

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

Л. И. Вишнеvский, докт. техн. наук (ФГУП «ЦНИИ им. академика А. Н. Крылова»), Г. В. Егоров, докт. техн. наук (Морское Инженерное Бюро), Б. Н. Станков, А. В. Печенюк (Digital Marine Technology)

УДК 629.5.031/038.001.63

Рост цен на моторные топлива вызывает необходимость повышать требования к пропульсивным качествам судна на этапе проектирования. В настоящей статье изложены некоторые нестандартные подходы при проектировании пропульсивного комплекса судна ограниченного района плавания класса «Волго-Дон макс» пр. RSD19 Морского Инженерного Бюро (МИБ).

Класс «Волго-Дон макс», состоящий из наиболее крупных судов для эксплуатации на внутренних водных путях СНГ, определяется габаритными размерами шлюзов Волго-Донского речного канала и имеет максимально возможную для характеристической в реке осадки 3,6 м грузоподъемность 5000 т, которая при максимальной осадке составляет около 7000 т [1]. В последние годы на отечественном рынке 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: в качестве движительно-рулевого комплекса (ДРК) используются полноповоротные винторулевые колонки (ВРК), суда имеют высокий коэффициент общей полноты (порядка 0,9) и более высокую энерговооруженность, чем существующие суда этого назначения.

Вопрос о преимуществах и недостатках ВРК в качестве главных движителей на судах ограниченного района плавания не имеет однозначного ответа вне привязки к ряду конкретных условий, справедливых только для рассматриваемого судна. С одной стороны, ВРК определяют всю концепцию пропульсивной установки суд-

на, а с другой — влияют на стоимость и технологичность 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.

Заказчик пр. RSD19 — Волгоградский судостроительный завод, входящий в группу компаний «Морские и нефтегазовые проекты», — поставил перед МИБ задачу создать в сжатые сроки на базе отработанных решений по судам класса «Волго-Дон макс» с ВРК суда с двухвальной движительно-рулевой установкой традиционного типа, включающей гребные винты (ГВ) фиксированного шага в направляющих насадках и подвесные балансирные рули. За прототип

было взято судно пр. 006RSD05 типа «Гейдар Алиев» (МИБ), оборудованное ВРК фирмы Schottel. Изменение требований к району плавания (район I вместо II у прототипа) при сохранении максимально возможного дедвейта и габаритных ограничений, а также изменение пропульсивной установки обусловило значительное усложнение проектно-конструкторских работ.

В данной ситуации требовалась оптимизация некоторых достоинств традиционной пропульсивной установки с целью компенсации утрачиваемых преимуществ ВРК. К явным преимуществам ВРК относят упрощение технологии и снижение стоимости постройки корпуса судна, улучшение маневренных качеств и упрощение управления судном, возможность монтажа и демонтажа на плаву (для некоторых типов колонок), а также агрегатного ремонта. Недостатком ВРК является пониженный КПД гребных винтов, обусловленный ограничением их диаметра при применении на мелкосидящих судах. В связи с этим, при вынужденном отказе от ВРК закономерно желание проектанта обеспечить сравнительно более высокий КПД установки за счет, прежде всего, размещения винтов оптимального диаметра.

Для судна, главные размерения которого соответствуют классу «Волго-Дон макс», при столь значительном коэффициенте общей полноты это весьма непростая задача.

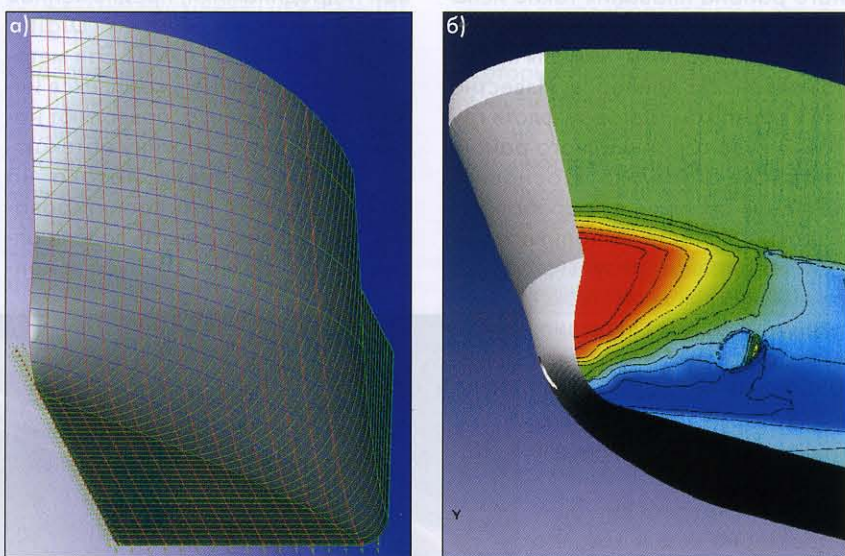


Рис. 1. Носовая оконечность судна: а — модель теоретической поверхности; б — распределение динамического давления

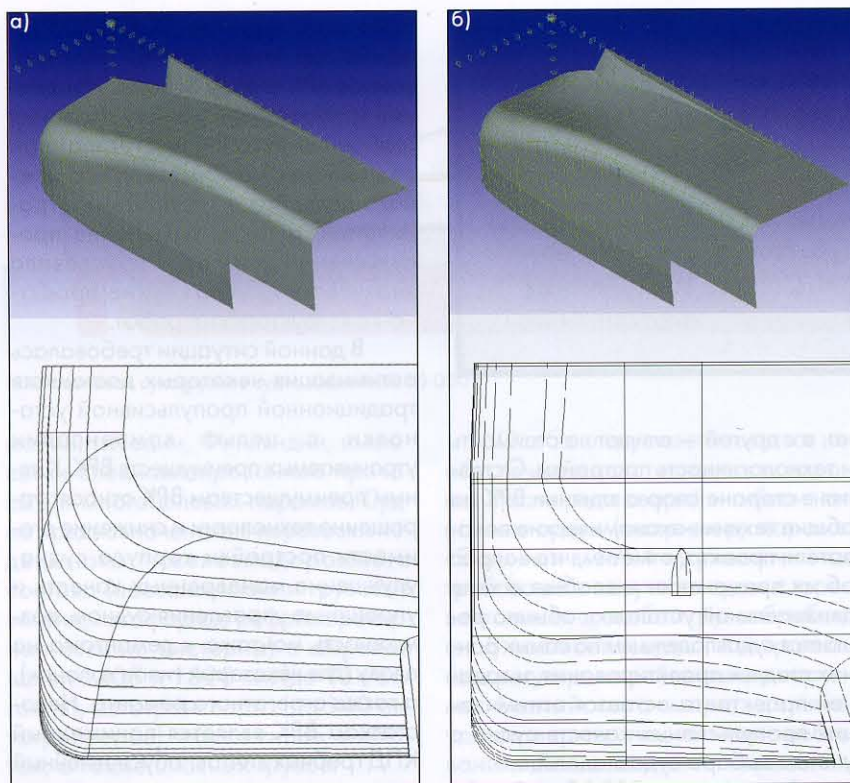


Рис. 2. Кормовая оконечность: а — судна с ВПК пр. 006RSD05 (МИБ); б — с полутоннелями

Традиционное решение такой задачи связано с проведением ряда модельных испытаний в опытовом бассейне с целью отработки обводов кормовой части корпуса и взаимодействия элементов ДПК. Однако из-за сжатых сроков проектирования для большинства разрабатываемых сегодня в нашей стране проектов судов ограниченного района плавания такие испытания не проводятся, хотя часто они более необходимы, чем для проектов океанских лайнеров. 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, обводы корпуса и элементы ДПК судов пр. 507Б, 1743 и некоторых других до сих пор являются эталоном для специалистов.

Сложившаяся ситуация характерна еще и тем, что даже в случае проведения в ходе разработки проекта модельных испытаний, по срокам готовности и про-

грамме 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 положения в данном случае явилось выполнение необходимых проработок на базе современных методов вычислительной гидродинамики, предложенное специалистами фирмы Digital Marine Technology (DMT). Эти методы, реализованные в комплексе инженерного анализа, позволяют наблюдать полную картину обтекающего корпус судна потока на ранних стадиях его проектирования, качественно решать задачи оптимизации формы корпуса и кон-

фигурации выступающих частей; изучать условия работы движителей, рулевых и подруливающих устройств; находить характеристики ходовой посадки быстроходных судов; определять мощность энергетической установки судна. При этом можно определить 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.

Основные мероприятия по оптимизации гидродинамических качеств пр. RSD19 были связаны с разработкой обводов кормовой оконечности судна. Носовая оконечность, спроектированная ранее также с применением численных методов гидродинамики для судна пр. 006RSD05, была оставлена без изменений (рис. 1).

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

Форму полутоннелей и кормовой оконечности обрабатывали путем последовательных корректировок вариантов по результатам численных расчетов. Большую роль в выборе формы тоннелей сыграло изучение линий тока по корпусу судна (рис. 3). Линии тока также хорошо иллюстрируют двумерный характер обтекания судна с  $V/T = 3,59$ , при этом наблюдается так называемая «батоксная» схема.

Необходимо отметить, что режим движения судна, проектируемого на скорость хода 10–11 уз ( $Fr = 0,14–0,16$ ), 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 пр. RSD19 при скорости буксировки 10,5 уз, полученное численными методами.

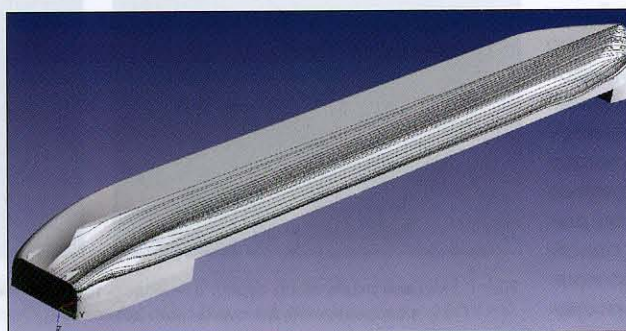


Рис. 3. Линии тока по корпусу судна при скорости 11,5 уз

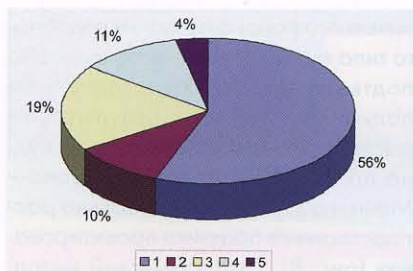


Рис. 4. Составляющие полного сопротивления: 1 — сопротивление трения; 2 — волновое сопротивление; 3 — сопротивление формы; 4 — сопротивление выступающих частей; 5 — воздушное сопротивление надводной части

При таком распределении сопротивления 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 избегать развитых отрывов пограничного слоя в кормовой оконечности, особенно в районе установки движителей. В связи с этим при отработке формы кормовых обводов тщательно отслеживалось распределение касательных напряжений по поверхности корпуса, позволяющее судить об отрывных явлениях. Из рис. 5, б 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), т. е. на значительном удалении в корму от движителей.

Методы проектирования, примеры использования которых описаны выше, позволили специалистам МИБ и DMT сократить время разра-

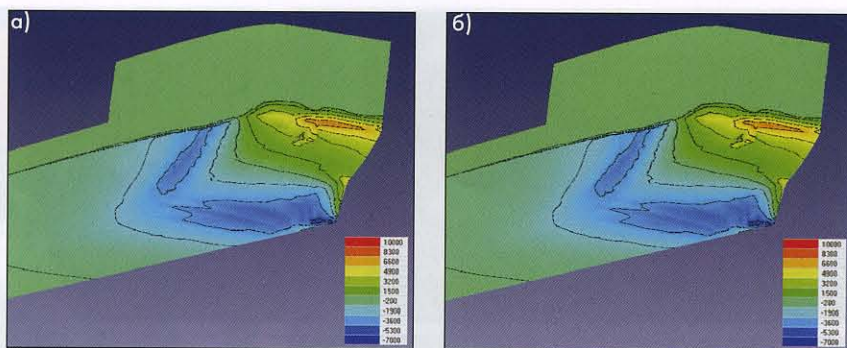


Рис. 5. Распределение напряжений по корпусу судна: а — нормальных (давление); б — касательных

ботки теоретического чертежа до 20 календарных дней. В итоге были получены и переданы в распоряжение генерального проектианта: форма корпуса с учетом ее гидродинамической оптимизации, согласованная конфигурация выступающих частей и элементов ДРК (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.

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

После завершения работ по определению ходовых качеств судна были сопоставлены результаты модельных испытаний и численных расчетов. Для основной гидродинамической характеристики корпуса — буксировочного сопротивления — сопоставление дано в таблице. Для полной корректности сравнения необходимо учесть, что специалисты ЦНИИ им. академика А. Н. Крылова при пересчете результатов модельных испытаний приняли величину корреляционной надбавки к коэффициенту полного сопротивления с учетом окраски подводной части корпуса самополирующимся покрытием (SPC) и при условии полного штиля, т. е.  $0,09e^{-3}$ . Специалисты DMT в своих расчетах ориентировались на указанную в [4] надбавку  $0,30e^{-3}$ , рекомендо-

ванную для средних условий испытаний. В столбце 3 таблицы указаны результаты численных расчетов, выполненных для условий, принятых при проведении натурных испытаний.

При сравнении результатов очевидны их несущественные различия, не превышающие погрешностей эксперимента в современных гидродинамических лабораториях с крупными бассейнами. Покрытие SPC также незначительно влияет на величину полного сопротивления судна.

Анализ показывает, что численный метод имеет большее преимущество, так как 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 пограничного слоя. При этом мнение некоторых проектировщиков о способности статистических методов расчета, не учитывающих физических особенностей обтекания конкретного корпуса, полностью заменить модельный эксперимент для судов огра-

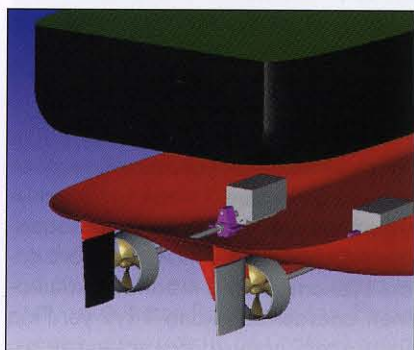


Рис. 6. Трехмерная модель компоновки движительно-рулевого комплекса

Сравнительные характеристики буксировочного сопротивления

$V_s, \text{уз}$	Полное сопротивление $R_t$ , кН		
	ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, корпус с SPC [2]	DMT, свежеокрашенный корпус [3]	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

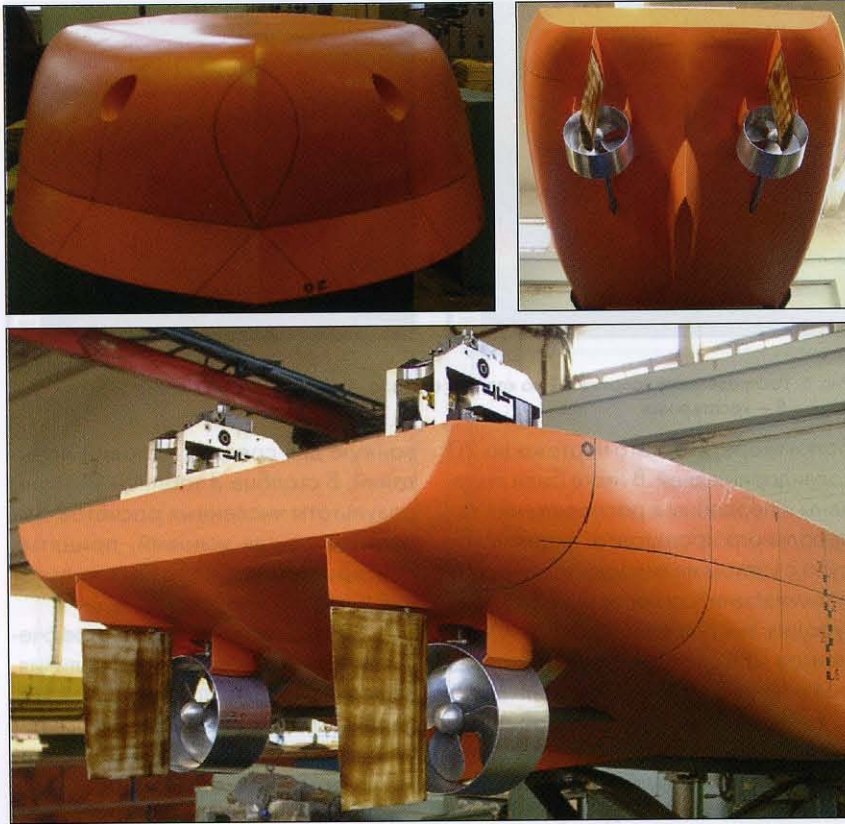


Рис. 7. Самоходная модель судна пр. RSD19, выполненная ЦНИИ им. академика А. Н. Крылова

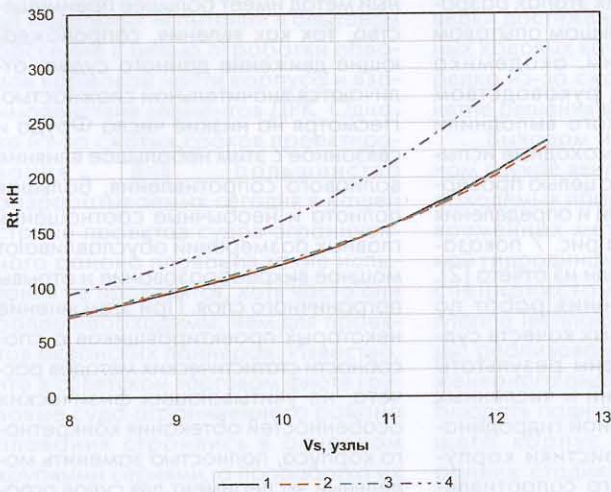


Рис. 8. Сопоставление полного сопротивления судна пр. RSD19 по данным: 1 — модельного эксперимента; 2, 3 — расчета численными методами гидродинамики; 4 — расчета методом Холтропа—Меннена

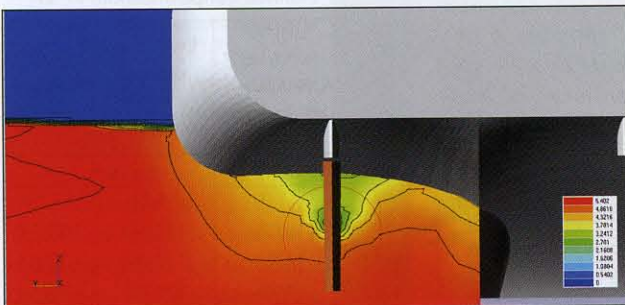


Рис. 9. Поле скоростей номинального попутного потока

ниченного района плавания подобно-го типа является явно ошибочным. Это подтверждается сопоставлением полученных данных с результатами расчета полного сопротивления судна пр. RSD19 методом Холтропа—Меннена [5], который довольно распространен в практике проектирования (рис. 8). Статистический метод, несмотря на тщательно подготовленные данные о геометрических характеристиках корпуса, позволил определить полное сопротивление судна с погрешностью 35—40%.

Для прогнозирования ходовых качеств, помимо точного определения буксировочного сопротивления, необходимо также получить коэффициенты взаимодействия движителей и корпуса судна. Они определялись в ходе самоходных модельных испытаний. 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 ГВ (рис. 9), а коэффициент засасывания —

на основании эмпирических зависимостей между ГВ 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, т. е. эффективную составляющую взаимодействия. Другой путь численного моделирования позволяет учесть и эти факторы — это совместный расчет обтекания корпуса потоком в результате его буксировки и потоком, обусловленным работой движителя, который создается с помощью упрощенной или точной (рис. 10 а, б) модели последнего. Такая методика очень близка к самоходным испытаниям «в жесткой запряжке». При этом засасывающая сила определяется непосредственно как часть сопротивления судна. Применение методики сопровождается значительными сложностями при расчетах, но вместе с тем предоставляет подробную информацию о физических особенностях взаимодействия элементов пропульсивной системы для их оптимизации.

Применительно к судну пр. RSD19 прогноз скорости хода на испытаниях при одинаковых условиях оказался весьма близким к данным самоходных модельных испытаний и расчетов по приближенной схеме с использованием результатов численных расчетов буксировочного сопротивления; скорость судна при 15%-м запасе мощности главных двигателей составила около 11,9 уз. Под одинаковыми условиями здесь понимается принятый запас мощности двигателей, с учетом которого подбирается шаг ГВ. Однако нормирование запаса мощности для

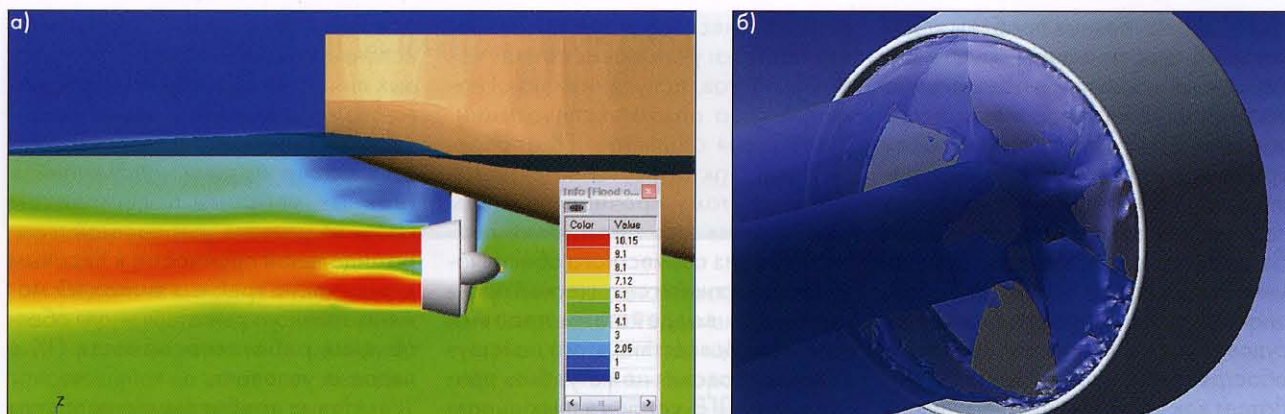


Рис. 10. Моделирование взаимодействия судовых движителей с корпусом судна численными методами:

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

судна рассматриваемого типа представляет собой отдельную сложную проблему.

По результатам эксплуатации существующих судов ограниченного района плавания часто наблюдается следующая ситуация. Корпуса судов, спроектированных (с точки зрения прочности) 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 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 размеров это может оказаться недостаточным. Проблема эта не может быть качественно решена лишь путем уве-

личения запаса мощности, так как в нормальных условиях эксплуатации двигатели будут работать на неполных режимах.

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

Оценивая результаты работ по оптимизации гидродинамических качеств судна пр. RSD19, отметим следующее:

1. Найдена комбинация элементов движительно-рулевого комплекса и обводов корпуса, обеспечившая достаточно высокие ходовые качества судна.

2. Применение движительного комплекса «гребной винт в насадке» позволяет получить на режимах полного хода в грузу пропульсивный коэффициент свыше 0,6, что подтверждается результатами численных расчетов и модельных экспериментов.

3. Методики, основанные на современных численных методах гидродинамики, продемонстрировали резуль-

таты, сопоставимые с результатами модельного эксперимента.

#### Литература

1. Егоров Г. В. Выбор главных элементов сухогрузных и нефтеналивных судов смешанного «река—море» плавания // Судостроение. 2004. № 6.
2. Исследование ходовых качеств сухогрузного судна проекта RSD19 // Научно-техн. отчет. Вып. № 43433. СПб.: ЦНИИ им академика А. Н. Крылова, 2005.
3. Форма корпуса и ходкость судна. Проект RSD19. Вып. DMT — 05—005, 2005.
4. Справочник по теории корабля: В 3-х томах. Том 1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители / Под ред. Я. И. Войткунского. Л.: Судостроение, 1985.
5. Holtrop J., Mennen G. G. J. An Approximate Power Prediction Method // International Shipbuilding Progress. 1982. Vol. 29.
6. Вишневецкий Л. И., Зубахин В. Ф., Сизов И. И. Особенности конструкции и перспективы применения винтов с подвижным креплением лопастей на транспортных судах // Труды междунар. конф. «Военно-морской флот и судостроение в современных условиях». СПб., 1996.
7. Тогуняц А. Р., Печенюк А. Р., Вишневецкий Л. И. Совершенствование ходкости скоростных судов путем использования винтов с подвижным креплением лопастей на ступице // Труды междунар. конф. «FAST'2005». СПб., 2005.

## НОВЫЕ ТРЕБОВАНИЯ РОССИЙСКОГО МОРСКОГО РЕГИСТРА СУДОХОДСТВА К ПРОПУЛЬСИВНЫМ КОМПЛЕКСАМ ЛЕДОКОЛЬНЫХ СУДОВ

А. В. Андрияшин, канд. техн. наук (ФГУ «Российский морской регистр судоходства»)

УДК 626/627: 624.042.43

Разработка перспективных нефтегазоконденсатных месторождений на арктическом шельфе — одна из актуальных для России задач. Ее решение невозможно без современного ледокольного флота, включающе-

го ледоколы и транспортные суда ледового плавания (далее — СЛП).

До середины 90-х годов прошлого века СЛП в основном оборудовались традиционной пропульсивной системой: открытый ледо-

кольный гребной винт (ЛГВ) фиксированного шага (ВФШ)—валопровод—электродвигатель. В настоящее время для повышения эксплуатационной эффективности на СЛП устанавливаются современные пропульсивные комплексы (ПК) — винторулевые колонки, которые могут оснащаться винтами регулируемого шага (ВРШ). Наиболее перспективны СЛП двойного действия типа DAT<sup>1</sup>. В ледовых условиях они движутся винтами (кормой) вперед, что приводит к снижению ледового сопротивления и повышению эксплуатационной эффективности.

<sup>1</sup>DAT — Double-Acting Tanker.