

# **ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОПУЛЬСИВНОГО КОМПЛЕКСА СУДНА ОГРАНИЧЕННОГО РАЙОНА ПЛАВАНИЯ НА БАЗЕ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ**

**Л. И. Вишневский**

д.т.н., ведущий научный сотрудник ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, профессор СПбГМТУ

**Г. В. Егоров**

д.т.н., генеральный директор Морского Инженерного Бюро

**Б. Н. Станков**

Digital Marine Technology, директор

**А. В. Печенюк**

Digital Marine Technology, руководитель отдела вычислительной гидродинамики судна

Постоянный рост цен на моторные топлива повышает требования к качеству проработки пропульсивных качеств судна на этапе проектирования. В настоящей статье изложены некоторые нестандартные подходы, примененные при проектировании пропульсивного комплекса судна ограниченного района плавания класса «Волго-Дон макс» проекта Морского Инженерного Бюро (МИБ) RSD19.

Класс «Волго-Дон макс», состоящий из наиболее крупных судов среди предназначенных для эксплуатации на внутренних водных путях СНГ, «определяется габаритными размерами шлюзов ВДРК и имеет максимально возможную для характеристической в реке осадки 3.60 м грузоподъемность до 5000 тонн, при этом грузоподъемность при максимальной осадке составляет около 7000 тонн» ([1]). Заметим, что ситуация на отечественном рынке услуг в области проектирования судов в последние годы складывалась таким образом, что значительная часть новых судов этого класса была построена или строится по проектам МИБ. В части обеспечения необходимых ходовых качеств проекты этих судов, как и многие другие проекты МИБ судов нового поколения, имеют некоторые общие особенности. Прежде всего, в качестве движительно-рулевого комплекса используются полноповоротные винторулевые колонки (ВРК), суда имеют высокий коэффициент общей полноты (порядка 0.9), обладают относительно более высокой энерговооруженностью, чем существующие суда этого назначения.

Вопрос о преимуществах и недостатках винторулевых колонок в качестве главных движителей судна ограниченного района плавания является гораздо более сложным, чем это может показаться на первый взгляд, и, по сути, не имеет однозначного ответа вне привязки к ряду конкретных условий, справедливых только для одного рассматриваемого судна. Винторулевые колонки с одной стороны определяют всю концепцию пропульсивной установки судна, а с другой – наделяют его рядом особенностей в области стоимости и технологичности постройки. Оставляя в стороне спор о влиянии ВРК на общие технико-экономические показатели проекта, отметим, что вопрос об их применении, и вообще о типе движительной установки, обычно решается судовладельцем на самых ранних стадиях проектирования и задачей проектанта остается оптимизация пропульсивных качеств судна с учетом выбора судовладельца.

Подобным образом начало работ по проекту RSD19 поставило перед МИБ в соответствии с указаниями заказчика – Волгоградского судостроительного завода, входящего в группу компаний «Морские и нефтегазовые проекты» - задачу создания в весьма сжатые сроки на базе отработанных решений по судам класса «Волго-Дон макс» с ВРК судна с двухвальной движительно-рулевой установкой традиционного типа,

включающей гребные винты фиксированного шага (ВФШ) в направляющих насадках и подвесные балансирные рули. Прямым прототипом при разработке проекта послужило судно проекта МИБ 006RSD05 (типа “Гейдар Алиев”), оборудованное ВРК фирмы “Shottel”. Повышение требований к району плавания (район I против II у прототипа) при сохранении максимально возможного дедвейта и габаритных ограничений, вместе с изменениями пропульсивной установки обусловили значительное усложнение проектно-конструкторских работ.

Между тем, борьба за качество проекта в данной ситуации требует реализации некоторых достоинств традиционной пропульсивной установки по сравнению с ВРК взамен утраты преимуществ последних. К явным преимуществам ВРК обычно относят упрощение технологичности и снижение стоимости постройки корпуса судна, улучшение маневренных качеств и упрощение управления судном, возможности их монтажа и демонтажа на плаву (для некоторых типов колонок), возможности их агрегатного ремонта. Недостатком ВРК является пониженный коэффициент полезного действия гребных винтов, обусловленный ограничением их диаметра в составе агрегата при применении на мелкосидящих судах. В связи с этим, при вынужденном отказе от ВРК закономерно желание проектанта обеспечить сравнительно более высокий коэффициент полезного действия установки за счет, прежде всего, размещения винтов оптимального диаметра.

**Для судна, главные размерения которого соответствуют ограничениям класса «Волго-Дон макс», с учетом столь значительного коэффициента общей полноты, это весьма непростая задача.**

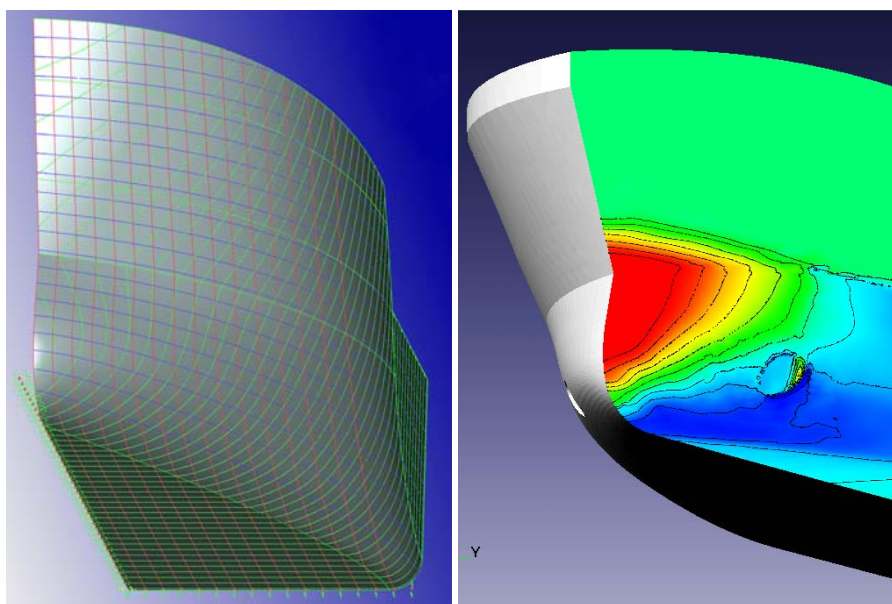
Традиционный путь решения такой задачи связан с проведением ряда модельных экспериментов в опытовом бассейне с целью отработки обводов кормовой части корпуса и взаимодействия элементов движительно-рулевого комплекса. Однако ввиду предельно коротких сроков проектирования, большинство проектов судов ограниченного района плавания, разрабатываемых сегодня в нашей стране, не используют результатов модельных экспериментов, хотя и нуждаются в этом зачастую больше, чем проекты океанских лайнеров. Хорошо известно, что в советском торговом флоте грузовые суда ограниченного района плавания строились в основном крупными сериями, а проработка их ходовых качеств выполнялась на основе анализа результатов многочисленных модельных экспериментов. Как следствие, продуманность обводов корпуса и элементов движительно-рулевого комплекса судов проектов 507Б, 1743 и некоторых других до сих пор является эталоном для специалистов.

Настоящая ситуация характерна еще и тем, что даже в случае проведения в рамках разработки проекта модельных испытаний, по срокам готовности и программе испытаний их результаты могут быть использованы лишь для проверки достижения судном контрактных ходовых качеств, но достаточно редко из-за сжатых сроков на принятие решения в целях оптимизации.

Выходом из сложившегося положения в данном случае оказалась возможность выполнения необходимых проработок на базе современных методов вычислительной гидродинамики, предложенная специалистами Digital Marine Technology (DMT). Методы вычислительной гидродинамики, реализованные в комплексе инженерного анализа, позволяют находить полную картину потока, обтекающего корпус судна, на ранних стадиях его проектирования, качественно решать задачи оптимизации формы корпуса и конфигурации выступающих частей; изучения условий работы движителей, рулевых и подруливающих устройств; нахождения характеристик ходовой посадки быстроходных судов; определения мощности энергетической установки судна. При этом можно получить не только величину сопротивления, но и картины распределения физических величин в потоке и по поверхности корпуса, что способствует более быстрому поиску эффективных путей улучшения гидродинамических качеств изучаемых объектов.

В рамках создания проекта RSD19 основные мероприятия по оптимизации гидродинамических качеств были связаны с разработкой обводов кормовой оконечности

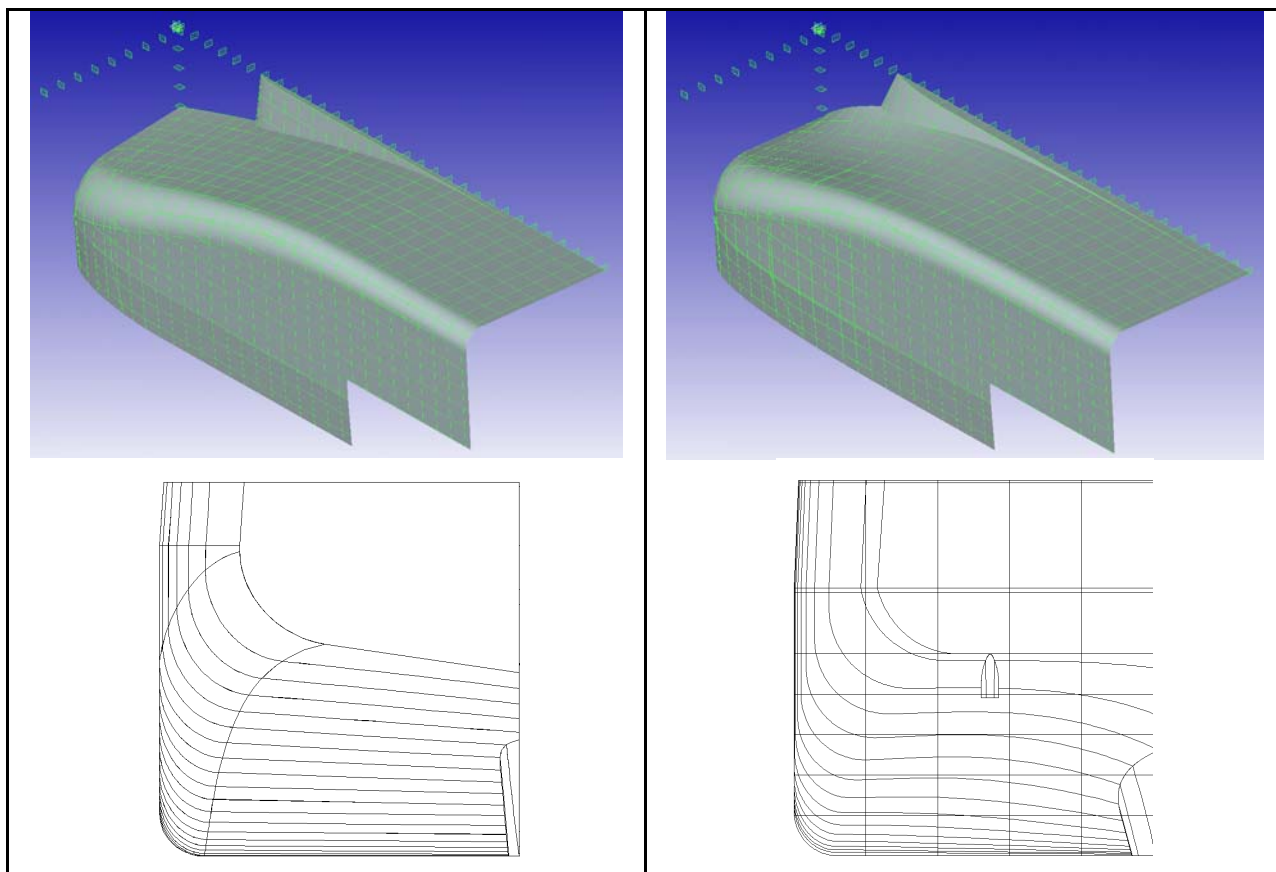
судна. Носовая оконечность, спроектированная ранее также с применением численных методов гидродинамики для судна проекта 006RSD05, была оставлена без изменений (см. рис. 1).



а б  
Рис. 1. Носовая оконечность судна:

а – модель теоретической поверхности; б – распределение динамического давления.

Исходя из оптимального коэффициента нагрузки по мощности, для судна были определены диаметры гребных винтов в направляющих насадках и общая конфигурация движительно-рулевого комплекса. В отличие от судов с ВРК, увеличенный диаметр гребных винтов потребовал применения кормовых полутоннелей (см. рис. 2).



а

б

Рис. 2. Кормовая оконечность:  
а – судна с ВРК (проект МИБ 006RSD05); б – с полутоннелями.

Форма полутоннелей и кормовой оконечности в целом была отработана путем последовательных корректировок вариантов по результатам численных расчетов. Большую роль в выборе формы тоннелей сыграло изучение линий тока по корпусу судна (см. рис. 3). Линии тока также хорошо иллюстрируют двумерный характер обтекания судна с  $V/T = 3.59$ , наблюдается так называемая «батоксная» схема.

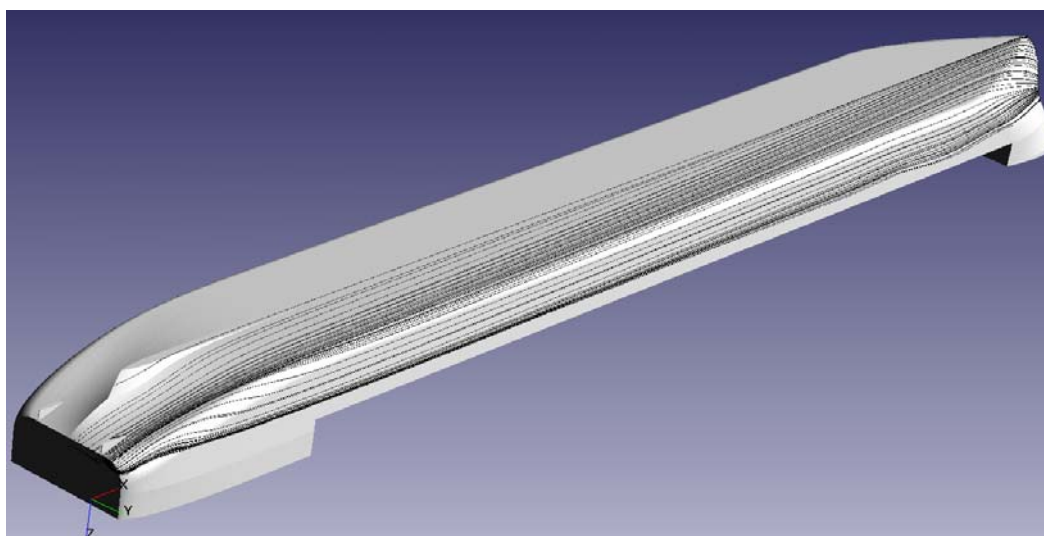


Рис. 3. Линии тока по корпусу судна при скорости 11.5 узлов

Нельзя не отметить, что режим движения судна, проектируемого на скорости хода 10 – 11 узлов ( $Fr = 0.14 - 0.16$ ), в значительной степени отличается от режимов с развитым волновым сопротивлением, характерным для большинства морских судов. Для наглядности на рис. 4 представлено распределение по составляющим полного сопротивления для окончательного варианта обводов судна проекта RSD19 при скорости буксировки 10.5 узлов, полученное численными методами.

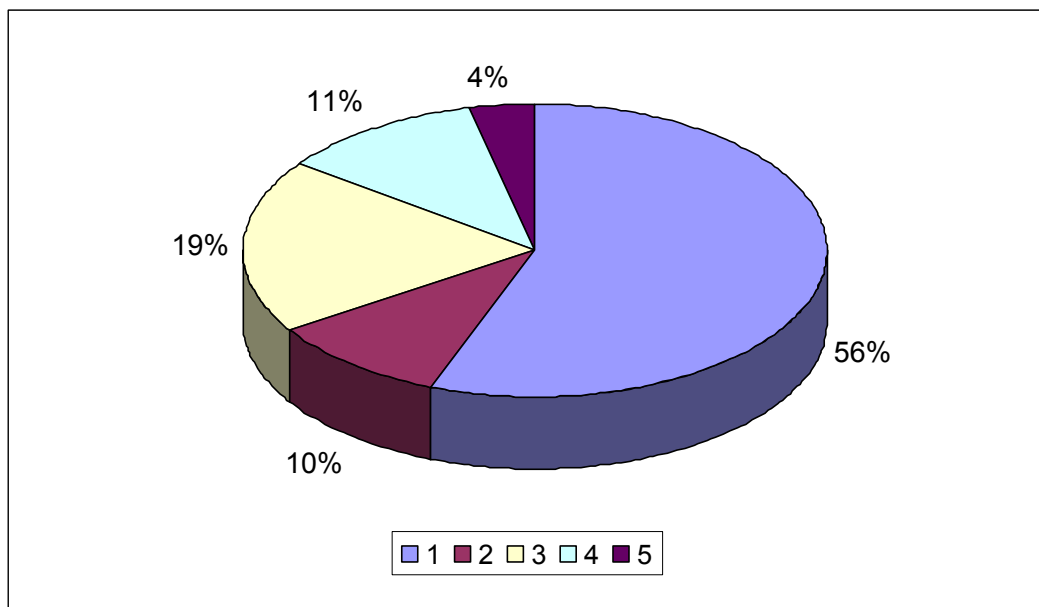
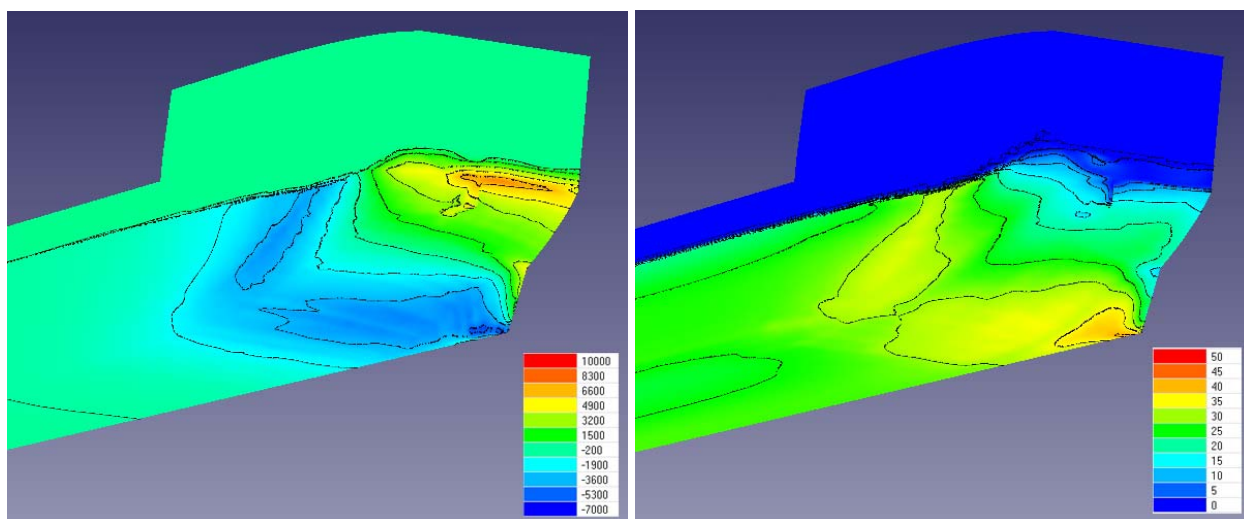


Рис. 4. Составляющие полного сопротивления:

1 – сопротивление трения; 2 – волновое сопротивление; 3 – сопротивление формы; 4 – сопротивление выступающих частей; 5 – воздушное сопротивление надводной части.

По этим причинам факторы, обуславливающие величины основных составляющих полного сопротивления, связаны с вязкостными явлениями.

Учитывая при этом полноту обводов и ограниченную осадку судна, для обеспечения хороших ходовых качеств особенно важно стремиться избежать развитых отрывов пограничного слоя в кормовой оконечности, особенно в районе установки движителей. В связи с этим при отработке формы кормовых обводов тщательно отслеживалась картина распределения касательных напряжений по поверхности корпуса, позволяющая судить об отрывных явлениях. На рис. 5,б представлено распределение касательных напряжений по поверхности окончательного варианта корпуса судна. Из рисунка видно, что околонулевые значения касательных напряжений, свидетельствующие об отрыве пограничного слоя, в кормовой оконечности имеют место лишь в районе транца и опор рулей (обтекание этих элементов неизбежно носит отрывной характер), то есть на значительном удалении в корму от движителей.



а б  
Рис. 5. Распределение напряжений по корпусу судна:  
а – нормальных (давление); б - касательных

Методы проектирования, некоторые примеры использования которых описаны выше, позволили в условиях тесного сотрудничества специалистов МИБ и ДМТ сократить время разработки теоретического чертежа до 20 календарных дней, по истечении которых были получены и переданы в распоряжение генерального проектанта: форма корпуса с учетом ее гидродинамической оптимизации, согласованная конфигурация выступающих частей и элементов движительно-рулевого комплекса (см. рис. 6), расчетные данные о буксировочном сопротивлении судна в интересующем диапазоне скоростей и прогноз скорости хода. В дальнейшем эти данные были уточнены и использованы для прогнозных расчетов ходовых качеств судна в балласте и грузу.

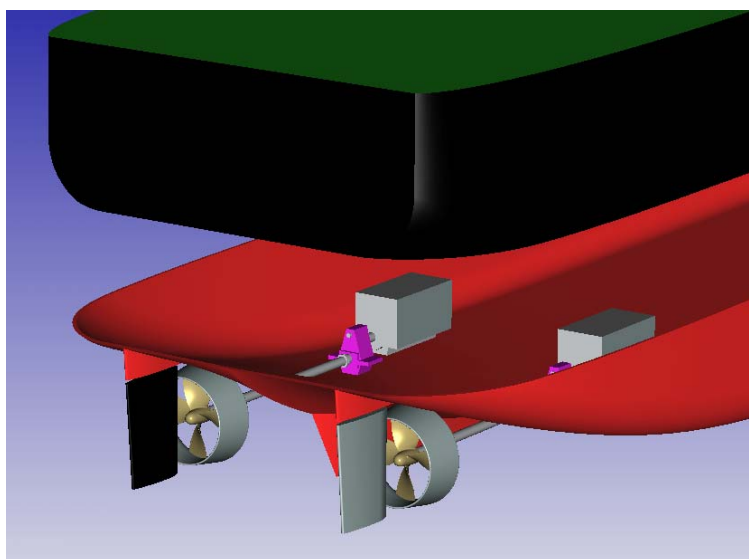


Рис. 6. Трехмерная модель компоновки движительно-рулевого комплекса

На последующих этапах разработки проекта в большом опытном бассейне ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова под руководством проф. Г.И. Каневского были выполнены буксировочные и самоходные испытания модели судна с целью проверки проектных решений и определения ходовых качеств. На рисунке 7 показаны фотографии модели из отчета [2].

По завершении работ, связанных с проектированием ходовых качеств судна, весьма интересно сопоставить результаты модельных испытаний и численных расчетов. Для основной гидродинамической характеристики корпуса – буксировочного сопротивления – сопоставление дано в таблице 1. В столбце 1 таблицы указана скорость судна в узлах, в столбце 2 – полное сопротивление судна по данным отчета ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова [2], в столбце 3 – сопротивление по данным отчета DMT [3]. Для полной корректности сравнения оказалось необходимым учесть, что специалисты ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова при пересчете результатов модельных испытаний приняли величину корреляционной надбавки к коэффициенту полного сопротивления с учетом окраски подводной поверхности корпуса самополирующимся покрытием (SPC) и по условию полного штиля; величина надбавки составила  $0.09e^{-3}$ . Специалисты DMT в своих расчетах ориентировались на указанную в [4] надбавку  $0.30e^{-3}$ , рекомендованную для средних условий испытаний. В столбце 3 таблицы 1 указаны результаты численных расчетов, выполненных в точности для условий, принятых при проведении натуральных испытаний.

При сравнении результатов очевидны их несущественные различия, уровень которых не превышает погрешностей эксперимента в современных гидродинамических лабораториях, оборудованных крупными бассейнами. Можно также отметить, что схема окраски корпуса, о которых шла речь выше, оказывает весьма небольшое влияние на величину полного сопротивления судна.

Сопоставление выглядит для численного метода тем более благоприятным, что явления, сопровождающие движение данного судна, отличаются значительной сложностью. Несмотря на низкие числа Фруда и связанное с этим небольшое влияние волнового сопротивления, большая полнота и необычные соотношения главных размерений обуславливают мощное вихреобразование и отрывы погранслоя. При этом существующее среди проектировщиков мнение о способности статистических методов, не учитывающих физических особенностей обтекания конкретного корпуса, заменить модельный эксперимент для судов ограниченного района плавания подобного типа, является явно ошибочным. Это хорошо иллюстрируется сопоставлением результатов эксперимента и численного расчета с результатами расчета полного сопротивления судна проекта RSD19 методом Холтропа – Меннена [5], который получил большое распространение в практике проектирования. Результаты сопоставления представлены на рисунке 8. Расчет статистическим методом, несмотря на тщательно подготовленные данные о геометрических характеристиках корпуса, позволил определить полное сопротивление судна лишь с 35-40% погрешностью.



Рис. 7. Самоходная модель судна проекта RSD19, выполненная ЦНИИ им. акад. А.Н.Крылова

Для прогнозирования ходовых качеств помимо точного определения буксировочного сопротивления, необходимо также получить коэффициенты взаимодействия движителей и корпуса судна. Экспериментальный подход к этой проблеме заключается в проведении самоходных испытаний, в ходе которых по характеристикам моделей гребных винтов за моделью корпуса определяются требуемые коэффициенты взаимодействия. Этот способ в настоящее время является наиболее точным. Однако и численные методы гидродинамики позволяют моделировать взаимодействие движителей с корпусом. В первом приближении коэффициент попутного потока может быть определен измерением номинального поля скоростей в диске гребного винта (см. рис. 9), а коэффициент засасывания – на основании эмпирических зависимостей между ним и коэффициентом попутного потока. Такая схема в принципе позволяет выполнять прогноз ходовых качеств судов изученных типов с хорошей точностью, однако игнорирует зависимость коэффициентов взаимодействия от нагрузки движителей по мощности, то есть эффективную составляющую взаимодействия. Другой путь численного моделирования позволяет учесть и эти факторы.



Таблица 1

Vs, узл.	Полное сопротивление Rt, кН		
	ЦНИИ Крылова, корпус с SPC	DMT, свежеокрашенный корпус	DMT, корпус с SPC
1	2	3	4
8.0	75.3	74.56	72.74
9.5	107.5	111.04	108.19
10.5	137.2	138.94	137.08
11.5	179.2	177.03	176.54
12.5	234.3	234.84	229.11

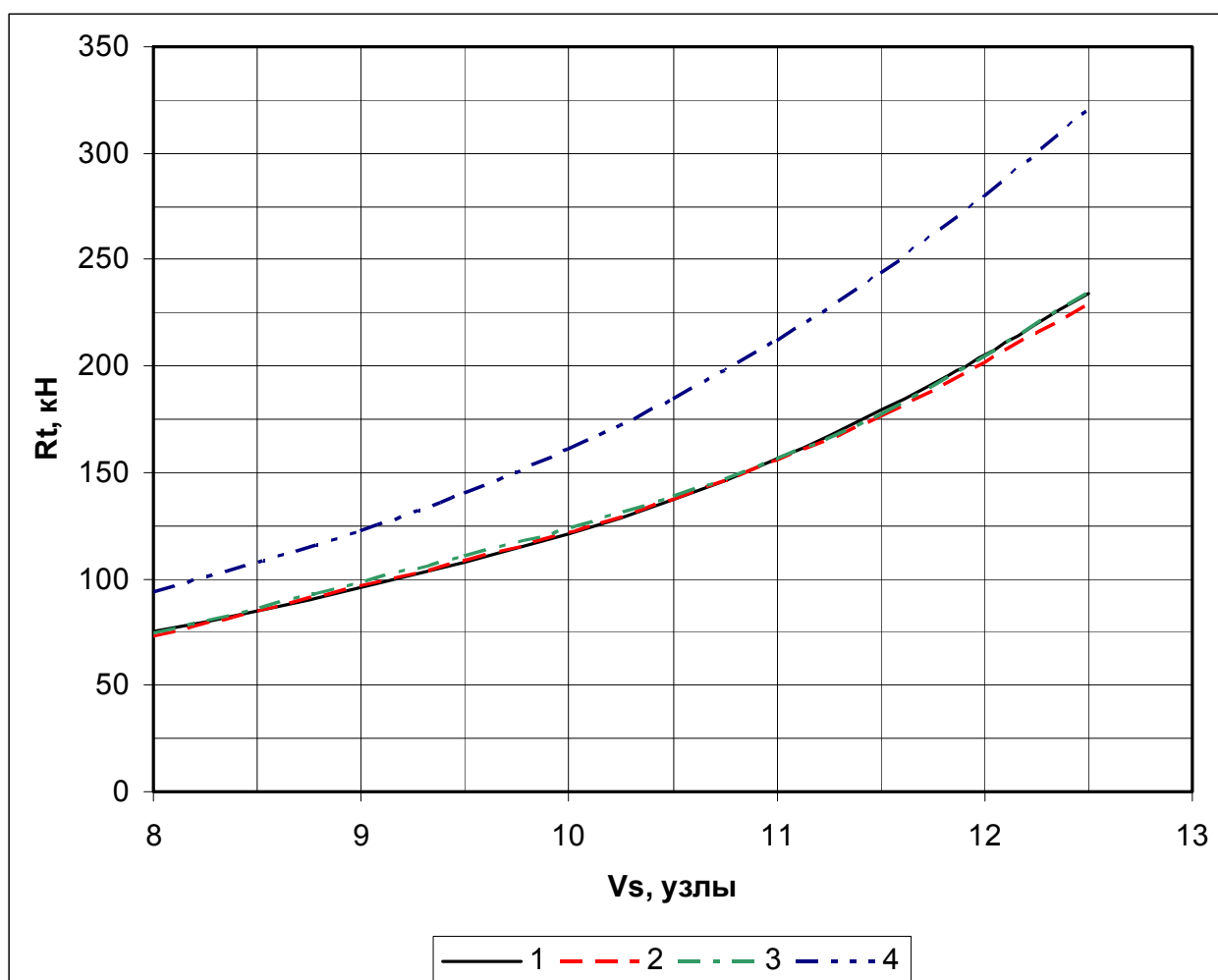


Рис. 8. Сопоставление полного сопротивления судна RSD19 по данным: 1 – модельного эксперимента; 2,3 – расчета численными методами гидродинамики; 4 – расчета методом Холтропа – Меннена

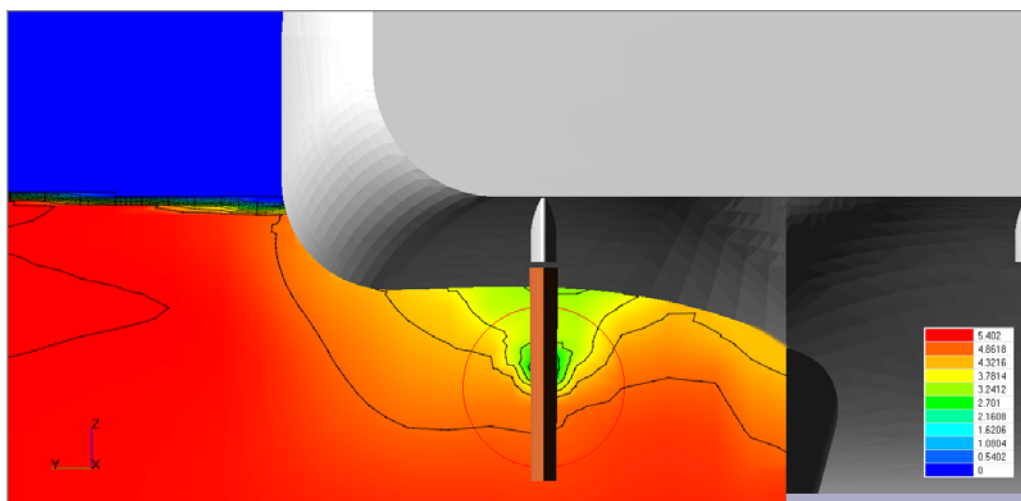
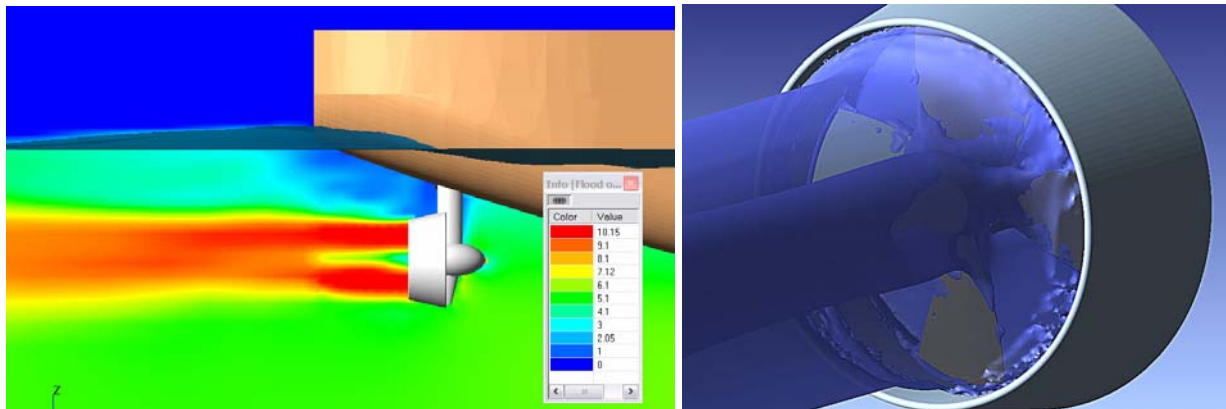


Рис. 9. Поле скоростей номинального попутного потока

Учет эффективных составляющих взаимодействия численными методами осуществляется путем совместного расчета обтекания корпуса потоком, обусловленным его буксировкой, и потоком, обусловленным работой движителя, который создается с помощью упрощенной (см. рис. 10, а) или точной (рис. 10, б) модели последнего. Такая методика очень близка к самоходным испытаниям «в жесткой запряжке». Засасывающая сила определяется при этом непосредственно как часть сопротивления судна. Применение методики сопровождается значительными сложностями постановки расчетов, но, вместе с тем, предоставляет подробную информацию о физических особенностях взаимодействия элементов пропульсивной системы, которая очень полезна для их оптимизации.



а

б

Рис. 10. Моделирование взаимодействия судовых движителей с корпусом судна численными методами:

а – упрощенная модель ГВ в насадке; б – точная модель

Применительно к судну проекта RSD19 прогноз скорости хода на испытаниях при одинаковых условиях оказался весьма близким по данным самоходных модельных испытаний и расчетов по приближенной схеме с использованием результатов численных расчетов буксировочного сопротивления; скорость судна при 15% запаса мощности главных двигателей составила около 11.9 узлов. Под одинаковыми условиями здесь понимается принятый запас мощности главных двигателей, с учетом которого подбирается шаг гребных винтов. Однако нормирование запаса мощности главных двигателей для судна рассматриваемого типа представляет собой отдельную сложную проблему.

По результатам эксплуатации существующих судов ограниченного района плавания часто наблюдается следующая ситуация. Суда, спроектированные с точки зрения прочности корпуса на определенный район плавания в море с учетом заданной интенсивности морского волнения, не в состоянии на практике эффективно поддерживать требуемые курс и скорость хода в этих условиях. Это вызвано недостаточным проектным запасом мощности главных двигателей, поскольку он, как правило, выбирается исходя из методики, принятой для обычных морских судов (так называемый «морской запас»). Очевидно, для судов ограниченного района плавания с коэффициентом полноты около 0.9 и нетрадиционными соотношениями главных размерений такой запас мощности может оказаться недостаточным. Проблема эта не может быть качественно решена лишь путем увеличения запасов мощности, так как в хороших условиях эксплуатации главные двигатели будут работать на неполных режимах.

Возможно, полезным для судов ограниченного района плавания является применение винтов регулируемого шага или изменяемой геометрии [6], [7].

Оценивая в целом результаты работ по оптимизации гидродинамических качеств судна проекта RSD19, можно отметить следующее:

1. Удалось отыскать комбинацию элементов движительно-рулевого комплекса и обводов корпуса, которая обеспечила достаточно высокие ходовые качества судна.

2. Применение движительного комплекса «гребной винт в насадке» позволяет получить на режимах полного хода в грузу величины пропульсивного коэффициента свыше 0.6, что подтверждается результатами численных расчетов и модельных экспериментов.

3. Методики, основанные на современных численных методах гидродинамики, продемонстрировали результаты, сопоставимые с результатами модельного эксперимента.

Это позволяет считать, что применение современных численных методик при проектировании судов ограниченного района плавания является весьма полезным.

**Благодарности.** Авторы высказывают искреннюю благодарность проф. Г.И. Каневскому за научное редактирование статьи и высококомпетентные рекомендации по улучшению ее содержания.

## Литература

1. Егоров Г.В. Выбор главных элементов сухогрузных и нефтеналивных судов смешанного «река-море» плавания // Судостроение. – 2004. - № 6. - С.10 - 16.
2. Исследование ходовых качеств сухогрузного судна проекта RSD19. – Научно-технический отчет, Выпуск № 43433. – СПб, ЦНИИ им акад. А.Н.Крылова, 2005. – 53 с.
3. Форма корпуса и ходкость судна. Проект RSD19. - Выпуск ДМТ – 05 – 005, 2005. – 47 с.
4. Справочник по теории корабля: В трех томах. - Том 1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители / Под ред. Я.И. Войткунского. – Л.: Судостроение, 1985. – 768 с.
5. Holtrop J., Mennen G.G.J. An Approximate Power Prediction Method // International Shipbuilding Progress. - 1982. - Vol. 29. – P.166 – 170.
6. Вишневский Л.И., Зубахин В.Ф., Сизов И.И. Особенности конструкции и перспективы применения винтов с подвижным креплением лопастей на транспортных судах // Труды международной конференции «Военно-морской флот и судостроение в современных условиях». - СПб, 1996. – С. 245 – 253.
7. Тогуняц А.Р., Печенюк А.В., Вишневский Л.И. Совершенствование ходкости скоростных судов путем использования винтов с подвижным креплением лопастей на ступице // Труды международной конференции “FAST’2005”. - СПб, 2005. – С. 521 – 526.