

ОПТИМИЗАЦИЯ СУДОВЫХ ОБВОДОВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ

А. В. Печенюк, *руководитель отдела вычислительной гидродинамики
Digital Marine Technology, Одесса, Украина*

Оптимизация судовых обводов для снижения сопротивления движению является актуальной проблемой гидродинамики судна. В статье представлен новый метод оптимизации обводов, предназначенный для детального совершенствования формы корпуса, концепция которого использует теоретические закономерности формирования волновой системы судна. Метод предусматривает систематическое варьирование продольного распределения полноты корпуса при фиксации или контроле ее вертикального распределения. Для оценки влияния модификаций геометрии на сопротивление применяется численное моделирование буксировки. В результате анализа результатов моделирования может быть получено оптимальное продольное распределение полноты и соответствующие обводы корпуса. Применение метода к хорошо известной форме корпуса эталонного судна KCS позволило снизить его сопротивление на 8.9%.

Введение

Оптимизация обводов корпуса для снижения сопротивления движению является одной из наиболее актуальных проблем гидродинамики судна. Величина сопротивления прямо связана с затратами энергии и топлива, от которых существенно зависят технико-эксплуатационные и экономические показатели кораблей и судов. Проблема методологически связана с проблемой сопротивления и проблемой аналитического описания геометрии корпуса. Нерешенность этих проблем на сегодняшний день не позволяет эффективно осуществлять оптимизацию теоретическими методами, хотя такие попытки неоднократно предпринимались (Н. Е. Жуковский, Т. Хавелок, Г. Вейнблом, Г. Е. Павленко, Л. Н. Сретенский, В. Г. Сизов, Т. Инуи и многие другие).

Достоверные оценки влияния формы корпуса на сопротивление могут быть получены путем проведения модельного эксперимента. В последние годы аналогичные оценки все чаще выполняются и с помощью численного моделирования. Судя по материалам международного семинара по проблемам численного моделирования обтекания корпуса вязким потоком [Larsson, Stern, Visonneau, 2011], при сетках с числом неизвестных порядка нескольких миллионов точность численного расчета несколько уступает модельному эксперименту, но уже сопоставима с ним.

Особенностью, как модельного эксперимента, так и численного моделирования в задаче оптимизации является недоступность решения обратной задачи. Доступно лишь определение сопротивления заданной формы корпуса, то есть решение прямой задачи. Получить оптимальные обводы можно на базе некоторого числа решений прямых задач, в которых рассматриваются начальная форма и ряд ее модификаций.

При указанном подходе экспериментальные методы отличаются высокой стоимостью и продолжительностью испытаний, а численные методы требуют больших затрат вычислительных ресурсов. Поэтому постановка оптимизации формы корпуса как задачи математического программирования или планирования эксперимента в настоящее время затруднена из-за необходимости большого объема исследований.

Еще одно обстоятельство, затрудняющее постановку задачи оптимизации формы корпуса, заключается в необходимости формализовать и систематизировать модификации геометрии. Судовой корпус представляет собой плавную поверхность, которую сложно описать небольшим числом параметров, которые могли бы играть роль оптимизируемых переменных.

Для обоснования основных показателей формы на практике используются систематизированные результаты специальных серийных экспериментов, а для детальной отработки обводов в ответственных проектах с помощью модельного эксперимента выполняют сравнение нескольких заранее подготовленных вариантов, лучший из которых рекомендуется к реализации. Подобный подход, который можно охарактеризовать как метод проб и ошибок, используется в настоящее время и в численных исследованиях. При этом последние имеют преимущества по срокам и стоимости, в том числе за счет работы с виртуальными 3D моделями. Благодаря этому число одновременно рассматриваемых вариантов можно существенно увеличить. Актуальным остается вопрос о том, как с помощью этих преимуществ выйти на качественно новый уровень.

В настоящей работе представлены сведения о новом методе оптимизации судовых обводов, ориентированном на эффективное использование преимуществ численного моделирования, а также

полученных с его помощью результатах по морскому судну умеренной полноты и быстроходности KCS.

Объект исследования и его модификации

Объектом исследования является корпус контейнерного судна KCS, рекомендованный на международном семинаре «Гетеборг-2000» [Larsson, Stern, Bertram, 2003] в качестве эталона для тестирования численных методов. В соответствии с этими рекомендациями было выполнено численное моделирование буксировки корпуса KCS в программном комплексе (ПК) FlowVision [Печенюк, 2014], результаты которого показали, что при адекватных размерах сеток погрешности по буксировочному сопротивлению вполне соответствуют современному мировому уровню. При $Fr > 0.26$ средняя погрешность по буксировочному сопротивлению составила лишь 1.4%.

При постановке задачи оптимизации был рассмотрен вопрос о способе варьирования геометрии, удобном для формирования диапазона оптимизируемых переменных. В аналитическом виде судовая поверхность является функцией координат, и последние могут использоваться в качестве оптимизируемых переменных [Сизов, 2006]. Однако при использовании численных или экспериментальных методов работать с координатами отдельных точек неудобно, так как нужны достаточно крупные модификации, отвечающие чувствительности этих методов к изменениям сопротивления. В то же время, полное описание судовой поверхности ограниченным набором обобщенных параметров представляет собой известную проблему, общепризнанное решение которой до сих пор не найдено.

Предлагаемая постановка была упрощена путем исключения модификаций, затрагивающих главные размерения и их соотношения. Это оправдано как наличием большого числа методик и рекомендаций по выбору этих наиболее значимых параметров, так и проектной практикой, где к ним предъявляются требования, не связанные с ходовыми качествами.

Дополнительного упрощения можно достичь за счет использования характеристик исходной формы. При наличии заданной исходной судовой поверхности модификацию ее обводов можно осуществлять, меняя параметры продольного и вертикального распределения полноты, которые весьма наглядно отображаются в виде строевых по шпангоутам и ватерлиниям. Вертикальное распределение водоизмещения с точки зрения волнового сопротивления не имеет оптимума, поэтому его оптимизация не актуальна. Таким образом, задача сводится к оптимизации продольного распределения водоизмещения при отказе от изменений в вертикальном распределении, либо их контроле. Подход в целом можно охарактеризовать как вариационный.

В работе рассмотрена оптимизация носовой части корпуса. На трех участках по длине были выполнены модификации безразмерной строевой по шпангоутам, показанные на рис. 1, которые соответствуют шести новым расчетным 3D моделям («модель 0» – исходная). Каждая модификация приводит к изменению объемного водоизмещения корпуса δV примерно на 0.4%.

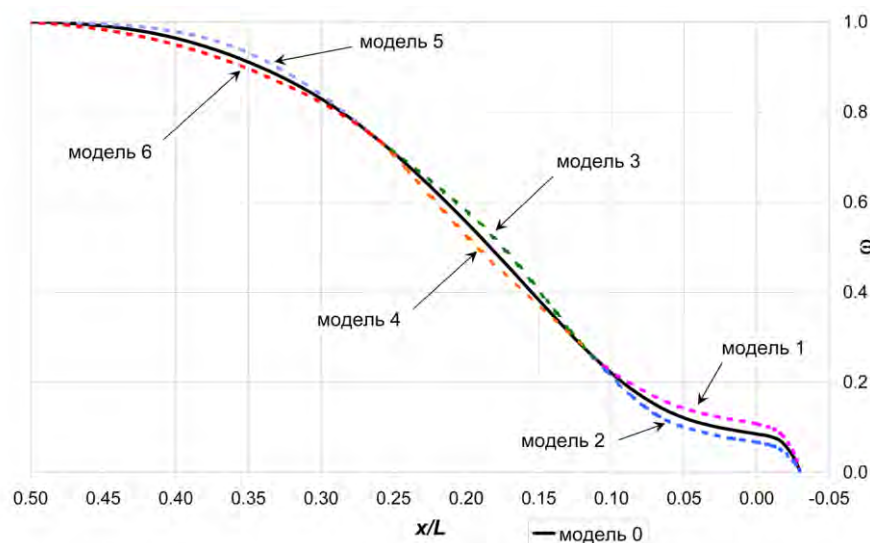


Рис. 1 – Модификации геометрии на строевой по шпангоутам

Для построения обводов с модификациями в соответствии с рис. 1 необходимо распределить площади шпангоутных сечений по высоте. Для этого могут применяться разные способы, выбор которых зависит от особенностей исходной геометрии и действующих ограничений. Например, для

объекта настоящего исследования – контейнерного судна – шпангоуты перестраивались с сохранением неизменной формы палубы. Полученные обводы показаны на рис. 2.

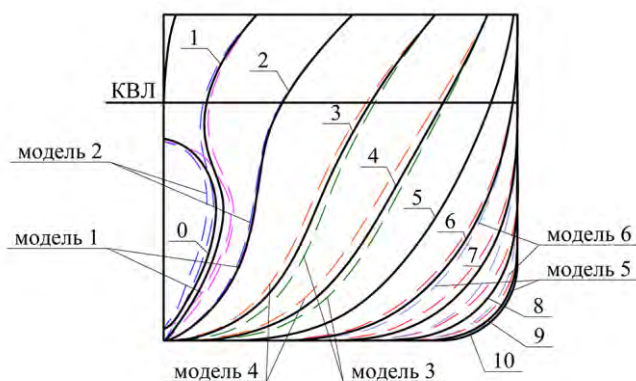


Рис. 2 – Модификации геометрии на проекции «корпус»

Численное моделирование буксировки корпуса

Методика численного моделирования буксировки корпуса, по которой выполнялись расчеты в ПК FlowVision, полностью соответствует использованной в исследовании исходного объекта [Печенюк, 2014].

Физическая модель расчетов включает модель несжимаемой жидкости на базе уравнения Рейнольдса. Для моделирования свободной поверхности использовался модифицированный метод VoF. Моделирование турбулентности предусмотрено с помощью k-ε стандартной (линейной двухпараметрической) модели турбулентности.

Моделирование буксировки выполнялось по схеме гидрлотка (обтекание обращенным потоком жидкости). На поверхности корпуса назначалось граничное условие стенки с логарифмическим законом для скорости, которое достаточно хорошо отвечает условиям обтекания объекта в натурном масштабе.

В расчетах использовалась сетка с числом активных ячеек около 3.7 млн., нацеленная на наиболее подробное разрешение областей потока у оконечностей корпуса и свободной поверхности.

Вычисления выполнялись с помощью ресурсов высокопроизводительных кластеров НИЦ «Курчатовский институт».

Результаты численного исследования моделей с модификациями

Численное моделирование буксировки выполнено в натурном масштабе при скорости 26 узлов ($Fr = 0.28$) в постановке с фиксацией посадки в начальном положении. Полученные значения сопротивления моделей представлены в таблице 1 и на рис. 3.

Согласно результатам расчетов, вариации формы соответствуют колебаниям полного сопротивления корпуса разного знака, величиной 1.3-6.5%. Колебания произошли почти исключительно в составляющей давления.

Таблица 1

		Исходная форма	1-й участок		2-й участок		3-й участок	
3D модель №		0	1	2	3	4	5	6
Знак δV			+	-	+	-	+	-
Полное сопротивление корпуса, R_T	кН	2634	2486	2687	2686	2463	2599	2591
Сопротивление давления, R_p	кН	1307	1157	1366	1357	1136	1271	1268
Сопротивление трения, R_F	кН	1327	1329	1321	1329	1327	1329	1323

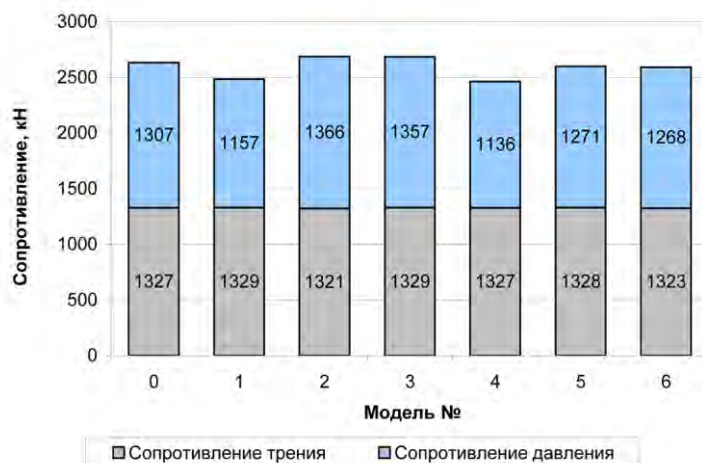


Рис. 3 – Сопротивление моделей с модификациями

Формирование оптимальных обводов и их исследование

По результатам расчетов для каждого участка с помощью аппроксимирующей функции была построена зависимость приращения сопротивления от приращения водоизмещения $\delta R(\delta V)$. На их базе затем была построена общая аппроксимация зависимости приращения сопротивления от приращений объема на всех рассмотренных участках при условии постоянного водоизмещения. При числе участков, равном трем, такая зависимость может быть отображена в виде поверхности – рис. 4 (а), на котором в качестве аргументов использованы приращения δV на первом и втором участках (считая от носа в корму). Приращение на третьем участке при постоянном водоизмещении сводится к зависимой переменной. Построение общей (для всех участков) функции $\delta R(\delta V)$ основано на выдвинутой автором гипотезе о независимости влияния разных участков судовой поверхности на сопротивление при действующих ограничениях на модификацию геометрии.

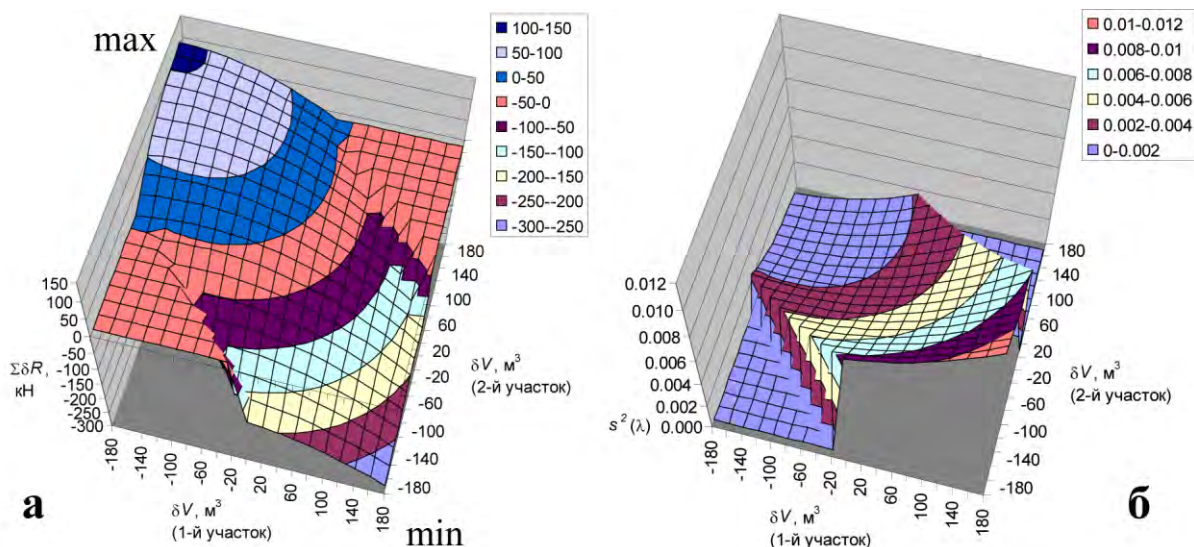


Рис. 4 – Анализ результатов расчетов

Минимальная величина сопротивления получается при переносе объема со второго участка на первый (правый передний угол поверхности на рис. 4 (а)). Третий участок в такой комбинации не участвует, что объясняется его более слабым влиянием. Оценка выигрыша составила 319.8 кН или 12.1%. Численное моделирование с формой корпуса, в которой были реализованы соответствующие изменения, показало снижение сопротивления на 243.4 кН или на 8.9%. Некоторая неточность прогноза в подобных случаях естественна, так как гипотеза о независимом влиянии участков исходит из явлений волнообразования, и не учитывает явлений вязкости.

Форма поверхности на рис. 4 (а) указывает на перспективность развития модификаций для дальнейшего снижения сопротивления: поверхность на границе диапазона вблизи наименьшего значения имеет значительный уклон. Это можно также показать с помощью производных $\lambda = dR / dV$, вычисленных по аппроксимирующим функциям $\delta R(\delta V)$ на каждом из участков.

Рассматриваемая постановка задачи содержит близкие аналогии с изопериметрической задачей вариационного исчисления, в которой сопротивление является исследуемым на экстремум

функционалом (интеграл гидродинамических сил по поверхности корпуса), условие постоянства водоизмещения соответствует приравнению другого функционала заданной величине (водоизмещение – интеграл уравнения судовой поверхности, заключенный в ней объем), а $\lambda = dR/dV$ представляет собой вариацию сопротивления по водоизмещению. Условию экстремума отвечает значение λ , одинаковое на разных участках (теорема Эйлера). В гидродинамике судна это условие, сформулированное в аналитической постановке для точек судовой поверхности, также известно как 2-я теорема Г. Е. Павленко о судне наименьшего волнового сопротивления [Павленко, 1956].

При способе оценки значений λ , используемом в работе, их сравнение удобно выполнять с помощью дисперсии $s^2(\lambda)$, которая представлена на рис. 4 (б). Видно, что дисперсия стремится к нулю в направлении, противоположном снижению сопротивления. Сравнение с рис. 4 (а) позволяет предположить, что область с минимальными значениями дисперсии содержит ближайший максимум сопротивления. На подобный минимум в изученном диапазоне распределение дисперсий λ не указывает.

Однако ряд дополнительных исследований показал, что снизить сопротивление на величину, превышающую 8-9%, не удастся не только в принятой постановке, но и при некоторых отступлениях от условия постоянства водоизмещения, хотя к снижению в указанных пределах приводят разные варианты модификаций. Ситуация нуждается еще в дальнейшем изучении, но одно из ее вероятных объяснений заключается в недостаточно подробных данных, использованных для построения аппроксимирующей зависимости $\delta R(\delta V)$. Возможно, ее более точное построение вблизи минимального значения сможет указать на наличие экстремума.

Вместе с тем, с практической точки зрения полученные результаты говорят о том, что условию оптимума отвечает большой диапазон модификаций. Можно считать, что в область оптимума попадают все варианты модификаций, для которых прогноз снижения сопротивления превышает некоторую максимальную величину выигрыша. Со стороны гидродинамики это может быть объяснено тем, что примерно одинаковая оптимальная конфигурация волны, вызванной буксировкой корпуса на большом удалении за ним, достигается при различных вариантах его формы. Такое объяснение содержит определенное сходство с выводами М. Г. Крейна [Крейн, 1960] о бесконечном числе оптимальных форм, которые были сделаны по результатам математического исследования формулы Мичелла для волнового сопротивления, хотя в нем было также показано, что для надводных судов нельзя аналитически подобрать реальные функции формы, минимизирующие волновое сопротивление.

Анализ полученных результатов и выводы

Визуализация волновых систем показала, что снижение сопротивления сопровождается усилением расходящихся волн и ослаблением поперечных – рис. 5. Это полностью отвечает базовым закономерностям, которые присущи рассмотренному режиму движения.

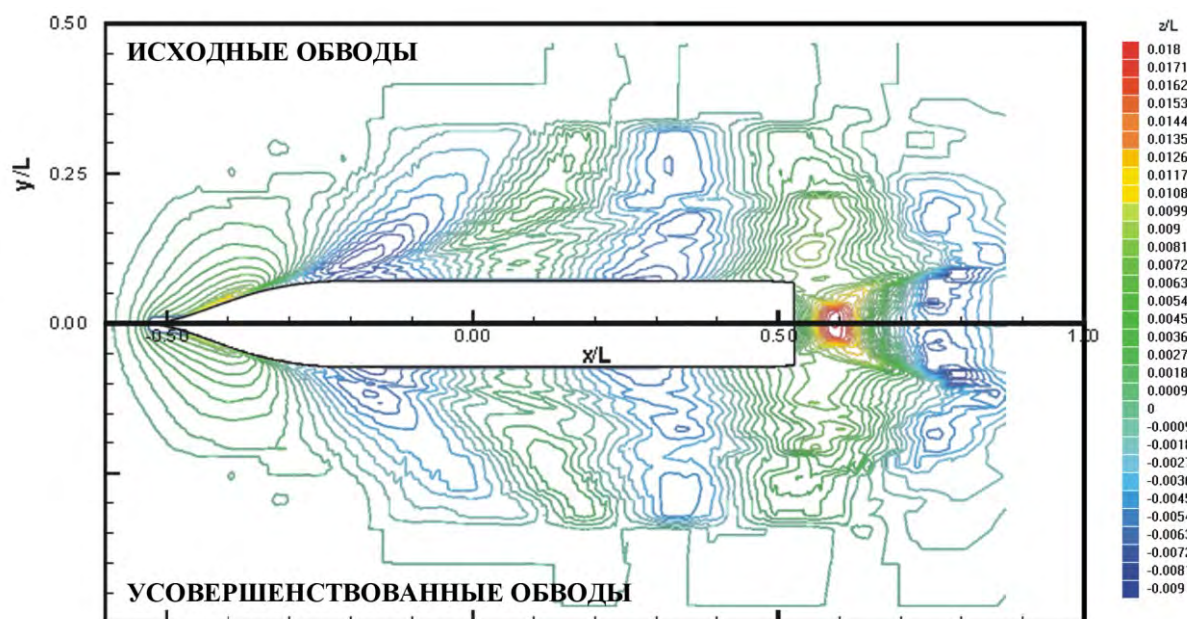


Рис. 5. Визуализация свободной поверхности изолиниями уровня (шкала в м)

Как отмечено выше, модификации геометрии корпуса осуществлялись при условии постоянства формы палубы, поэтому сопровождались перераспределением водоизмещения не только в продольном, но и в вертикальном направлении. В этом случае возникает вопрос, не связан ли эффект снижения сопротивления с переносом объема корпуса вниз от свободной поверхности, что можно рассматривать как тривиальный результат. Сравнение аппликат центров погруженного объема исходного и усовершенствованного корпусов показало, что заметных отличий между ними нет. Приращения этой величины на двух участках, задействованных при формировании оптимальных обводов, взаимно компенсируются. Таким образом, снижение сопротивления целиком обусловлено перераспределением полноты в продольном направлении.

Полученные результаты в целом показали, что для судов умеренной полноты и быстроходности, подобных KCS, снижение буксировочного сопротивления за счет оптимизации формы носовой части может достигать относительно высоких значений (в рамках работы 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 существенно влияют на величину буксировочного сопротивления. Поэтому даже в целом правильно выбранные в соответствии с обычными рекомендациями и инженерным опытом обводы могут еще иметь значительные резервы для оптимизации.

Список литературы

1. Larsson L., Stern F. and Bertram V. Benchmarking of computational fluid dynamics for ship flow: the Gothenburg 2000 Workshop [Текст] / Larsson L., Stern F. and Bertram V. // J. Ship Res. – 2003. – Vol. 47. – P. 63–81.
2. Larsson L., Stern F. and Visonneau M. CFD in ship hydrodynamics – results of the Gothenburg 2010 workshop [Текст] / 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.
3. Крейн М. Г. О форме судна наименьшего мичеллевского сопротивления [Текст] // Аннотации докл. АН СССР на Всесоюзном съезде по теоретической и прикладной механике. – М., 1960. – С. 111–115.
4. Павленко Г. Е. Сопротивление воды движению судов [Текст] / Г. Е. Павленко. – М.: Морской транспорт, 1956. – 507 с.
5. Печенюк А. В. Эталонное тестирование ПК FlowVision в задаче моделирования обтекания судового корпуса [Текст] / А. В. Печенюк // Компьютерные исследования и моделирование. – 2014. – Т. 6. – С. 889–899.
6. Сизов В. Г. Об одном способе улучшения формы судна [Текст] / В. Г. Сизов // Вестник ОНМУ. – Одесса: ОНМУ, 2006. – Вып. 19. – С. 14–19.