

DOI 10.15589/jnn20160301
УДК 629.5.(012+016+017):532
Д13

ABOUT PRACTICAL SIGNIFICANCE AND RELIABILITY OF THE RESULTS OBTAINED BY THE METHOD OF OPTIMUM FORESHIP TRANSFORMATION

О ПРАКТИЧЕСКОЙ ЗНАЧИМОСТИ И ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ОПТИМАЛЬНОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ НОСОВОЙ ЧАСТИ СУДНА

Ihor P. Davydov
davydov_mob@mail.ru
ORCID: 0000-0000-0000-0000

Andriy V. Pechenyuk
anpech@gmail.com
ORCID: 0000-0003-3315-5132

И. Ф. Давыдов,
канд. техн. наук, доц.¹

А. В. Печенюк,
соискатель²

¹*National University «Odessa Maritime Academy», Odessa*
²*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*

¹*Одесская национальная морская академия, г. Одесса*

²*Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев*

Abstract. Optimization of hull lines for the minimum total still water resistance is a problem of current interest in ship hydrodynamics. The purpose of this study is analysis of the practical significance and the reliability of results obtained by the method of optimum foreship transformation. The method is designed to actively use CFD technologies for the towing resistance evaluation. The method was applied to the foreships of two investigated ships and showed significant decrease in towing resistance. Results concerning one of the two ships were also validated with the help of special experimental research in ship model basin. The obtained data concerning optimum foreship form can be effectively used in the designs of new-built and modernized ships of the considered types for decrease of towing resistance, improving transportation efficiency and economy. The reliability of the represented results is grounded by their correspondence to the well-known scientific data and regularities. Thus the method of optimum foreship transformation can be used in practical ship design for significant improvement of the propulsion qualities.

Keywords: hull lines improvement, hull form optimization, displacement ship resistance, decrease of towing resistance.

Аннотация. Цель настоящего исследования заключается в анализе практической значимости и достоверности результатов, полученных с помощью метода оптимальной трансформации носовой части судна. Применение метода к носовым частям двух судов-объектов позволило значительно снизить их буксировочное сопротивление. Результаты по одному из объектов были подтверждены с помощью специального эксперимента в опытовом бассейне. Полученные данные об оптимальной форме обводов имеют практическое значение для проектирования новых и модернизации существующих судов рассмотренных типов с минимальным буксировочным сопротивлением. Достоверность результатов обоснована их качественным соответствием известным данным и закономерностям.

Ключевые слова: совершенствование обводов; оптимизация формы корпуса; сопротивление водоизмещающего судна; снижение буксировочного сопротивления.

Анотація. Ціль даного дослідження полягає в аналізі практичної значимості і достовірності результатів, які отримані за допомогою метода оптимальної трансформації носової частини судна. Застосування метода до носових частин двох суден-об'єктів дозволило суттєво знизити їх буксирувальний опір. Результати по одному з об'єктів були підтвержені за допомогою спеціального експерименту в опитовому басейні. Отримані дані про оптимальну форму обводів мають практичне значення для проектування нових та модернізації існуючих суден розглянутих типів з мінімальним буксирувальним опором. Достовірність результатів обґрунтована їх якісною відповідністю відомим даним та закономірностям.

Ключові слова: вдосконалення обводів; оптимізація форми корпусу; опір водотоннажного судна; 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] Yegorov G. V., Tonyuk V. I., Stankov B. N., Pechenyuk A. V. *Issledovaniya khodkosti sudna smeshannogo reka-more plavaniya s predelno vysokim koeffitsientom obshchey polnoty* [Propulsion researches of the river-sea vessel with extremely high block coefficient]. *Materialy III mezhdun. nauchno-tekhn. konf. «Innovatsii v sudostroenii i okeanotekhnike»* [Proc. of the 3rd int. sc. and tech. conf. «Innovations in Shipbuilding and Ocean Technology»]. *Natsionalny universitet korablestroeniya* [National University of Shipbuilding]. Mykolaiv, 2012, pp. 92–93.
- [3] Pechenyuk A. V. *O povyshenii effektivnosti propulsivnogo kompleksa putem sovershenstvovaniya formy nosovoy okonechnosti sudna* [About increasing in efficiency of a propulsion complex by means of bow form improvement]. *Sudovye energeticheskie ustanovki* [Marine Engine Plants]. Odessa, 2014, no 34, pp. 87–97.
- [4] Aksenov A. A., Zhluktov S. V., Petrov A. S. et al *Programmnyy kompleks FlowVision kak sovremennyy instrument proektirovaniya sudovykh obvodov* [Software complex FlowVision as the modern tool for designing hull lines]. *Sudostroenie* [Shipbuilding]. St. Petersburg, 2013, no 4, pp. 27–31.
- [5] *Sayt MIB* [MEB website]. Available at: <http://www.meb.com.ua/>.
- [6] Sizov V. G. *Metod proektirovaniya formy korablya naivysshikh propulsivnykh kachestv* [Design method of the ship hull form with the maximum propulsive qualities]. PhD-thesis — *Odesskiy institut inzhenerov morskogo flota* [Odessa Institute of the Maritime Engineers]. Odessa, 1948. 120 p.
- [7] Sizov V. G. *Ob odnom sposobe uluchsheniya formy sudna* [About a method of ship form improvement]. *Visnyk ONMU: zbirnyk naukovykh prats* [Bulletin of ONMU: collection of the scientific publications]. Odessa, 2006, issue 19, pp. 14–19.
- [8] Stankov B. N., Pechenyuk A. V. *Optimizatsiya sudovykh obvodov: novye vozmozhnost* [Optimization of the ship hull lines: the new opportunities]. *Sudostroenie* [Shipbuilding]. St. Petersburg, 2015, no 3, pp. 15–19.
- [9] 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.
- [10] Haichao C., Xide C., Zuyuan L., Baiwei F., Chengsheng Z. Sample selection method for ship resistance performance optimization based on approximated model. *Ship Res.*, New York, 2016, vol. 60, no 1, pp. 1–13.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Влияние формы корпуса на сопротивление и ходовые качества напрямую сказывается на основных технико-эксплуатационных и экономических показателях судна, включая провозоспособность и энергоэффективность. Поэтому совершенствование обводов на начальных этапах проектирования имеет большое практическое значение. Именно обеспечение наилучших ходовых качеств является одним из приоритетных запросов судовладельца, который обычно строго

оформляется контрактом на судно в виде требования к сдаточной скорости.

Новый метод оптимальной трансформации носовой части судна [1] был успешно применен к двум судам с разными формами обводов и относительными скоростями. В результате были получены технические решения, заключающиеся в перепроектировании или модернизации теоретической поверхности носовой части корпуса, позволяющие существенно снизить буксировочное сопротивление судов.

В настоящей статье выполнен анализ практической значимости полученных результатов и сделана попытка обоснования их достоверности.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

По вопросам оптимизации формы корпуса опубликован весьма большой объем работ, в которых использовались экспериментальные, теоретические и численные методы гидродинамики. В экспериментальных и численных исследованиях постановка задачи оптимизации, как правило, сводится к последовательной отработке вариантов обводов методом проб и ошибок (например, [4]). В последнее время, благодаря практическим преимуществам численных методов, появились работы [10], в которых оптимизация с их использованием осуществляется на базе методов математической статистики. В обоих случаях одной из основных проблем является отсутствие четких критериев, по которым можно было бы надежно судить о достижении оптимума. Такой критерий был впервые предложен в теоретической работе [6] (см. также [7]), и использован в рассматриваемом методе оптимальной трансформации носовой части судна.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ — анализ практической значимости и достоверности результатов, полученных с помощью метода оптимальной трансформации носовой части судна.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Метод оптимальной трансформации носовой части судна был применен к носовым обводам двух судов, которые существенно отличаются друг от друга по форме корпуса и скоростному режиму (табл. 1): полному и тихоходному судну смешанного плавания (ССП) класса «Волго-Дон макс» и контейнеровозу

KCS [9], известному тестовому объекту численных методов гидродинамики судна.

Для ССП при скорости 13 уз. ($Fr = 0,18$) за счет перераспределения объема между двумя участками носовой оконечности, которое соответствует переносу объема корпуса ближе к форштевню за счет заострения участка, лежащего дальше от него, было получено снижение буксировочного сопротивления корпуса на 4,1%. Длина трансформированного участка составила 14% длины по ватерлинии.

Анализ волновой системы у носовой оконечности, где менялись обводы, показал, что снижение сопротивления сопровождается заметным усилением расходящихся волн и ослаблением поперечных.

Для исследования устойчивости эффекта снижения сопротивления численное моделирование обтекания корпусов было выполнено в диапазоне $Fr = 0,14 \div 0,18$. Полученные кривые коэффициента остаточного сопротивления и буксировочного сопротивления (рис. 1) носят ярко выраженный оптимизационный характер — снижение сопротивления при высоких Fr сопровождается его ростом при низких Fr .

Таблица 1. Основные характеристики исследуемых 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 объёмное ∇ , 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

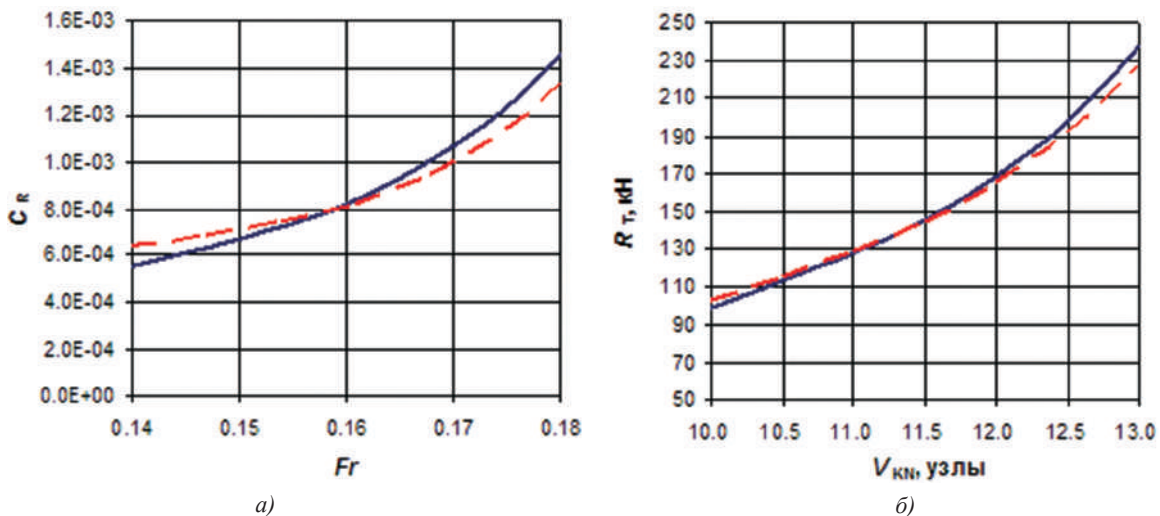


Рис. 1. Сопротивление корпусов для ССП:

— исходные обводы; — усовершенствованные обводы

Кроме влияния Fr на особенности формирования волнового сопротивления, существенную роль играет и то, что при низких Fr доля волнового сопротивления у данного тихоходного судна резко снижается и становится незначительной. Поэтому характер кривых вызван не только влиянием обводов на волновую составляющую, но и на вязкостную, причем эти составляющие находятся в противоречии. Эти процессы дополнительно иллюстрирует рис. 2, на котором показаны зависимости волнового сопротивления R_w и сопротивления формы R_{pv} от Fr для исходных и усовершенствованных обводов. Сопротивление формы R_{pv} здесь получено как сопротивление давления дублированной модели.

Результаты исследования также показали, что при заданных исходных обводах выгодно не только перераспределять водоизмещение при условии $\nabla = \text{const}$, но и просто увеличивать полноту в небольшом районе вблизи форштевня. На этой основе был подготовлен проект бульбовой наделки, которая при минимальных объемах работ (район установки составляет всего 2% длины по ватерлинии) может быть установлена на существующих судах с рассмотренными носовыми обводами.

Результаты численного моделирования обтекания корпуса с бульбовой наделкой показали, что ее установка дает даже больший выигрыш в сопротивлении (5,6%), чем перераспределение водоизмещения. Рост положительного эффекта объясняется тем, что выбранная с учетом соображений размещения и технологичности форма наделки существенно влияет на сопротивление формы, снижение которого компенси-

рует неполный выигрыш в волновом сопротивлении, обусловленный отказом от изменений в остальной части носовой оконечности — рис. 2.

Величины снижения сопротивления порядка 4–5% за счет изменения формы носовых обводов могут показаться небольшими. Очевидно, в случае ССП они связаны с небольшой долей волнового сопротивления. Однако, как показано в статье [1], установка бульбовой наделки на существующем судне окупается менее чем за год эксплуатации. Экономические последствия выбора на проектом этапе обводов с уменьшенным на 4–5% сопротивлением, очевидно, еще более благоприятны, поскольку не требуют дополнительных затрат. Отметим, что повышение прибыли в процентном выражении, как правило, значительно выше, чем соответствующее снижение сопротивления движению и затрат на топливо, так как прибыль в современном судоходстве представляет собой малую разницу больших величин доходов и расходов.

Кроме того, большую роль играет степень отличия исходных обводов от оптимальных. Так как в проектировании не применялись четкие критерии оптимальности, потенциальное снижение сопротивления может лежать в довольно широком диапазоне. Например, для ССП близкого типа, в экспериментальном исследовании [1], снижение сопротивления за счет аналогичных решений составило до 16%.

Исходные носовые обводы объекта исследования [1] близки к обводам первых судов класса «Волго-Дон макс» нового поколения. Примером могут служить танкеры типа «Армада Лидер» проекта 005RST01

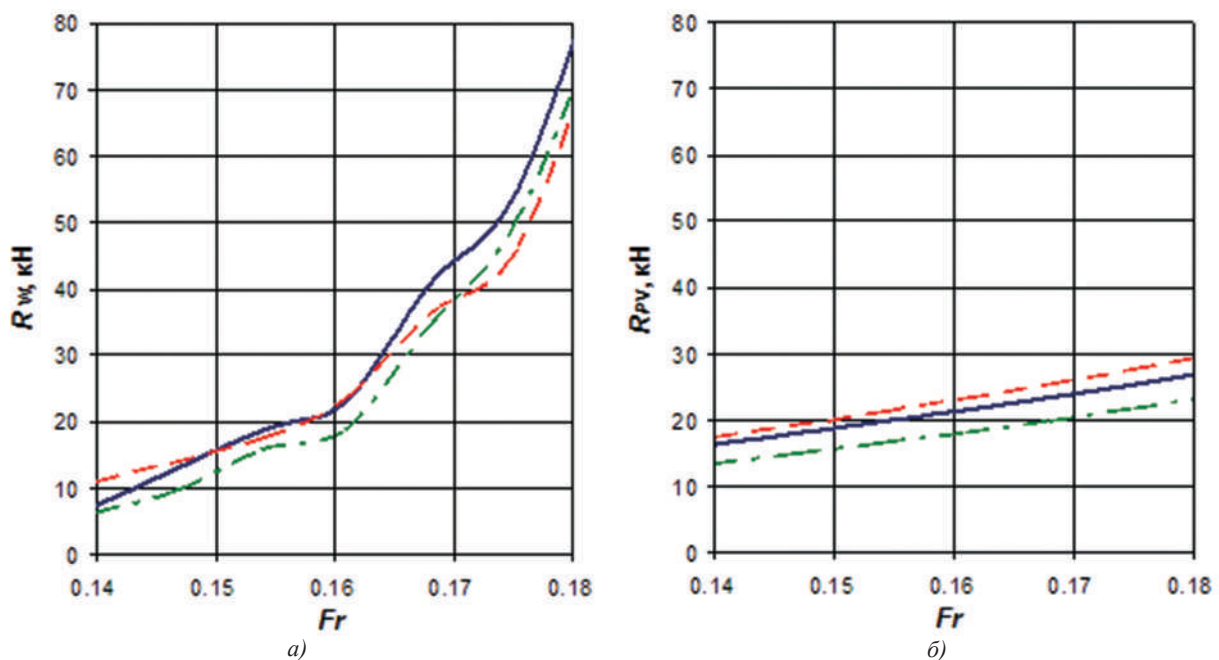


Рис. 2. Компоненты сопротивления давления корпусов для ССП:

— исходные обводы; — усовершенствованные обводы; — бульбовая наделка

Морского Инженерного Бюро (МИБ) постройки 2002–2005 гг. — рис. 3. Форма носовых таранно-конических обводов характерна заострением участка у форштевня.

Исходные носовые обводы ССП, к которому был применен метод оптимальной трансформации, были разработаны при участии А. В. Печенюка и использованы в проектах сухогрузных судов МИБ 006RSD02, 006RSD05, RSD19 и RSD49, которые находятся в постройке с 2003 г. по настоящее время. С учетом опыта по первым судам участок у форштевня у них стал заметно полнее — рис. 4.

При разработке обводов для ССП с экстремально высоким коэффициентом общей полноты в рамках проекта МИБ RST27 [2], А. В. Печенюком было предложено наращивать водоизмещение в основном путем дальнейшего приполнения носовой части, особенно участка у форштевня — рис. 5. Это решение не

имело научного обоснования, его целесообразность была проверена в результате комплекса численных и экспериментальных исследований, полностью подтвержденных результатами сдаточных испытаний.

Таким образом, результаты применения метода оптимальной трансформации к носовым обводам ССП соответствуют данным из практики и позволяют их полностью объяснить. Решения, разработанные для ССП класса «Волго-Дон макс», отличаются высокой готовностью к использованию, особенно это относится к установке бульбовой надделки на существующие носовые обводы.

По контейнеровозу KCS при скорости 26 уз. ($Fr = 0,28$) снижение сопротивления составило 8,9% при длине трансформированного участка 26% длины по ватерлинии. Было выполнено перераспределение лишь около 0,4% водоизмещения корпуса между двумя участками судовой поверхности, при котором ха-



Рис. 3. Носовая часть ССП типа «Армада Лидер» (проект 005RST01) Источник: [5]



Рис. 4. Носовая часть ССП типа «Гейдар Алиев» (проект 006RSD05). Источник: [5]



Рис. 5. Носовая часть ССП «СВЛ Либерти» (проект RST27). Источник: [5]

рактиер носовых обводов принципиально не изменился. Для сравнения, в работе [10] при том же Fr снижение буксировочного сопротивления корпуса KCS составило 1,5% при менее строгих ограничениях на трансформацию исходной геометрии.

Судя по этим результатам, в режимах с развитым волнообразованием сравнительно небольшие трансформации корпуса существенно влияют на его обтекание (рис. 6) и величину буксировочного сопротивления. Поэтому, даже в целом правильно выбранные в соответствии с обычными рекомендациями и инженерным опытом обводы могут иметь значительные резервы для оптимизации.

Достоверность представленных результатов обеспечена, прежде всего, корректностью примененного метода оптимальной трансформации носовой части судна, обоснованной при его формулировке. Кроме того, с учетом специфики исследования были приняты и дополнительные меры. В качестве исходных объектов были использованы суда, снабженные надежными экспериментальными данными. Таким образом, в ходе исследования сохранялась опора на экспериментальные результаты, причем в исследованиях ССП были задействованы данные двух экспериментов: выполненного для исходного корпуса при его проектировании и специально поставленного для изучения результатов оптимизации. Достоверность

представленных результатов подтверждается также следующими данными:

- результаты оптимизации формы носовых частей качественно соответствуют результату применения метода В. Г. Сизова [6];

- снижение сопротивления сопровождается ослаблением поперечных волн и усилением расходящихся, что отвечает физической закономерности, установленной Т. Хавелоком;

- декомпозиция буксировочного сопротивления, выполненная с помощью расчетов дублированных моделей, показала, что влияние трансформаций корпуса на волновое сопротивление и сопротивление формы носит известный взаимно противоречивый характер.

Сравнение результатов, полученных А. В. Печенюком и В. Г. Сизовым, выполнено на рис. 7. В нижней части рисунка показана поверхность вариаций буксировочного сопротивления по объему корпуса $\lambda = dR/dV$ в виде изолиний в ДП из работы [6]. Область судовой поверхности, в которой выгодно приполнение корпуса ($\lambda < 0$), выделена красным цветом, а область, в которой выгодно заострение ($\lambda > 0$), — синим. В верхней части рисунка показаны изменения формы безразмерных строевых по шпангоутам (приполнение и заострение выделены теми же цветами), соответствующие результатам оптимизации носовых

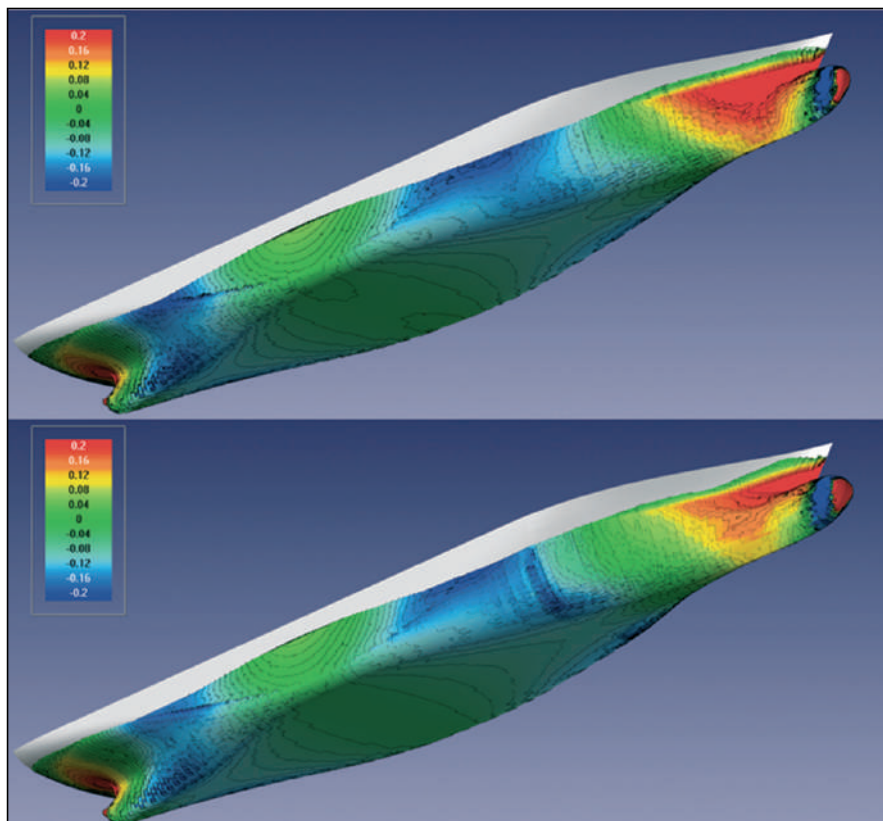


Рис. 6. Распределение коэффициента давления $p/(0.5\rho V^2)$ по поверхности корпуса: вверху — исходная форма корпуса KCS, внизу — усовершенствованная

частей ССП и KCS. Прямое сравнение, при котором области приполнения и заострения практически совпали по длине для трех судов с совершенно разными размерениями, формой обводов и относительной скоростью, выполнено на рис. 7 на основе научного положения, сформулированного А. В. Печенюком [3] при теоретическом анализе его результатов. Согласно этому положению, использование в качестве продольной координаты длины поперечной волны λ_w позволяет исключить из рассмотрения влияние длины судна и относительной скорости Fr .

Рис. 7 также иллюстрирует разницу в подходах, реализованных исследователями. Поверхность вариаций представляет собой более детальную инфор-

мацию о влиянии различных точек судовой поверхности на сопротивление. Однако значительная часть этой информации обусловлена влиянием вертикального распределения полноты, которое не требует оптимизации. Декомпозиция влияния продольного и вертикального распределения полноты позволила исключить последнее из рассмотрения и перейти от представления данных в виде поверхностей к двумерным кривым — строевым по шпангоутам. Основным же отличием является переход от указания направления выгодных трансформаций судовой поверхности в методе В. Г. Сизова к определению их конкретной величины, обеспечивающей минимум буксировочного сопротивления.

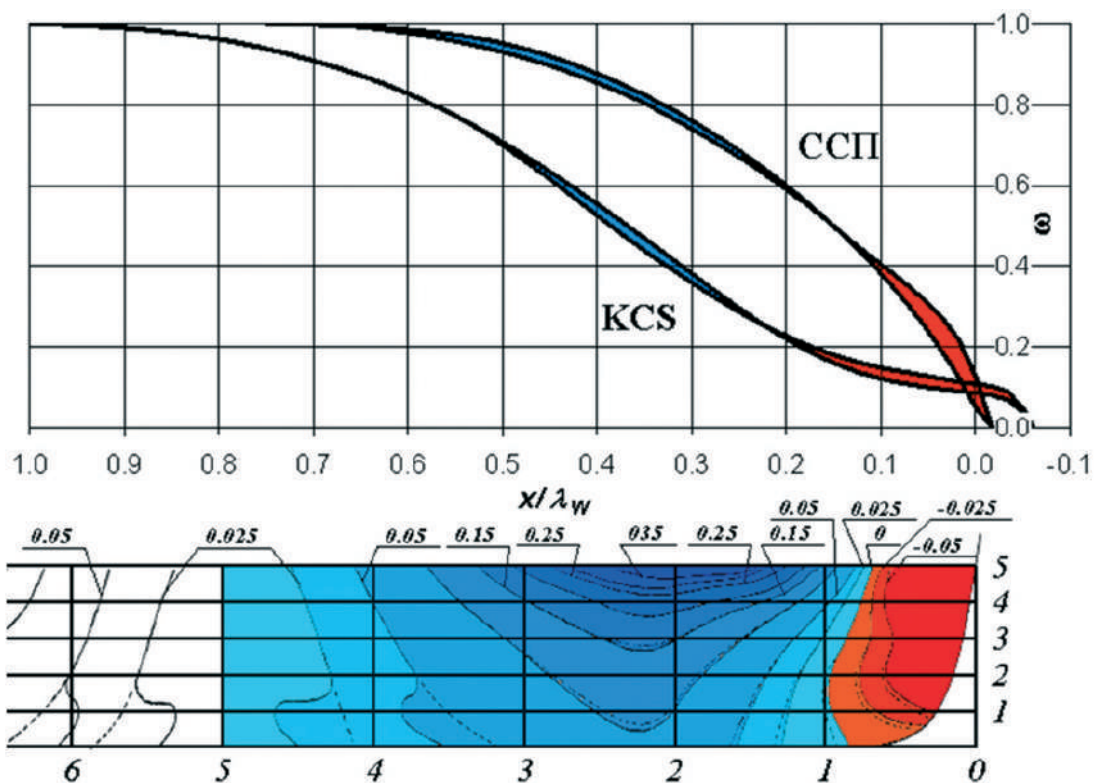


Рис. 7. Сравнение результатов исследований В. Г. Сизова (внизу) и А. В. Печенюка (вверху)

ВЫВОДЫ. Решение актуальной задачи снижения сопротивления движению водоизмещающих судов путем создания комплексного метода оптимальной трансформации носовой части имеет большую практическую ценность, поскольку позволяет оптимизировать параметры продольного распределения водоизмещения в носовой части, которые до сих пор не были охвачены формальными методиками или достаточно подробными рекомендациями, что расширяет методологическую базу проектирования судов и позволяет повысить их проектные показатели. Полученные с помощью метода результаты совершенствования носовых обводов двух судов имеют практическое значение для проектирования новых судов рассмотренных

типов. Результаты по судну смешанного плавания могут быть также использованы для модернизации существующих судов с целью снижения их буксировочного сопротивления, причем результаты исследования бульбовой надделки отличаются высокой степенью готовности к практическому использованию.

Достоверность представленных результатов обеспечена не только корректностью метода оптимальной трансформации носовой части судна, но и рядом известных закономерностей, выявленных в результатах его применения. Наибольший интерес, по нашему мнению, представляет качественное соответствие полученных результатов данным известной работы В. Г. Сизова [6].

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] **Егоров, Г. В.** Исследования ходкости судна смешанного река-море плавания с предельно высоким коэффициентом общей полноты [Текст] / Г. В. Егоров, В. И. Тонюк, Б. Н. Станков, А. В. Печенюк // *Материалы III междуна. научно-техн. конф. «Инновации в судостроении и океанотехнике»*. — Николаев : НУК, 2012. — С. 92–93.
- [3] **Печенюк, А. В.** О повышении эффективности пропульсивного комплекса путем совершенствования формы носовой оконечности судна [Текст] / А. В. Печенюк // *Судовые энергетические установки*. — 2014. — № 34. — С. 87–97.
- [4] Программный комплекс FlowVision как современный инструмент проектирования судовых обводов [Текст] / А. А. Аксенов, С. В. Жлуктов, А. С. Петров и др. // *Судостроение*. — 2013. — № 4. — С. 27–31.
- [5] Сайт МИБ [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.meb.com.ua/>.
- [6] **Сизов, В. Г.** Метод проектирования формы корабля наивысших пропульсивных качеств [Текст] : дис. канд. техн. наук : 05.08.01 «Теория корабля» / В. Г. Сизов — ОИИМФ, Одесса, 1948. — 120 с.
- [7] **Сизов, В. Г.** Об одном способе улучшения формы судна [Текст] / В. Г. Сизов // *Вісник ОНМУ*. — Одеса : ОНМУ, 2006. — Вип. 19. — С. 14–19.
- [8] **Станков, Б. Н.** Оптимизация судовых обводов: новые возможности [Текст] / Б. Н. Станков, А. В. Печенюк // *Судостроение*. — 2015. — № 3. — С. 15–19.
- [9] **Larsson, L.** Benchmarking of computational fluid dynamics for ship flow: The Gothenburg 2000 Workshop [Текст] / L. Larsson, F. Stern, V. Bertram // *J. Ship Res.* — 2003. — Vol. 47. — Pp. 63–81.
- [10] Sample selection method for ship resistance performance optimization based on approximated model [Текст] / С. Haichao, С. Xide, L. Zuyuan, F. Baiwei & Z. Chengsheng // *J. Ship Res.* — N.-Y., 2016. — Vol. 60. — No 1. — Pp. 1–13.

© И. П. Давыдов, А. В. Печенюк

Надійшла до редколегії 26.07.2016

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. В. О. Некрасов