

DOI 10.15589/jnn20160206
УДК 629.5(012+016+017):532
ПЗ1

THE METHOD OF OPTIMUM FORESHIP TRANSFORMATION IN THE PROBLEM OF TOTAL RESISTANCE DECREASING IN THE STILL WATER

МЕТОД ОПТИМАЛЬНОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ НОСОВОЙ ЧАСТИ СУДНА В ЗАДАЧЕ СНИЖЕНИЯ ПОЛНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЕГО ДВИЖЕНИЮ НА ТИХОЙ ВОДЕ

Andriy V. Pechenyuk
anpech@gmail.com
ORCID: 0000-0001-9944-4864

А. В. Печенюк
соискатель

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев

Abstract. The purpose of this study is development of the method of optimum foreship transformation of the displacement ships for decreasing their total still water resistance. The method is designed to actively use CFD methods for the towing resistance evaluation. The comprehensive method of optimum foreship transformation includes the methodic of numerical CFD simulation, the model of systematic hull transformations and the method of resistance decreasing. The method of optimum foreship transformation was applied to the investigated ships and showed significant decrease in towing resistance. Results concerning one of the two ships were also validated by experimental results obtained in ship model basin. The new scientific principle was formulated, wherein the effect of a foreship form on wave resistance is determined by dependence of the local prismatic coefficient versus longitudinal coordinate in relation to the length of transverse wave. Obtained results can be effectively used in ship design for improving transportation efficiency and economy. They allow significant simplification and formalization of the design search for optimum foreship form providing minimum ship total resistance in still water.

Keywords: hull lines improvement; hull form optimization; displacement ship total still water resistance; hull flow simulation; decrease of towing resistance.

Аннотация. Разработан комплексный метод оптимальной трансформации носовой части судна, который включает методику численного моделирования, модель систематических трансформаций корпуса и метод снижения сопротивления. Применение метода к носовым частям двух судов-объектов позволило значительно снизить буксировочное сопротивление. Результаты по одному из объектов были подтверждены с помощью экспериментов в опытовом бассейне. Было сформулировано новое научное положение: влияние формы носовой части на сопротивление судна определяется зависимостью локального коэффициента продольной полноты от продольной координаты, отнесенной к длине поперечной волны.

Ключевые слова: совершенствование обводов; оптимизация формы корпуса; полное сопротивление водоизмещающего судна на тихой воде; численное моделирование обтекания корпуса; снижение буксировочного сопротивления.

Анотація. Розроблений комплексний метод оптимальної трансформації носової частини судна, що включає методику чисельного моделювання, модель систематичних трансформацій корпусу та метод зниження опору. Застосування метода оптимальної трансформації до носових частин двох суден-об'єктів дозволило суттєво знизити їх буксирувальний опір. Результати по одному з об'єктів були підтверджені результатами експериментів в опитовому басейні. Сформульоване нове наукове положення, згідно до якого вплив форми носової частини на опір судна визначається залежністю локального коефіцієнта повздовжньої повноти від повздовжньої координати, що віднесена до довжини поперечної хвилі.

Ключові слова: вдосконалення обводів; оптимізація форми корпусу; повний опір водотоннажного судна на тихій воді; чисельне моделювання обтікання корпусу; зниження буксирувального опору.

REFERENCES

- [1] Davydov I. F., Demidyuk A. V., Pechenyuk A. V. Experimental investigation of the improved hull lines for the slow-speed vessel with high block coefficient. Shipbuilding and Marine Infrastructure, 2015, no 2 (4), pp. 109–115.

- [2] *Issledovanie khodovykh kachestv sukhogruznogo sudna smeshannogo reka-more plavaniya dedveytom 7000 tonn* [The research of the propulsion qualities of the river-sea dry-cargo vessel 7000 DWT]. *TsNII im. akad. A. N. Krylova; ruk. Kanevskiy G. I.* [Krylov Central Research Institute; dir. Kanevskiy G.I.]. — St. Petersburg, 2009, issue 43433, 53 p.
- [3] Sizov V. G. *Ob odnom sposobe uluchsheniya formy sudna* [About a method of ship form improvement]. *Visnyk ONMU: zbirnyk naukovykh prats* [Bulletin of ONMU: digest of the scientific works]. Odesa, 2006, issue 19, pp. 14–19.
- [4] Larsson L., Stern F., Bertram V. Benchmarking of computational fluid dynamics for ship flow: the Gothenburg 2000 Workshop. *J. Ship Res.* 2003, vol. 47, pp. 63–81.
- [5] Larsson L., Stern F., Visonneau M. CFD in ship hydrodynamics — results of the Gothenburg 2010 workshop. *Proc. of the IV International Conference on Computational Methods in Marine Engineering. Barcelona (Spain) : CIMNE*, 2011, pp. 17–36.
- [6] Larsson L., Raven H. C. *Ship Resistance and Flow*. Jersey City (USA): SNAME Publ., 2010. 230 p.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Форма корпуса является ключевым элементом в составе пропульсивного комплекса судна. Снижение сопротивления корпуса непосредственно конвертируется в экономию топлива, следовательно, ведет к повышению проектных показателей и экономической эффективности. Однако вопросы проектирования и совершенствования обводов в современной практике слабо обобщены и формализованы. Они решаются с помощью комбинации научных знаний, инженерного опыта и критериев из области искусства.

Научная проблема, связанная с оптимизацией формы корпуса, в первую очередь обусловлена недостаточной изученностью влияния формы корпуса на его буксировочное сопротивление.

В настоящей работе предложен метод, позволяющий изучать влияние формы корпуса водоизмещающих судов на сопротивление движению на систематической основе. Внимание в работе уделено только обводам носовой части.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Анализ опубликованных материалов, среди которых можно выделить современную обзорную работу [6], показал, что в исследуемой области применяются экспериментальные, теоретические и численные методы. Однако методика, позволяющая проводить детальное проектирование судовой поверхности, по настоящее время не разработана, а наиболее корректный подход к ее разработке был использован в теоретическом методе В. Г. Сизова [3]. В более поздних работах, в основном предусматривающих оценку буксировочного сопротивления с помощью экспериментальных или численных методов, не применялась более совершенная методологическая база.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ — разработка метода определения оптимальной трансформации носовой части водоизмещающих судов с целью снижения сопротивления их движению.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

На основе анализа состояния проблемы была принята следующая постановка ее исследования: 1) фиксация неизменных главных размерений и их соотношений, включая величину водоизмещения, а также контура диаметральной плоскости (ДП); 2) удельное сопротивление R/∇ служит критерием, который применяется как к корпусу в целом, так и к локальным участкам его поверхности в соответствии с концепцией метода В. Г. Сизова; 3) локальные участки корпуса трансформируются с помощью модели систематических трансформаций (МСТ), что сопровождается варьированием распределения водоизмещения корпуса; 4) оценка влияния трансформаций корпуса на его буксировочное сопротивление выполняется с помощью численных методов; 5) поиск оптимальной конфигурации трансформаций корпуса осуществляется с помощью специально разработанного метода снижения сопротивления.

Для выполнения численного моделирования обтекания судового корпуса с целью получения его сопротивления и других буксировочных характеристик была разработана специальная методика создания и расчета проекта, которая включает рекомендации по следующим действиям: 1) формирование физической модели проекта; 2) постановка задачи численного моделирования; 3) контроль выполнения расчета.

В качестве рациональной постановки задачи численного моделирования буксировки была принята схема гидрлотка, в котором модель судна обтекается обращенным потоком жидкости. Геометрия расчетной области (РО) представляет собой прямоугольный параллелепипед, разбитый на грани в соответствии со схемой расстановки граничных условий. Исследование вопроса о влиянии размеров РО показало, что ее поперечные размеры могут быть назначены согласно рекомендациям по проведению модельных испытаний. Для длины РО предложены следующие рекомендации (L, B, T — главные размерения судна): участок за кормой модели судна $l_A \geq L$; участок перед носом модели судна $l_F \geq 10\sqrt{BT}$.

Расчетные сетки строились на основе прямоугольных неравномерных начальных сеток. Наиболее мелкие ячейки начальной сетки были сгруппированы у оконечностей судов, где наблюдаются максимальные перепады давления, а также в районе свободной поверхности, где формируется система корабельных волн. Для выбора параметров расчетной сетки, обеспечивающих желаемый баланс между точностью и затратами вычислительных ресурсов, в рамках исследования эталонных судов выполнялся анализ сходимости по сетке. Сходимость по сетке рассматривалась как зависимость буксировочного сопротивления от числа расчетных ячеек.

Для обоснования параметров методики использовались данные расчетов, выполненных автором для 47 проектируемых и модернизируемых судов, для 10 из которых имелись результаты модельных испытаний, для 25 — приемно-сдаточных испытаний. В качестве эталонных объектов для тестирования методики были приняты два судна, по которым имелись весьма надежные экспериментальные данные: контейнеровоз KCS, предложенный на международном семинаре «Гётеборг-2000» [4] для тестирования численных методов, а также полное и тихоходное судно смешанного плавания (ССП), по которому экспериментальные данные были получены в большом глубоководном бассейне Крыловского государственного научного центра [2]. Основные характеристики эталонных объектов представлены в табл. 1.

Согласно полученным результатам, относительная погрешность по сравнению с надежными результатами экспериментов составила для СПП –0,2%, для судна KCS +0,7% для модели, закрепленной в начальном положении, и +4,3% для модели со свободной посадкой (+1,4% при $F_r > 0,26$). Указанные погрешности отвечают современному мировому уровню точности численных методов, который был оценен по итогам международного семинара «Гетеборг-2010» [5].

При неизменности главных размерений, их соотношений и контура ДП, форму обводов определяют характеристики продольного и вертикального

распределения полноты. Вертикальное распределение не имеет оптимума по волновому сопротивлению, которое является основным активным компонентом, особенно в отношении формы носовой части. Поэтому в основу МСТ положена декомпозиция влияния вертикального и продольного распределения полноты, и варьирование только последнего. Предлагается выражать его с помощью *локального коэффициента продольной полноты* K_{PE} , не зависящего от общей полноты обводов:

$$K_{PE}(x) = \frac{\int_0^x A_F(x) dx}{x \cdot A_F(x)}, \quad (1)$$

где $A_F(x)$ — площадь шпангоута с абсциссой x .

Варьирование функции (1) предусмотрено путем модификации участков безразмерной строевой по шпангоутам. Модификация участка дает вариант строевой с положительным или отрицательным приращением водоизмещения δV . Комбинируя модификации на разных участках, можно составить множество строевых, которые отличаются от исходной и отвечают условию постоянства водоизмещения.

Для трансформации судовой поверхности в соответствии с различными вариантами строевой предложено распределять площади шпангоутов по высоте способом аффинного преобразования — *базовая* МСТ, либо с помощью усовершенствованного способа, представляющего собой комбинацию аффинного преобразования и сдвига, — *расширенная* МСТ. На практике трансформации реализованы в виде 3D моделей корпусов с помощью специально разработанных автором средств графической САПР T-FLEX.

МСТ позволяет реализовать традиционный оптимизационный подход, требующий изучения большого числа вариантов, которое при простом переборе двух параметров n и p (n — число участков, p — число вариантов строевой на каждом участке) достигает максимального значения p^n . Высокие требования к вычислительным ресурсам, которые характерны для задачи численного моделирования обтекания корпуса в настоящее время, не позволяют выполнять подобные объемы расчетов в приемлемые сроки.

Для подготовки более эффективного метода снижения сопротивления был выполнен анализ процессов в обтекающем корпус потоке, сопровождающих изменения в геометрии. Анализ показал, что наибольшее влияние оказывают процессы в системе корабельных волн, которые подчиняются принципу интерференции. На этом основании была сформулирована *гипотеза* о независимости влияния разных участков корпуса по длине на буксировочное сопротивление. Гипотеза используется при обработке результатов моделирования, в которой суммарный эффект от трансформаций на полное сопротивление прогнозируется

Таблица 1. Основные характеристики эталонных судов

Характеристики объектов	KCS	ССП
Длина по ватерлинии L_{wl} , м	232,1	137,8
Ширина B , м	32,2	16,5
Высота борта D , м	19,0	6,0
Осадка d , м	10,8	4,6
Водоизмещение объемное ∇ , м ³	52030,0	9325,8
Площадь смоченной поверхности S , м ²	9424,0	3271,6
Коэффициент общей полноты C_B	0,651	0,892
Относительная абсцисса ЦВ L_{CB} (%), в нос «+»	–1,48	+1,23
Расчетный диапазон чисел Фруда	0,17–0,28	0,14–0,18

как суперпозиция эффектов всех участков. Этим путем, число вариантов, которое необходимо исследовать, снижается до величины $(pn+1)$, включая проверочный расчет корпуса с усовершенствованными обводами.

Результаты расчетов для каждого из участков представляются в виде непрерывной зависимости приращения сопротивления от приращения объема $\delta R = f(\delta V)$. Текущие значения δV_i являются варьируемыми параметрами. Оптимальная комбинация параметров, соответствующая усовершенствованным обводам, отвечает целевой функции:

$$Z = \min \left(\sum_{i=1}^n \delta R_i(\delta V_i) \right). \quad (2)$$

Условие постоянства водоизмещения отвечает функции ограничения:

$$\sum_{i=1}^n \delta V_i = 0. \quad (3)$$

Для поиска оптимума выполняется аппроксимация входящей в (2) зависимости $\sum \delta R_i(\delta V_i)$, составленной из значений, удовлетворяющих условию (3). Анализ аппроксимирующей функции позволяет найти ее минимум. Значения δV_i , соответствующие минимуму сопротивления, используются для построения теоретического корпуса с усовершенствованными обводами. Этот корпус затем можно принимать в качестве исходного и повторять последующие процедуры до тех пор, пока будет существовать возможность снижения сопротивления.

Метод оптимальной трансформации носовой части судна был применен к носовым обводам двух эталонных судов, которые существенно отличаются друг от друга по форме корпуса и скоростному режиму (табл. 1). Для ССП при $Fr = 0,18$ снижение буксировочного сопротивления составило 4,1% (за счет перераспределения водоизмещения в носовой части)

и 5,6% (за счет установки бульбовой наделки). Для судна KCS при $Fr = 0,28$ выигрыш в буксировочном сопротивлении составил 8,9%. Точность прогноза снижения сопротивления, выполненного на базе гипотезы о независимости влияния участков, составила для ССП 79%, для KCS 73%. Визуализация волновых систем показала, что снижение сопротивления сопровождается заметным ослаблением поперечных волн и усилением расходящихся. Пример представлен на рис. 1, в выделенной рамкой области.

Для проверки адекватности и эффективности метода оптимальной трансформации носовой части судна было выполнено специальное экспериментальное исследование [1] в опытовом бассейне Одесского национального морского университета (ОНМУ), в котором использовалась модель ССП рассмотренного типа. В результате было получено снижение буксировочного сопротивления моделей с носовыми частями, форма которых оптимизирована с помощью метода, на величины, исключающие возможность заметного влияния погрешности эксперимента, которая была получена с помощью специальной оценки. Также была подтверждена основная роль продольного перераспределения водоизмещения в снижении буксировочного сопротивления.

Результаты оптимизации формы носовых частей изученных объектов представляют как практический, так и теоретический интерес. Сопоставление зависимостей $K_{pe}(x)$ носовых частей объектов показало, что после оптимизации они приобрели подобный характер. Анализ волновых систем позволил сделать предположение о том, что отличия, связанные со скоростным режимом Fr , приводят в основном к сжатию или растяжению указанных зависимостей вдоль продольной оси. При выборе в качестве продольной координаты длины поперечной волны λ_w отличия в характере кривых минимальны — рис. 2. На этой основе в виде гипотезы было сформулировано следующее *научное*

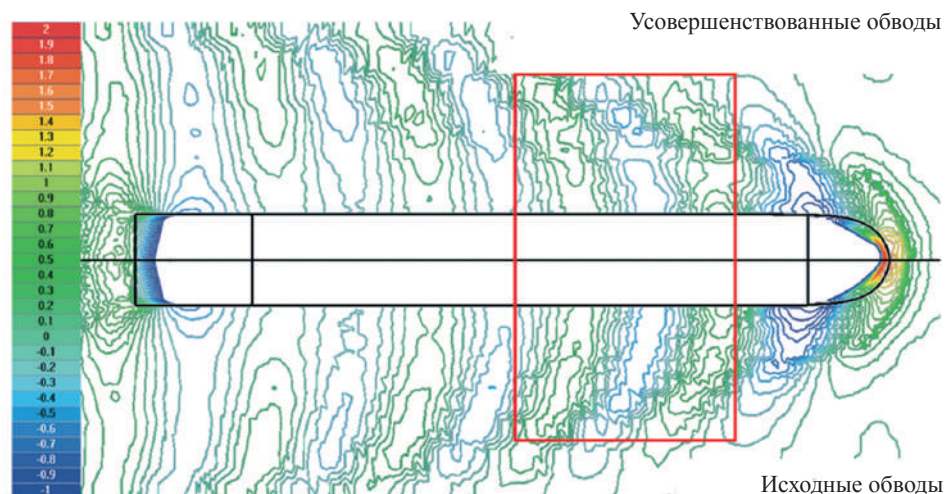


Рис. 1. Визуализация свободной поверхности изолиниями уровня (шкала в м) для ССП при $Fr = 0,18$

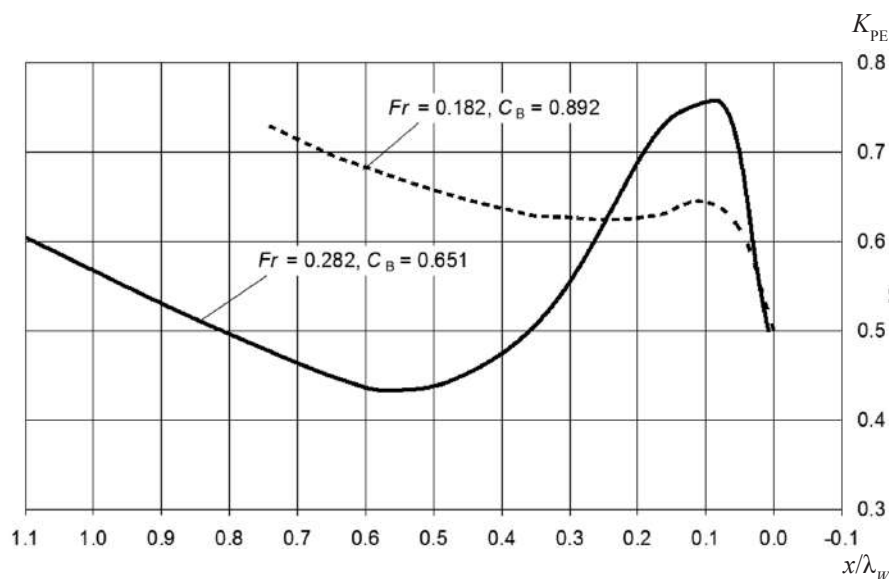


Рис. 2. Зависимости $K_{PE}(x/\lambda_W)$ оптимизированных носовых частей объектов:
 ---- — ССП; — — КС

положение: влияние формы носовой части на волновое сопротивление судна определяется зависимостью локального коэффициента продольной полноты K_{PE} от продольной координаты x , отнесенной к длине поперечной волны λ_W .

ВЫВОДЫ. Актуальная задача снижения сопротивления движению судов решена путем создания комплексного метода оптимальной трансформации носовой части водоизмещающих судов, который отличается от известных ранее, декомпозицией продольного и вертикального распределения полноты судовой поверхности, и установлении зависимостей влияния распределения полноты на буксировочное сопротивление судна. Получены следующие новые результаты:

1. Усовершенствована методика численного моделирования процесса обтекания судовых корпусов путем включения в нее рекомендаций по назначению продольных размеров расчетной области для судна заданных главных размерений, а также по формированию областей концентрации ячеек прямоугольной расчетной сетки, разрешающей обтекающий судовой корпус поток. Усовершенствования методики, выполненные на основе систематизации параметров и результатов произведенного моделирования обтекания корпусов 47 судов различной формы и скоростных режимов движения, обеспечили выполнение расчетов буксировочного сопротивления эталонных судов с точностью, соответствующей уровню современных мировых стандартов в сравнении с надежными данными экспериментальных исследований.

2. Впервые предложена математическая модель систематических трансформаций формы корпуса,

основополагающим принципом которой явилось использование локального коэффициента продольной полноты в качестве характеристики продольного распределения водоизмещения. Модель осуществляет варьирование величины и продольного распределения водоизмещения носовой части корпуса путем изменения ограниченных участков ее поверхности, что позволяет исследовать тонкие эффекты влияния относительно малых трансформаций судовой поверхности на буксировочное сопротивление, при которых изменения водоизмещения составляют порядка десятых долей процента.

3. На базе предложенной модели систематических трансформаций разработан метод снижения сопротивления движению судна, в основу которого впервые введено предположение о независимости влияния формы разных участков носовой части корпуса, выделенных по длине судна, на его буксировочное сопротивление. Метод обеспечивает надежную оценку влияния трансформаций судовой поверхности на буксировочное сопротивление и позволяет определять комбинацию трансформаций, соответствующую оптимальной форме носовой части по критерию минимального удельного сопротивления корпуса судна.

4. Получило дальнейшее развитие исследование задачи о влиянии формы судового корпуса на его буксировочное сопротивление на основе анализа результатов применения метода к двум разным по характеру обводов и скоростному режиму судам, которые были подтверждены для одного из них специальным экспериментальным исследованием в опытовом бассейне. Согласно данным выполненных исследований, продольное перераспределение водоизмещения в носовой

вой части судов является главным фактором в снижении их буксировочного сопротивления.

5. В результате обобщающего анализа усовершенствованных с помощью метода носовых обводов судов впервые установлено, что влияние формы носовой части на волновое сопротивление судна определяется зависимостью локального коэффициента

продольной полноты от продольной координаты, отнесенной к длине поперечной волны. Использование указанной зависимости способствует упрощению и формализации задачи поиска формы носовой части, обеспечивающей минимальное полное сопротивление судна.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Давыдов, И. Ф.** Экспериментальное исследование усовершенствованных обводов для тихоходного судна большой полноты [Текст] / И. Ф. Давыдов, А. В. Демидюк, А. В. Печенюк // Shipbuilding and Marine Infrastructure, 2015. — № 2 (4). — С. 109–115.
- [2] Исследование ходовых качеств сухогрузного судна смешанного река-море плавания дедвейтом 7000 тонн [Текст] : отчет о НИР (заключит.) / ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова; рук. Каневский Г. И. — СПб, 2009. — 53 с. — Выпуск № 43433.
- [3] **Сизов, В. Г.** Об одном способе улучшения формы судна [Текст] / В. Г. Сизов // Вісник ОНМУ. — Одеса : ОНМУ, 2006. — Вип. 19. — С. 14–19.
- [4] **Larsson, L.** Benchmarking of computational fluid dynamics for ship flow: The Gothenburg 2000 Workshop [Text] / Larsson L., Stern F., Bertram V. // J. Ship Res. — 2003. — Vol. 47. — P. 63–81.
- [5] **Larsson, L.** CFD in ship hydrodynamics — results of the Gothenburg 2010 workshop [Text] / Larsson L., Stern F. and Visonneau M. // Proc. of the IV International Conference on Computational Methods in Marine Engineering — Barcelona (Spain): CIMNE, 2011. — P. 17–36.
- [6] **Larsson, L.** Ship Resistance and Flow [Text] / L. Larsson, H. C. Raven. — Jersey City (USA): SNAME, 2010. — 230 p.

© А. В. Печенюк

Надійшла до редколегії 15.03.2016
Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. *В. О. Нєкрасов*