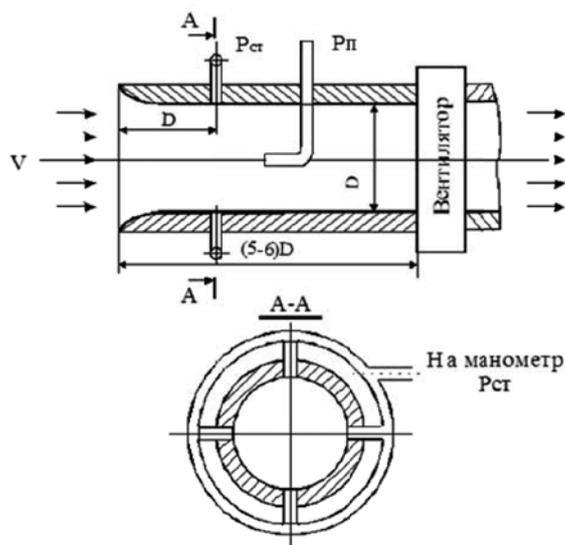


Рис. 2. Всасывающий коллектор вентилятора

Программа испытаний

Исследования расхода газа проводились с буксируемой моделью изолированного корпуса катамарана, оборудованного воздушной каверной. Проекция «Корпус» теоретического чертежа изолированного корпуса буксируемой модели представлена на рис. 3.

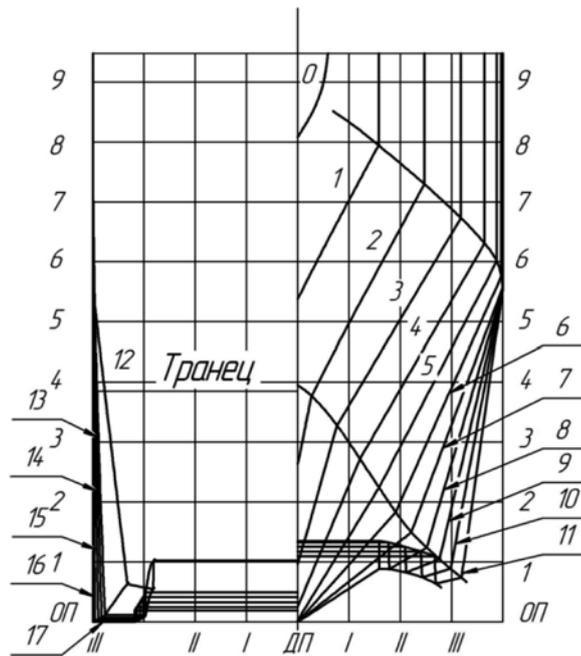


Рис. 3. Проекция «Корпус» буксируемой модели изолированного корпуса катамарана, оборудованного воздушной каверной

Буксируемая модель изолированного корпуса имела следующие основные характеристики:

- длина по ватерлинии, $L_{\text{КВЛ}} = 2,76$ м;
- ширина, $B = 0,276$ м;
- коэффициент полноты КВЛ, $\alpha = 0,472$.

Испытания проводились с моделью изолированного корпуса при трех значениях водоизмещения, которое было выражено через безразмерный коэффициент статической нагрузки C_B и вычислено по формуле

$$C_B = \frac{D}{B_{\text{ст}}^3}, \quad (1)$$

где D — объемное водоизмещение, м^3 ; B — ширина наибольшая, м; $B_{\text{ст}}$ — максимальная ширина корпуса по скуле, м.

Значения C_B были приняты $C_B = 1,40; 1,19; 1,06$.

Завершающим этапом испытаний были сравнительные испытания модели катамарана, оборудованного воздушной каверной, и высокоскоростного катамарана с обводами, спроектированными для переходного режима в диапазоне скоростей чисел Фруда по водоизмещению

$Fr_D = \frac{V}{\sqrt{g^3 \frac{D}{\rho_b}}} < 3,0$ (где V — скорость судна, м/с; D — массовое водоизмещение судна, т; $\rho_b = 1$ — плотность воды, $\text{т}/\text{м}^3$; $g = 9,81$ — ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$).

Результаты испытаний

Результаты проведенных испытаний позволили ответить на основные вопросы, которые стояли перед началом исследования о возможности создания эффективной каверны для корпусов с большим удлинением и влиянии скорости и статической нагрузки на изменение величины расхода газа, необходимого для создания каверны.

Испытания показали, что вне зависимости от значений скорости и водоизмещения на всех режимах можно выделить зону автомодельности, что ранее можно было наблюдать и при испытаниях однокорпусных судов. Вместе с тем, сравнение полученных результатов с испытаниями

моделей однокорпусных судов схожего водоизмещения [9], [10] показало, что создание воздушной каверны на днище изолированного корпуса катамарана требует большего расхода газа нежели создание каверны на днище однокорпусных судов такого же водоизмещения. Это связано с тем, что корпус катамарана имеет большее относительное удлинение L/B , вследствие чего каверна должна иметь большую длину.

Также следует заметить, что рост водоизмещения не приводит к значительному смещению начала зоны автомодельности. Так, на скорости $V = 4$ м/с (соответствовало для модели числу Фруда $Fr_D = 1,6$) зона автомодельности по расходу газа для представленных трех случаев статической нагрузки начиналась со значения $Q = 20$ м³/ч. График зависимости изменения обратного качества $\varepsilon = R/D$ от подаваемого в камеру каверны расхода газа Q при различных случаях статической нагрузки приведен на рис. 4.

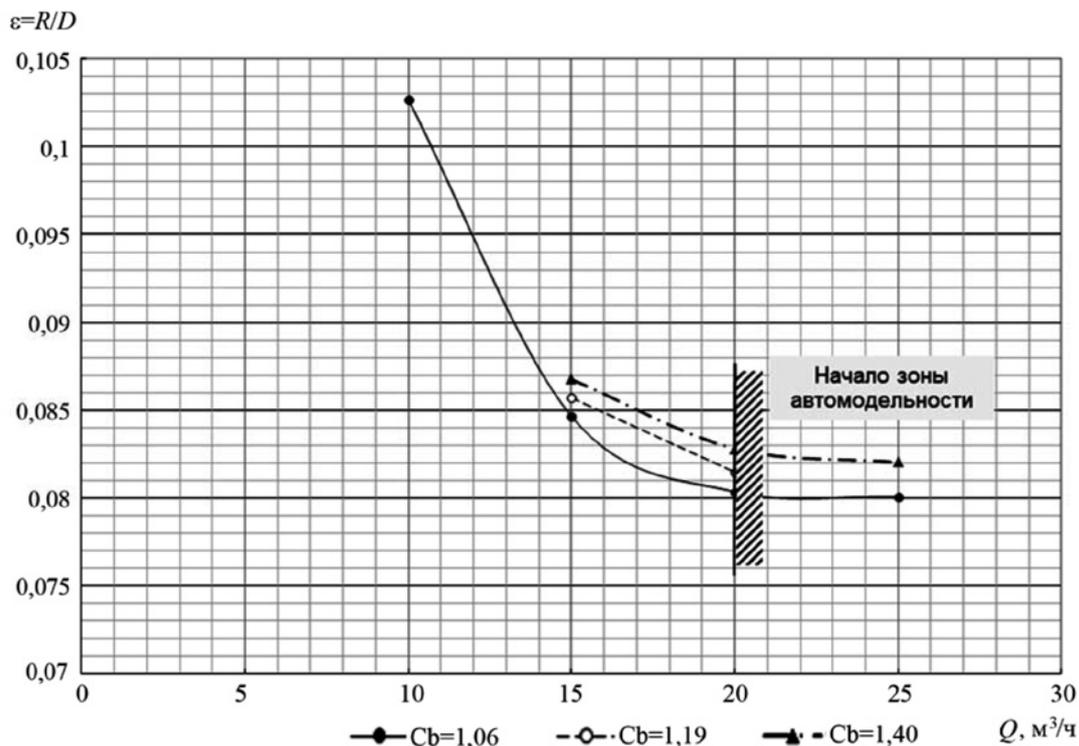


Рис. 4. Зависимость величины обратного гидродинамического качества ε от расхода газа Q (м³/ч) при различных случаях статической нагрузки C_B

Напротив, рост скорости судна приводит к увеличению расхода газа, необходимого для насыщения каверны и создания в ней избыточного давления p_k . Таким образом, с ростом скорости зона автомодельности наступает при больших значениях расхода газа Q . Графически зависимость изменения обратного качества $\varepsilon = R/D$ от подаваемого в камеру каверны расхода газа Q на различных скоростях изображена на рис. 5.

Приведенные результаты свидетельствуют о том, что при росте расхода Q величина $\varepsilon = R/D$ монотонно снижается, а давление в каверне монотонно растет. Увеличение скорости приводит к росту давления в камере каверны.

Сравнение результатов данных испытаний с буксировочными испытаниями изолированного корпуса скоростного катамарана равного водоизмещения [6] дает право говорить о возможности эффективного применения воздушной каверны на судах с большими удлинениями корпусов L/B , какими являются катамараны. Так, при скорости хода $Fr_D = 1,5$ выигрыш в сопротивлении по сравнению со своим «традиционным» аналогом составил $\delta = 12,9\%$, на скорости $Fr_D = 2,0$ $\delta = 18,8\%$, а при $Fr_D = 2,5$ $\delta = 24,8\%$.

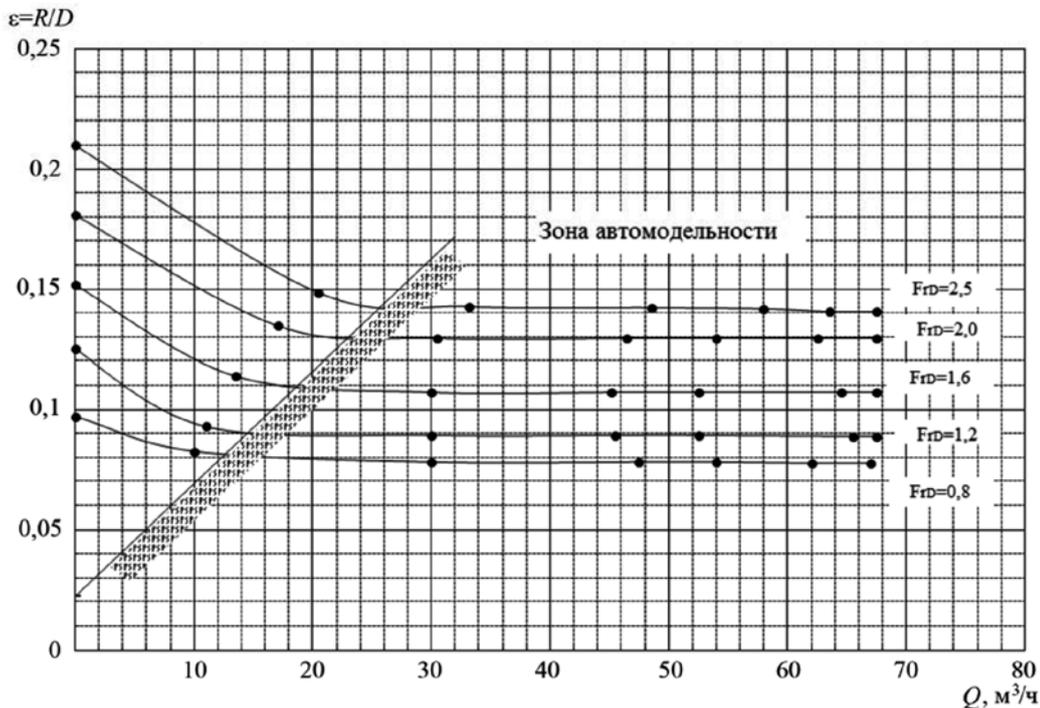


Рис. 5. Зависимость величины обратного гидродинамического качества ε от расхода газа Q ($\text{м}^3/\text{ч}$) при различных скоростях движения

Результаты сравнения представленного исследования и буксировочных испытаний изолированного корпуса высокоскоростного катамарана представлены на рис. 6.

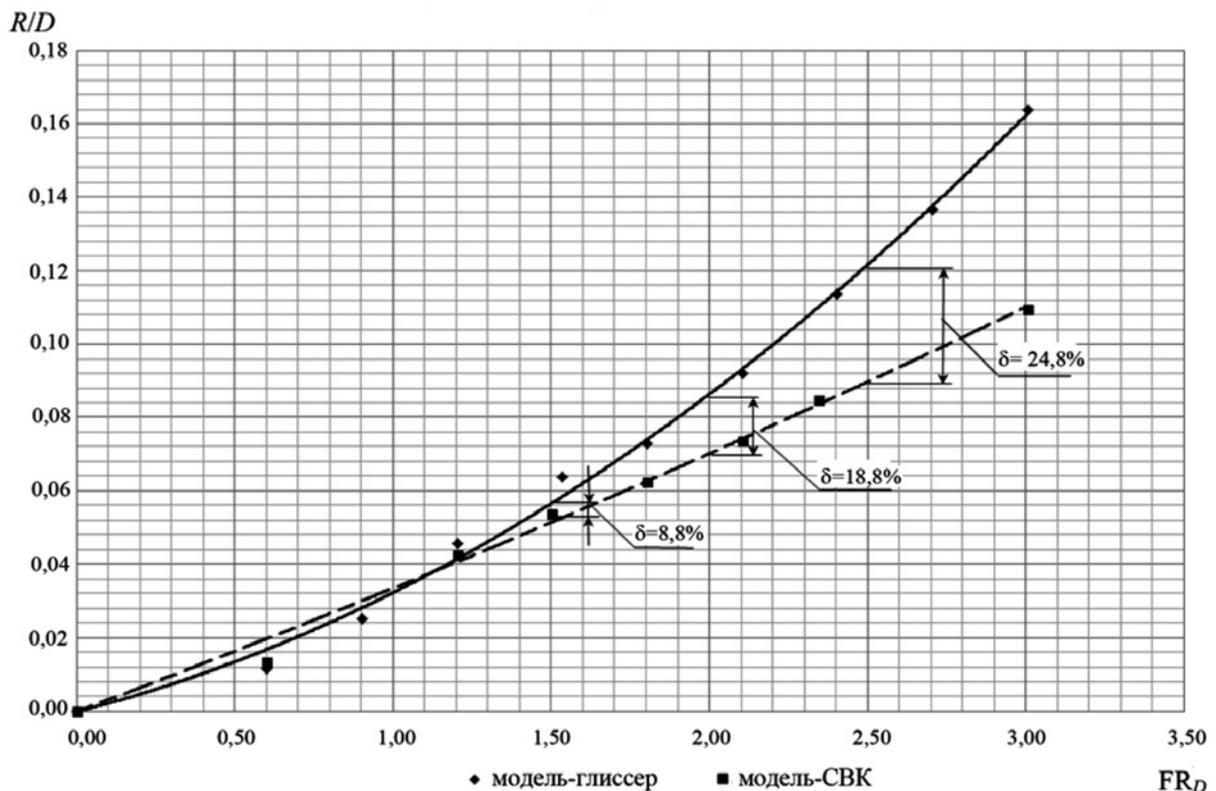


Рис. 6. Сравнительный график гидродинамического сопротивления для высокоскоростного катамарана и катамарана, оборудованного воздушной каверной

Заклучение

В данной статье представлены методика и результаты экспериментальных исследований по выбору оптимального расхода газа, необходимого для создания воздушной каверны на днище высокоскоростных катамаранов.

На основе предложенной в настоящей работе методики удалось количественно оценить картину насыщения искусственной каверны для высокоскоростных катамаранов и предсказать появление зоны автомодельности по расходу газа Q . Были установлены зависимости обратного гидродинамического качества $\varepsilon=R/D$ от расхода газа Q при изменении скорости V и статической нагрузки, представленной в виде безразмерного коэффициента C_B .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидродинамика и проектирование судов на воздушной каверне / В. М. Пашин, А. Н. Иванов, В. Г. Калужный [и др.] // 6-я междунар. конф. по судостроению, судоходству, оборудованию морских платформ и обеспечивающих их работу плавсредств, морская техника для освоения океана и шельфа. — СПб., 2001. — С. 127–129.
2. Крыжевич Г. Б. Новые конструкции реданов высокоскоростных судов / Г. Б. Крыжевич // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. — 2013. — № 75 (359). — С. 180–186.
3. Пустошный А. В. Искусственная кавитация и опыт ее применения в отечественном судостроении / А. В. Пустошный, А. А. Русецкий // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. — 2013. — № 73 (357). — С. 5–16.
4. Основные направления улучшения гидродинамических характеристик речных судов / А. В. Пустошный, А. А. Русецкий, В. А. Мацкевич [и др.] // Морской вестник. — 2007. — № 4. — С. 85–90.
5. Пустошный А. В. Исследование влияния параметров функций давления на широкополосный спектр / А. В. Пустошный, А. А. Коваль // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. — 2013. — № 73 (357). — С. 121–132.
6. Сверчков А. В. Экспериментальные исследования и проектные проработки по применению воздушных каверн на судах смешанного плавания / А. В. Сверчков, А. В. Пустошный, Ю. Н. Горбачев // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. — 2012. — № 69. — С. 23–38.
7. Влияние выбора модели турбулентности на точность расчета вязкостного сопротивления транспортных судов / Д. М. Денисихина, М. П. Лобачев, А. В. Пустошный [и др.] // Морской вестник. — 2008. — № 3. — С. 95–100.
8. Аносов В. Н. Влияние характеристик бортовых искусственных каверн на сопротивление движению быстроходных судов / В. Н. Аносов // Судостроение. — 2008. — № 3. — С. 23–26.
9. Dubrovskiy V. A. Multi-Hull Ships / V. A. Dubrovskiy, A. G. Lyakhovitsky. — USA: Backbone Publishing Co., 2001. — 495 p.
10. Ляховицкий А. Г. Скоростные пассажирские суда: проектные характеристики и тенденции развития / А. Г. Ляховицкий, Тхун Йин // Морской вестник. — 2008. — № 2. — С. 19–22.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE INFLUENCE OF THE GAS FLOW FOR CREATION OF THE AIR CAVITY ON THE BOTTOM OF CATAMARANS

It is shown one of the ways of the immense letdown shock wave drug to the displacement of a high speed vessel. It is elicited quintessential factors, affecting on the magnitude of vessels' traveling resistance on an airy blowing hole (VABH). One of the significant factors affecting the efficient operation of the VABH, is the minimum possible consumption of energy expended on air delivery and maintenance of overpressure in the chamber cavity. In this regard, was formulated and empirically solved the problem of finding the optimal gas flow to create a cavity. Shown the technique of carrying out of experiment on finding the optimal gas flow to create a cavity. Shows the experimental results of solving the problem of finding the optimal value of the flow Q to create an air cavity on the bottom of the high-speed catamaran. The dependences of the gas flow at different speeds and different displacements of the vessel. A comparative analysis of the magnitude of the towing resistance of the insulated housing of the catamaran, equipped with an air cavity, and the housing of the high-speed catamaran.

Key words: airy blowing hole optimization of gas flow, the zone of self-similarity, the towing resistance, high-speed catamaran.

REFERENCES

1. Pashin, V. M., A. N. Ivanov, V. G. Kaljuzhnyj, A. V. Sverchkov, A. G. Ljahovickij, and G. A. Pavlov. "Gidrodinamika i proektirovanie sudov na vozdušnoy kaverne." 6 *Mezhdunarodnaja konferencija po sudostroeniju, sudohodstvu, oborudovaniju morskikh platform i obespechivajushhih ih rabotu plavstredstv, morskaja tehnika dlja osvoenija okeana i shelfa (Neva 2001)*. SPb., 2001:127-129.
2. Kryzhevich, G. B. "New step structures for high-speed fast speeds vessels." *Trudy CNII im. akad. A. N. Krylova* 75(359) (2013): 180-186.
3. Pustoshnyj, A. V., and A. A. Ruseckij. "Artificial cavitation and experience of its application in domestic shipbuilding." *Trudy CNII im. akad. A. N. Krylova* 1.73(357) (2013): 5-16.
4. Pustoshnyj, A. V., A. A. Ruseckij, V. A. Mackevich, A. V. Sverchkov, and M. A. Mavljudov. "Basic trends in improving the hydrodynamic characteristics of river-type ships." *Morskoj vestnik* 4 (2007): 85-90.
5. Pustoshnyj, A. V., and A. A. Koval. "Studies of the effect of pressure function parameters on the broadband spectrum." *Trudy CNII im. akad. A. N. Krylova* 1.73(357) (2013): 121-132.
6. Sverchkov, A. V., A. V. Pustoshnyj, and Ju. N. Gorbachev. "Jeksperimentalnye issledovanija i proektnye prorabotki po primeneniju vozdušnyh kavern na sudah smeshannogo plavanija." *Trudy CNII im. akad. A. N. Krylova* 69 (2012): 23-38.
7. Denisihina, D. M., M. P. Lobachev, A. V. Pustoshnyj, and I. A. Chicherin. "Influence of a choice of a turbulence model on an accuracy of calculation of viscosity resistance of transport vessels." *Morskoj vestnik* 3 (2008): 95-100.
8. Anosov, V. N. "The influence of board artificial cavities on high-speed vessel running resistance." *Sudostroenie* 3 (2008): 23-26.
9. Dubrovskiy, V. A., and A. G. Lyakhovitsky. *Multi-Hull Ships*. USA: Backbone Publishing Co., 2001.
10. Ljahovickij, A. G., Thun Jin. "Fast passenger ships: design characteristics and tendencies of development." *Morskoj vestnik* 2 (2008): 19-22.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Метелица Сергей Сергеевич –
аспирант.
Нижегородский Государственный Технический
Университет им. Р. Е. Алексеева
Научный руководитель:
Грамузов Евгений Михайлович,
доктор технических наук, профессор
meteserg@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Metelitsa Sergei Sergeevich –
postgraduate student.
Nizhny Novgorod State Technical
University n.a. R.E. Alekseev
Supervisor:
Gramuzov Evgeniy Mihajlovich —
Doctor of Engineering, professor
meteserg@yandex.ru

УДК 631.717

В. А. Куликов

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОГРАММНЫМИ СРЕДСТВАМИ СЛУЧАЙНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ В СУДОСТРОЕНИИ

Размерный контроль деталей в судовом машиностроении в реальных условиях всегда сопровождается ошибками в разбраковке деталей, отрицательно сказывающимися как на качестве деталей и соединений, так и на экономической эффективности производства. Количественно эти ошибки характеризуются так называемыми параметрами разбраковки, значение которых определяется погрешностью измерения. Важно обнаружить и оценить случайную составляющую погрешности измерения. Стандарт