

УДК: 629.5.(012+016+017):532

Оптимизация судовых обводов для снижения сопротивления движению

А. В. Печенюк

Digital Marine Technology,
Украина, 65062, г. Одесса, Аркадиевский переулок, д. 4, оф. 1
E-mail: andrew@digitalmarine.net

*Получено 01.11.2016, после доработки — 21.12.2016.
Принято к публикации 30.12.2016.*

Оптимизация судовых обводов для снижения сопротивления движению является актуальной задачей гидродинамики судна. Однако вопросы проектирования и совершенствования обводов в современной практике все еще слабо обобщены и формализованы. Они решаются с помощью комбинации научных знаний, инженерного опыта и критериев из области искусства. Практическое использование экспериментального и численного моделирования в задачах оптимизации формы корпуса обычно сводится к методу проб и ошибок. 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. Как известно, вертикальное распределение водоизмещения не имеет оптимума по волновому сопротивлению, которое является основным активным компонентом, особенно в отношении формы носовой части. Варьирование продольного распределения водоизмещения предусмотрено путем задания конечных приращений водоизмещения на строевой по шпангоутам, которые затем переносятся на теоретический чертеж с помощью специальных методов трансформации шпангоутов и реализуются в 3D-моделях корпуса. Для оценки влияния модификаций геометрии на сопротивление используется численное моделирование буксировки полученных моделей. Дальнейшие оптимизационные процедуры базируются на выдвинутой гипотезе о независимости влияния различных участков корпуса, выделенных по длине, на буксировочное сопротивление. В результате применения метода к форме корпуса хорошо известного судна KCS, рекомендованного конференцией «Гетеборг-2000» в качестве эталонного объекта для тестирования численных методов, получены оптимальное продольное распределение полноты и соответствующие обводы корпуса, которые позволили снизить его сопротивление на 8.9 %. Оптимизация выполнена на базе результатов по шести моделям с вариациями формы, которые обусловили колебания полного сопротивления корпуса разного знака, величиной 1.3–6.5 %. Визуализация волновых систем показала, что при снижении сопротивления происходит заметное ослабление поперечных волн и усиление расходящихся.

Ключевые слова: моделирование обтекания корпуса, оптимизация судовых обводов, численное моделирование буксировки

UDC: 629.5.(012+016+017):532

Optimization of a hull form for decrease ship resistance to movement

A. V. Pechenyuk

Digital Marine Technology,
of. 1, 4 Arcadievskiy lane, Odessa, 65062, Ukraine

E-mail: andrew@digitalmarine.net

Received 01.11.2016, after completion — 21.12.2016.

Accepted for publication 30.12.2016.

Optimization of hull lines for the minimum resistance to movement is a problem of current interest in ship hydrodynamics. In practice, lines design is still to some extent an art. The usual approaches to decrease the ship resistance are based on the model experiment and/or CFD simulation, following the trial and error method. The paper presents a new method of in-detail hull form design based on the wave-based optimization approach. The method provides systematic variation of the hull geometrical form, which corresponds to alteration of longitudinal distribution of the hull volume, while its vertical volume distribution is fixed or highly controlled. It's well known from the theoretical studies that the vertical distribution can't be optimized by condition of minimum wave resistance, thus it can be neglected for the optimization procedures. The method efficiency was investigated by application to the foreship of KCS, the well-known test object from the workshop Gothenburg-2000. The variations of the longitudinal distribution of the volume were set on the sectional area curve as finite volume increments and then transferred to the lines plan with the help of special frame transformation methods. The CFD towing simulations were carried out for the initial hull form and the six modified variants. According to the simulation results, examined modifications caused the resistance increments in the range 1.3–6.5 %. Optimization process was underpinned with the respective data analysis based on the new hypothesis, according to which, the resistance increments caused by separate longitudinal segments of hull form meet the principle of superposition. The achieved results, which are presented as the optimum distribution of volume present in the optimized designed hull form, which shows the interesting characteristics that its resistance has decrease by 8.9 % in respect to initial KCS hull form. Visualization of the wave patterns showed an attenuation of the transversal wave components, and the intensification of the diverging wave components.

Keywords: hull flow simulation, hull form optimization, numerical towing test

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2017, vol. 9, no. 1, pp. 57–65 (Russian).

1. 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. Вейнблум, 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.

2. 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 %.

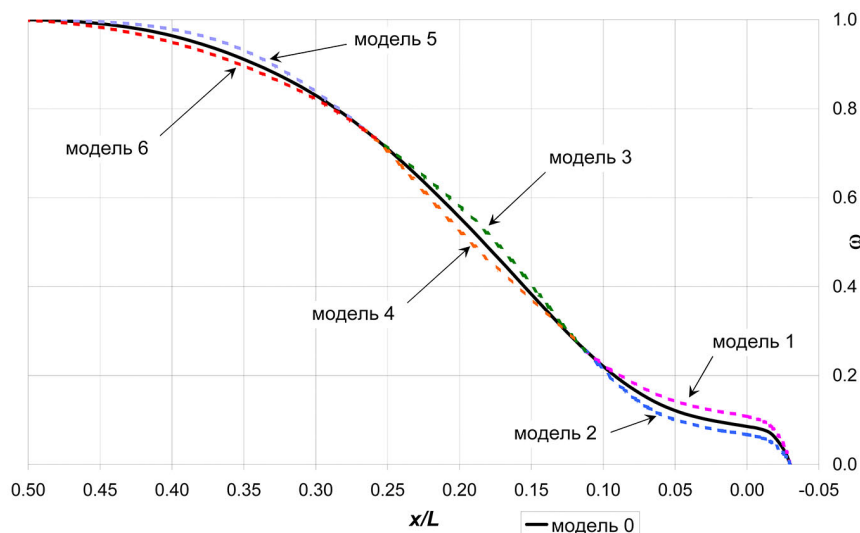


Рис. 1. Изменения формы носовой части судна, заданные на безразмерной строевой по шпангоутам

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.

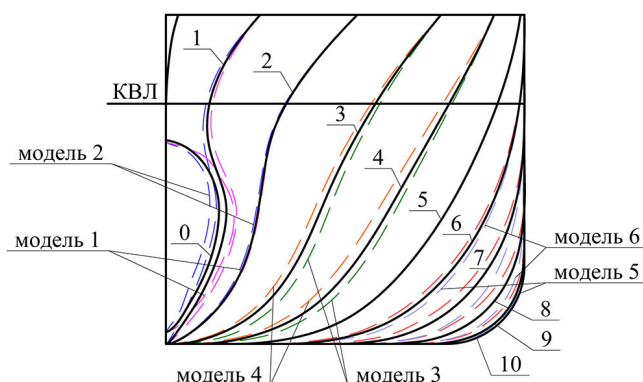


Рис. 2. Изменения формы носовой части судна, построенные на теоретическом чертеже

3. 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 стандартной (линейной двухпараметрической) $k-\epsilon$ модели турбулентности.

Моделирование буксировки выполнялось по схеме гидротка (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».

4. 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.

Таблица 1. Сопротивление моделей с модификациями

		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

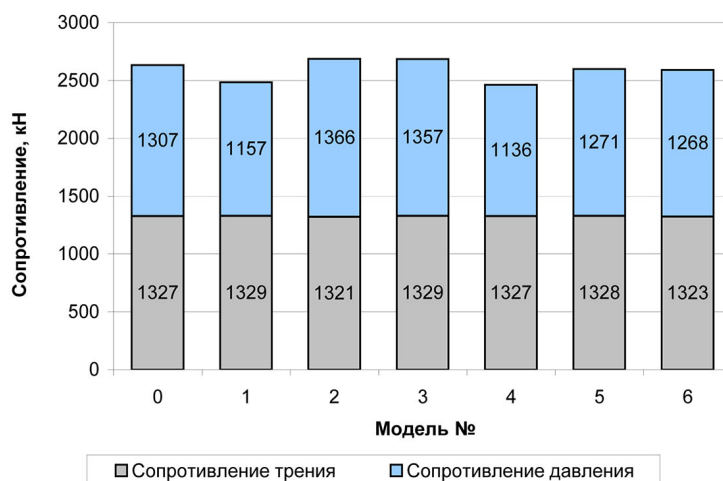


Рис. 3. Результаты численной оценки сопротивления корпуса KCS с исходной (0) и измененной (1–6) формой носовой части

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

5. 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 (см. 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.

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 приравниванию другого функционала заданной вели-

чине (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].

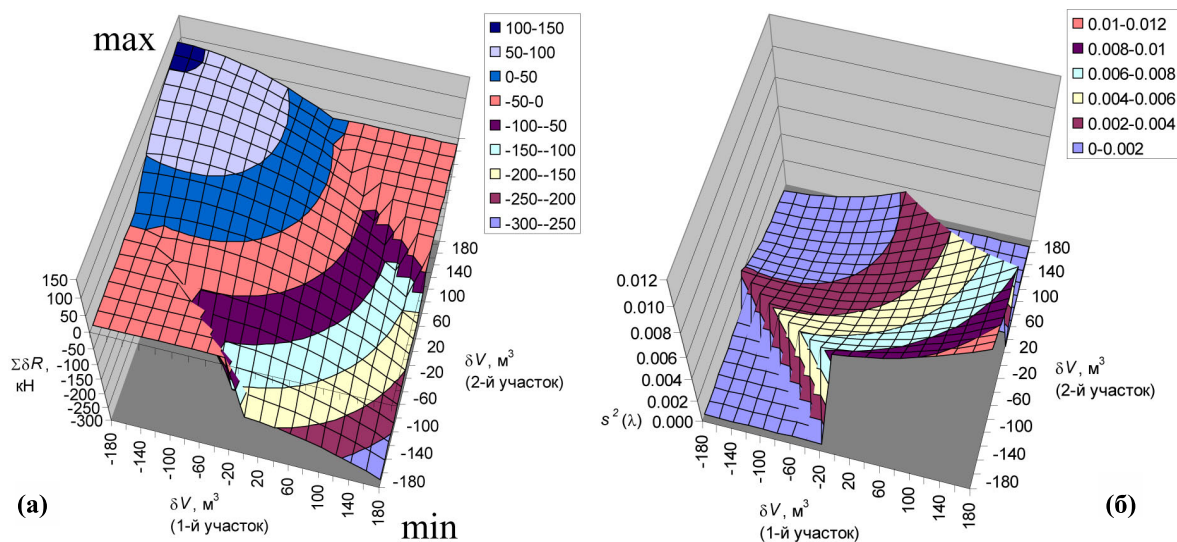


Рис. 4. Анализ результатов расчетов: а) зависимость суммарного приращения сопротивления корпуса от приращений водоизмещения на участках носовой части; б) зависимость дисперсии вариаций сопротивления по водоизмещению от приращений водоизмещения на участках носовой части

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.

6. 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.

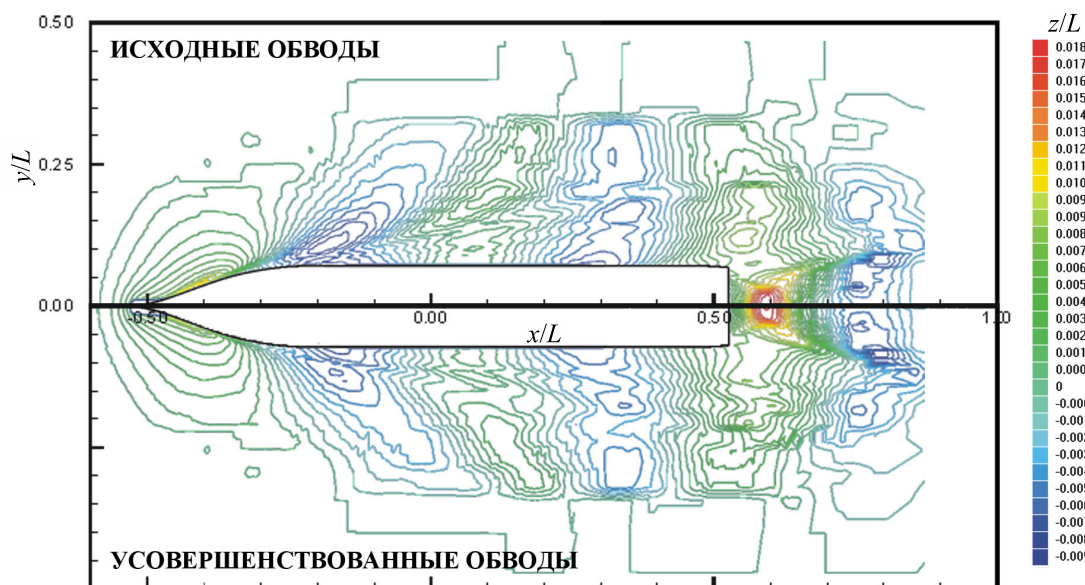


Рис. 5. Визуализация свободной поверхности изолиниями уровня на виде сверху в безразмерных координатах, отнесенных к длине судна L (сечения свободной поверхности на уровнях z/L показаны изолиниями в радужной цветовой шкале; цветная версия рисунка доступна в электронной версии на сайте журнала)

Как отмечено выше, модификации геометрии корпуса осуществлялись при условии постоянства формы палубы, поэтому сопровождалась перераспределением водоизмещения не только в продольном, но и в вертикальном направлении. В этом случае возникает вопрос о том, 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 (References)

- Крейн М. Г.* О форме судна наименьшего мичеллевского сопротивления // Аннотации докл. АН СССР на Всесоюзном съезде по теоретической и прикладной механике. — М., 1960. — С. 111–115.
Krejn M. G. O forme sudna naimen'shego michellevskogo soprotivlenija [About ship hull form of minimum Michell's resistance] // Annotacii dokl. AN SSSR na Vsesojuznom s#ezde po teoreticheskoy i prikladnoj mehanike. — Moscow., 1960. — P. 111–115 (in Russian).
- Павленко Г. Е.* Сопротивление воды движению судов. — М.: Морской транспорт, 1956. — 507 с.
Pavlenko G. E. Soprotivlenie vody dvizheniju sudov [Water resistance to movement of ships]. — Moscow.: Morskoj transport, 1956. — 507 p. (in Russian).
- Печенюк А. В.* Эталонное тестирование ПК FlowVision в задаче моделирования обтекания судового корпуса // Компьютерные исследования и моделирование. — 2014. — Т. 6. — С. 889–899.
Pechenyuk A. V. Jetalonnoe testirovanie PK FlowVision v zadache modelirovanija obtekanija sudovogo korpusa [Benchmarking of CEA FlowVision in ship flow simulation] // Computer Research and Modeling. — 2014. — Vol. 6. — P. 889–899 (in Russian).
- Сизов В. Г.* Об одном способе улучшения формы судна // Вестник ОНМУ. — Вып. 19. — Одесса: ОНМУ, 2006. — С. 14–19.
Sizov V. G. Ob odnom sposobe uluchshenija formy sudna [About a method of ship hull form improvement] // Bulletin of ONMU. — Issue 19. — Odessa: ONMU, 2006. — P. 14–19 (in Russian).
- Larsson L., Stern F., Bertram V.* Benchmarking of computational fluid dynamics for ship flow: the Gothenburg 2000 Workshop // J. Ship Res. — 2003. — Vol. 47. — P. 63–81.
- 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. — P. 17–36.