

УДК 629.5.(012+016+017):532

Печенюк А.В.
ОНМА

О ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОПУЛЬСИВНОГО КОМПЛЕКСА ПУТЕМ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ФОРМЫ НОСОВОЙ ОКОНЕЧНОСТИ СУДНА

Введение

Основные технико-эксплуатационные и экономические показатели судна, в том числе провозоспособность и энергоэффективность, в значительной степени определяются эффективностью функционирования его пропульсивного комплекса (ПК). Наиболее рациональным путем повышения эффективности ПК является снижение буксировочного сопротивления и, соответственно, буксировочной мощности, а также улучшение ходовых качеств за счет совершенствования формы корпуса судна.

Достоверные оценки влияния формы корпуса на буксировочное сопротивление могут быть получены путем проведения модельного эксперимента в опытовом бассейне. Результаты обобщения многочисленных экспериментальных исследований породили, так называемые, статистические методы оценки влияния формы корпуса на буксировочное сопротивление. Так, широкое распространение в инженерной практике получил метод Холтропа [1], основанный на регрессионном анализе экспериментальных данных.

Ни экспериментальные, ни статистические методы в настоящее время не могут быть использованы для оптимизации формы корпуса судна. Первые – в силу высокой стоимости и продолжительности испытаний, вторые – в силу недостаточной точности чувствительности к локальным изменениям формы.

Таким образом, наиболее пригодными, с точки зрения практической реализации, оказались теоретические методы оценки сопротивления. Задачи оптимизации и совершенствования существующих обводов в различных постановках исследуются уже достаточно давно. Среди последних широко распространенными оказались те, которые используют интеграл Мичелля в той или иной модификации для оценки волнового сопротивления [2, 3]. Принципиальным ограничением подобных методов является лежащая в их основе математическая модель «тонкого» судна, предполагающая большое удлинение корпуса и отсутствие учета разрушающейся подпорной волны в но-

совой оконечности. Учитывая последнее обстоятельство, полагаем, что для оценки буксировочного сопротивления целесообразно использовать современные методы вычислительной гидромеханики, в которых численно интегрируются уравнения Навье–Стокса и отсутствуют ограничения в выборе формы корпуса. Недостатком этих численных методов являются высокие требования к ресурсам вычислительной техники – объему оперативной памяти и производительности процессоров. Этот недостаток исключает постановку задачи оптимизации формы корпуса как задачи математического программирования или планирования эксперимента и делает более предпочтительным вариационный подход.

В 1948г. В.Г. Сизов предложил оригинальный критерий оптимальности формы корпуса судна с точки зрения минимума полного сопротивления [4], основанный на вариационных принципах. Критерий В.Г. Сизова не налагает ограничения на методику расчета буксировочного сопротивления, но оставляет открытым вопрос о математической модели модификации судовой поверхности (в [4] рассмотрены бесконечно малые изменения).

Автором разработан комплексный метод совершенствования судовых обводов, по концепции близкий к [4]. Его основными компонентами являются модель систематических изменений формы корпуса и алгоритм совершенствования обводов [7].

С помощью метода были выполнены численные [5] и экспериментальные [6] исследования по совершенствованию носовых обводов нескольких судов-объектов. Результаты показали существенные возможности по снижению буксировочного сопротивления за счет оптимизации формы носовой оконечности. Кроме того, анализ полученных результатов показал, что они представляют не только практический интерес для судов конкретных типов, но и научный, который заключается в обобщенных сведениях о влиянии обводов носовой оконечности на сопротивление движению.

Целью статьи является оценка влияния формы носовой оконечности судна на сопротивление движению на основе результатов, полученных с помощью разработанного метода совершенствования судовых обводов.

1. Метод совершенствования судовых обводов

Основными компонентами метода совершенствования судовых обводов являются модель систематических изменений формы корпуса и алгоритм совершенствования обводов.

Модель систематических изменений [7] предусматривает задание изменений формы корпуса на локальных участках строевой по шпангоутам с последующим распределением площадей шпангоутов по высоте одним из известных способов: способом аффинного преобразования или способом сдвига. В общем случае предусмотрена комбинация обоих способов и их усовершенствование для обеспечения переходов между участками судовой поверхности, где используется каждый из них.

По результатам анализа геометрических характеристик, с помощью которых судовая поверхность может быть описана в формализованном виде, в модели систематических изменений предложено для отображения распределения водоизмещения в оконечностях использовать зависимость безразмерного коэффициента продольной полноты от абсциссы $\varphi(x)$ которая определяется выражением:

$$\varphi(x) = \frac{\int_0^T \int_0^x y(x, z) dz dx}{T \int_0^x y(x, z) dz}, \quad (1)$$

где T – осадка.

Аналогичное (1) выражение можно составить и для вертикального распределения полноты. Однако в задаче снижения сопротивления вертикальное распределение водоизмещения не имеет оптимума, поэтому его варьирование не актуально.

Алгоритм совершенствования обводов сформулирован в соответствии с обычным подходом к оптимизационным задачам в современной прикладной гидромеханике, который ориентирован, прежде всего, на применение численных методов. Для иллюстрации такого подхода можно привести пример оптимизации положения элементов механизированного крыла самолета [8].

Геометрия механизированного крыла, состоящего из трех элементов (крыло с предкрылком и закрылком), хорошо поддается формализации – варьируемыми параметрами являются только углы отклонения предкрылка и закрылка относительно профиля крыла. Сформировав критерии и ограничения, задачу можно решить в многокритериальной постановке, с результатом в виде множества Парето-оптимальных решений. С точки зрения гидродинамического моделирования получение этих результатов требует исследования

большого числа вариантов положений предкрылка и закрылка (порядка сотен).

Применение подобных методов к судовым обводам затруднено, прежде всего, из-за сложности формализации геометрии изменений. Как отмечено выше, с помощью специально разработанной модели систематических изменений эту проблему можно решить.

Располагаемые вычислительные ресурсы таковы, что число исследуемых вариантов важно ограничить величинами порядка десятков.

Особенностью предлагаемого алгоритма является использование в нем гипотезы о независимости влияния разных участков носовой части корпуса по длине на волновое сопротивление. Гипотеза предполагает прямую количественную взаимосвязь между локальными изменениями формы обводов и изменением буксировочного сопротивления корпуса. Гипотеза используется для прогноза суммарного эффекта от различных локальных изменений.

С методологической точки зрения независимость изменений на разных участках корпуса позволяет существенно экономить вычислительные ресурсы за счет уменьшения количества вариантов.

Анализ метода совершенствования судовых обводов в целом показал, что он имеет большие возможности для дальнейшего развития и расширения области использования. Прежде всего, с его помощью можно совершенствовать не только носовые обводы, но и кормовые, то есть оптимизировать форму корпуса в целом. Далее, вместо задачи снижения буксировочного сопротивления без существенной переработки метода можно рассмотреть задачу повышения ходовых качеств судна на тихой воде. Для этого нужно учесть данные по взаимодействию между корпусом и движителем, которые могут быть получены с помощью дополнительных численных расчетов.

Практические преимущества, которые предоставляет метод совершенствования обводов, связаны с расширением методологической базы проектирования судов. Метод позволяет оптимизировать параметры формы корпуса (продольное распределение водоизмещения в оконечностях), которые до сих пор не были охвачены формальными методиками или достаточно подробными рекомендациями. Как показало исследование конкретных объектов в рамках работы, снижение буксировочного сопротивления при этом может достигать больших относительных значений, что обеспечивает существенное улучшение проектных показателей.

2. Теоретические результаты

С помощью метода выполнено совершенствование носовых обводов двух объектов, которые существенно отличаются друг от друга по форме корпуса и скоростному режиму, – это полное тихоходное судно смешанного плавания (ССП) с $\delta = 0.89$, $Fr = 0.18$ и контейнеровоз KCS [9] умеренной полноты и быстроходности с $\delta = 0.65$, $Fr = 0.28$.

Если рассмотреть результаты в виде сравнения безразмерных строевых по шпангоутам исходных и усовершенствованных носовых частей объектов (рис. 1), можно заметить определенное сходство реализованных изменений. В обоих случаях водоизмещение было перенесено ближе к форштевню за счет заострения участка, лежащего дальше в корму. При качественном сходстве, изменения в каждом случае были неочевидными.

В случае СПП приполнение участка у форштевня, исходя из практики проектирования судов подобного типа, выглядит чрезмерным. Считается, что существенное развитие бульбовых образований не оправдано при скоростных режимах, в которых доля волнового сопротивления невелика. Согласно же полученным результатам, именно приполнение участка у форштевня обеспечило больший вклад в снижение буксировочного сопротивления корпуса, чем заострение участка, расположенного дальше в корму.

В случае судна KCS исходные обводы обладают вполне развитым бульбом. Некоторая оптимизация его размеров была вполне вероятной. При этом в режимах с большой долей волнового сопротивления очевидным выгодным направлением изменений считается наращивание размеров бульба, так как это приводит к смещению объема к основной плоскости с заострением действующей ватерлинии.

Однако, согласно полученным результатам, эффект от наращивания бульба оказался меньше, чем от заострения участка, примыкающего к нему. Кроме того, влияние изменений обводов на двух участках на вертикальное распределение полноты взаимно компенсируется. То есть наращивание размеров бульба в данном случае не привело к перемещению водоизмещения под свободную поверхность для корпуса в целом.

Исходя из практического опыта, при условии постоянства водоизмещения более выгодным представляется приполнение бульба за счет заострения участка, примыкающего к мидель-шпангоуту, так как это действительно приводит к смещению водоизмещения к ос-

новой плоскости (по причине различного развала шпангоутов в разных районах носовой части). Однако метод совершенствования обводов показал, что этот путь менее эффективен.

В целом безразмерные строевые двух объектов с усовершенствованными обводами на рис. 1 не демонстрируют какой-либо взаимосвязи между собой. Отмеченное сходство изменений может носить и случайный характер. Ситуация меняется, если выполнить сравнение зависимостей $\varphi(x)$, в которых исключено влияние общей полноты, – рис. 2.

Из рис. 2 видно, что зависимости $\varphi(x)$ имеют сходный характер у усовершенствованных носовых частей обоих объектов, а также у исходной носовой части судна KCS. Зависимость исходной носовой части ССП по характеру отличается от трех других. Это может объясняться тем, что исходные носовые обводы судна KCS сразу проектировались в расчете на снижение волнового сопротивления. На форме обводов это отразилось в виде развитого бульба. У ССП же явное развитие бульба произошло уже в процессе совершенствования исходных таранно-конических обводов.

Несмотря на подобие кривых усовершенствованных объектов на рис. 2, прямо сопоставлять их вряд ли целесообразно из-за разной шкалы абсцисс. В качестве абсциссы выступает относительное положение по длине судна x/L – чисто геометрическая характеристика. Из-за разной относительной длины носовых оконечностей судов эти шкалы у них не совпадают.

Если предположить, что определенная форма кривой $\varphi(x)$ в общем случае взаимосвязана с особенностями обтекания носовой оконечности, то такая кривая должна быть построена в координатах, учитывающих, прежде всего, скоростной режим судна Fr .

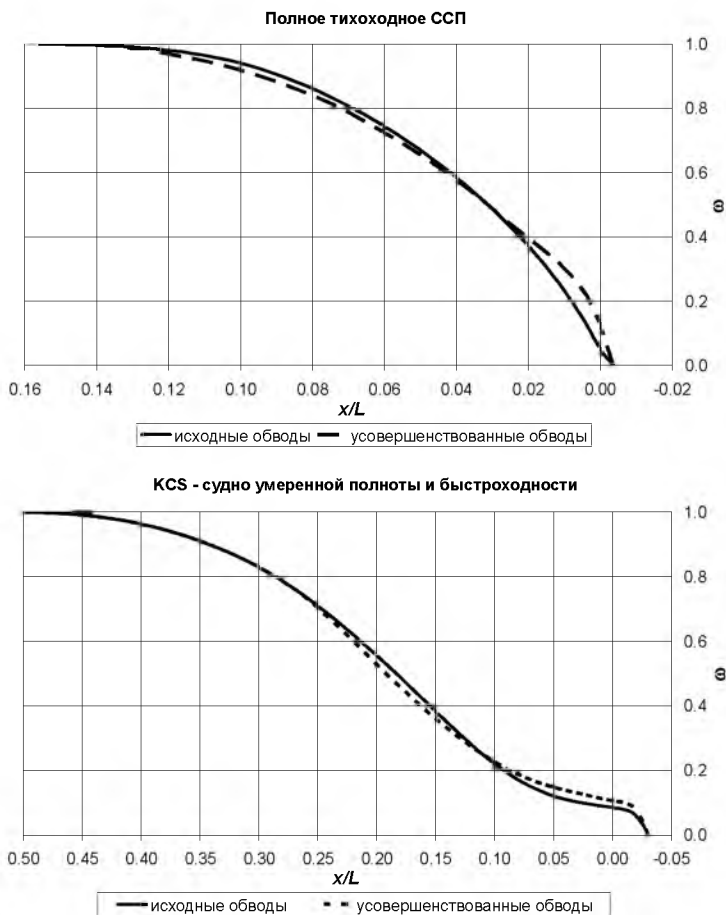


Рис. 1. Строевые исходных и усовершенствованных носовых частей объектов

В качестве такой продольной координаты можно использовать длину поперечной волны λ , которую нетрудно определить по выражению:

$$\lambda = \frac{2\pi v^2}{g}, \text{ где:} \quad (2)$$

v – скорость,

g – ускорение свободного падения.

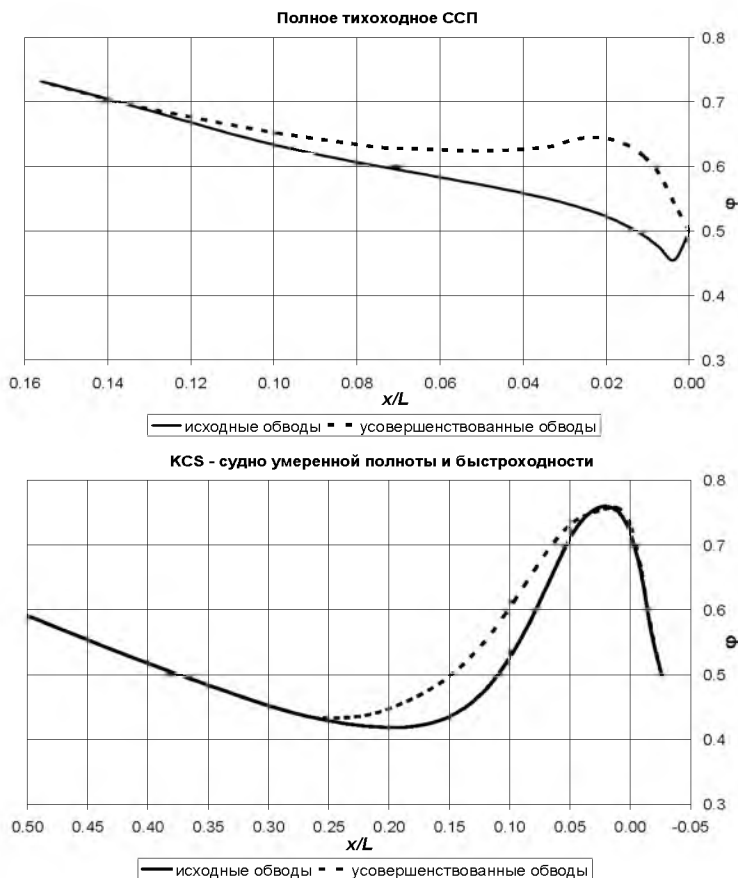


Рис. 2. Зависимости $\varphi(x)$ носовых частей объектов

На рис. 3 представлены кривые $\varphi(x)$ носовых частей усовершенствованных объектов, построенные в безразмерной оси x/λ .

Кривые на рис. 3 имеют подобный характер, несмотря на весьма большую разницу в форме обводов и скоростном режиме объектов. Следовательно, функция $\varphi(x)$, составленная по выражению (1), может служить не только геометрической характеристикой, выражающей распределение полноты в носовой части, но и критерием качества обводов. Для этого продольное распределение полноты следует сопоставить длине поперечных волн λ , определяемой по выражению (2). Это дает основание сформулировать (в виде гипотезы) следующее научное положение:

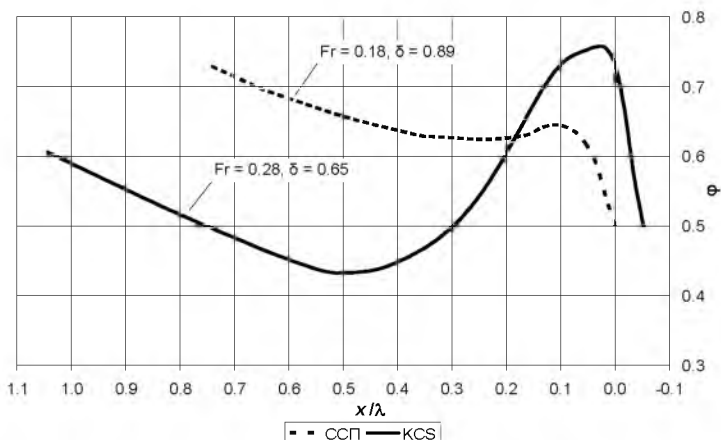


Рис. 3. Зависимости $\phi(x)$ усовершенствованных носовых частей объектов

Влияние формы носовой оконечности на волновое сопротивление судна определяется зависимостью коэффициента продольной полноты ϕ от продольной координаты x , отнесенной к длине поперечной волны λ .

Из формулировки следует вывод о том, что для каждого конкретного случая, определяемого Fr и соотношениями главных размеров, включая δ , существует оптимальная форма кривой $\phi(x)$, соответствующая минимальному волновому сопротивлению. Судя по исследованным объектам, такая форма имеет максимум вблизи форштевня, что характерно для бульбообразной формы обводов.

2. Практические результаты

Полученные результаты показали, что для судов умеренной полноты и быстроходности, подобных KCS, снижение буксировочного сопротивления за счет оптимизации формы носовой оконечности может достигать относительно высоких значений. Для контейнеровоза KCS было получено снижение сопротивления 8.9%. При этом характер носовых обводов принципиально не был изменен. Судя по этим результатам, в режимах с развитым волнообразованием сравнительно небольшие изменения формы обводов в носовой части существенно влияют на величину буксировочного сопротивления. Поэтому, даже в целом правильно выбранные в соответствии с обычными рекомендациями и инженерным опытом обводы могут иметь значительные резервы для оптимизации. Это еще раз подтверждает прак-

тическую актуальность предложенного метода совершенствования обводов и неочевидность полученных с его помощью результатов.

Результаты совершенствования носовых обводов ССП показали, с одной стороны, что выигрыш в буксировочном сопротивлении может быть относительно небольшим при существенном изменении характера обводов. Для ССП – объекта численного исследования [2] – было получено снижение сопротивления 4.1%. Это связано с небольшой долей волнового сопротивления в расчетном режиме. С другой стороны, выигрыш зависит от того, насколько исходные обводы далеки от оптимальных. Для ССП близкого типа, послужившего объектом экспериментального исследования [6], снижение сопротивления составило уже 15.6%.

Выводы

В предложенном методе совершенствования судовых обводов варьирование формы обводов соответствует перераспределению водоизмещения. Перераспределение водоизмещения в вертикальном направлении не имеет оптимума по сопротивлению, поэтому варьирование формы корпуса может быть сведено к его продольному перераспределению. Формализованное описание может быть представлено в виде зависимости безразмерного коэффициента продольной полноты от абсциссы $\varphi(x)$.

Исследования по совершенствованию носовых обводов судовых объектов, выполненные с помощью предложенного метода, показали, что $\varphi(x)$ является не только геометрической характеристикой, выражающей распределение полноты в носовой части, но и критерием качества обводов. Для этого продольное распределение полноты $\varphi(x)$ следует сопоставить длине поперечных волн λ . Для исследованных объектов оптимальная зависимость $\varphi(x)$ имеет подобный вид, характерный для бульбообразных обводов носовой оконечности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Holtrop J., Mennen G.G.J. An approximate Power Prediction Method [Текст] / J. Holtrop, G.G.J. Mennen // ISP. – 1982. - Vol. 29, No. 335. – P. 166 – 170.
2. Пашин В.М., Мизин И.О. Согласованная оптимизация формы корпуса и основных элементов судна [Текст] / В.М. Пашин, И.О. Мизин // В сб.: Гидродинамика транспортных судов. – СПб: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 1981. - С. 27 – 44.

3. Готман А.Ш. Волновое сопротивление и оптимизация обводов водоизмещающих судов [Текст]: диссерт. на соиск. степ. докт. техн. наук : спец. 05.08.01 «Теория корабля и строительная механика» / А.Ш. Готман. – СПбГМТУ, 1996. – 207 С.
4. Сизов, В.Г. Об одном способе улучшения формы судна [Текст] / В.Г. Сизов // Вісник ОНМУ. – Одеса: ОНМУ, 2006. – Вип. 19. – С. 14 – 19.
5. Печенюк, А.В. Улучшение формы корпуса тихоходного судна с большой полнотой обводов численными методами [Электронный ресурс] / А.В. Печенюк // Тез. докл. всеукр. науч.-технич. конф. «Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації і ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд». – Николаев: НУК, 2014. – Режим доступа: <http://conference.nuos.edu.ua>.
6. Давыдов И.Ф., Демидюк А.В., Печенюк А.В. Экспериментальное исследование улучшенных обводов для тихоходного судна большой полноты [Текст] / И.Ф. Давыдов, А.В. Демидюк, А.В. Печенюк // Программа и материалы III междуна. науч.-технич. конф. «Экспериментальные методы теории корабля». – Николаев: НУК, 2014. – С. 11 – 15.
7. Печенюк А.В. Модель изменений судовой поверхности [Текст] / А.В. Печенюк // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали 3-ї Міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК. 2012. – С. 179 – 181.
8. Оптимизация положения элементов механизированного крыла с использованием программных комплексов FlowVision-НПС и IOSO [Текст] / А.С. Шишаева, И.В. Москалев, С.В. Жлуктов и др. // САПР и графика. – 2010. – № 9.
9. Печенюк А.В. Эталонное тестирование ПК FlowVision в задаче моделирования обтекания судового корпуса [Текст] / А.В. Печенюк // Инженерные системы – 2014: Труды Международного форума / Инжиниринговая компания «ТЕСИС». – М.: МАКС Пресс, 2014. – С. 43 – 47.