

## ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС FLOWVISION КАК СОВРЕМЕННЫЙ ИНСТРУМЕНТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СУДОВЫХ ОБВОДОВ<sup>1</sup>

А. А. Аксенов, С. В. Жлуктов (ООО «ТЕСИС», [www.tesis.com.ru](http://www.tesis.com.ru)),  
А. С. Петров (ЗАО «Спецсудопроект», [www.s-s-p.uspb.ru](http://www.s-s-p.uspb.ru)),  
А. В. Печенюк, Б. Н. Станков (Digital Marine Technology,  
[www.digitalmarine.net](http://www.digitalmarine.net))

УДК 658.012:629.5

Вычислительная гидродинамика используется для проектирования обводов судов практически всеми ведущими конструкторскими бюро в России, Украине и других странах. Методы вычислительной гидродинамики позволяют проводить оптимизацию формы корпуса, которую не может полностью обеспечить сравнительно дорогостоящий и длительный эксперимент в опытовом бассейне.

Теоретические методы вычислительной гидродинамики стали интенсивно разрабатываться в начале XX века. За короткое время они достигли высокого уровня развития. Аналитически были получены важные результаты, касающиеся природы волнового сопротивления судна и формы корпуса с наименьшим сопротивлением. Трудности аналитического описания произвольной судовой поверхности и развитие компьютерных вычислений дали импульс развитию численного варианта теоретических методов. С помощью численного моделирования удалось решить проблему согласования чисел Фруда и Рейнольдса в натурном масштабе, чего невозможно было добиться в модельном эксперименте.

Существенным обстоятельством, позволившим начать эффективное внедрение численных методов в проектную практику, стало развитие высокопроизводительной вычислительной техники. Происходящее сейчас увеличение быстродействия параллельных компьютеров, совершенствование вычислительных методов и программного обеспечения способствуют оперативному и гибкому выполнению больших объемов численных расчетов при проектировании судовых обводов, что сокращает потребность в проведении экспериментов в опытовых бассейнах, гидротолках, кавитационных и аэродинамических трубах. Применение численного подхода позволяет не только существенно уменьшить сроки разработки, но и повысить качество проекта, так как дополнительным преимуществом численного моделирования по сравнению с экспериментом является большой объем информации о локальных

характеристиках потока, недоступной экспериментатору. Это и распределение давления по поверхности корпуса, и линии тока на поверхности, и распределение скоростей и давлений в объеме воды, и многие другие характеристики. Возможности численного моделирования в современных программных комплексах весьма широки, что позволяет выполнять моделирование не только буксировочных испытаний, но также самоходных, мореходных и маневренных, т. е. охватить практически все актуальные задачи гидродинамики судна.

Одним из программных комплексов, применяемых для расчетов по гидродинамике судна, является FlowVision<sup>2</sup>, который активно используется проектными организациями в России, Украине и других странах. Например, FlowVision используется Зеленодольским ПКБ, ЦМКБ «Алмаз», Николаевским университетом кораблестроения. Один из наиболее опытных пользователей FlowVision в этой отрасли — компания Digital Marine Technology (DMT) — с 2004 г. использует программный комплекс для задач гидродинамической отработки обводов и исследования мореходных качеств судов.

В данной статье авторы описывают свой опыт применения программного комплекса FlowVision для проектирования обводов морского судна тылового обеспечения российского ВМФ проекта 23120 типа «Эльбрус» (рис. 1). Суда пр. 23120 (генеральный проектант ЗАО «Спецсудопроект», главный конструктор А. В. Савельев) предназначены для погрузки, хранения, транспортировки и передачи сухих грузов на берег, надводные корабли, подводные лодки и суда; буксирного обеспечения; оказания помощи экипажам кораблей и судов, терпящим бедствие.

Архитектурно-конструктивный тип судна пр. 23120 — морское стальное судно с винторулевыми колонками, рубкой в носу, обладающее свободной площадью палубы в кормовой части, двойным дном и двойными бортами, носовыми подруливающими устройствами и буксирной лебедкой. Суда

<sup>1</sup>Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (государственный контракт № 14.514.11.4058 от 1 марта 2013 г.).

<sup>2</sup>См. [www.flowvision.ru](http://www.flowvision.ru); [www.fv-tech.com](http://www.fv-tech.com).



Рис. 1. Проектные изображения судна типа «Эльбрус»

пр. 23120 довольно близки к получившим широкое распространение многофункциональным судам-снабженцам, обслуживающим платформы для добычи природных ископаемых на шельфе, и к аварийно-спасательным судам. Вместе с тем в технических требованиях к проекту присутствует ряд особенностей, существенно усложняющих задачу проектирования обводов в заданных главных размерениях. Это прежде всего высокие требования к ходовым качествам (скорость полного хода 18 уз является достаточно высокой для судов данного класса); высокие тяговые характеристики для обеспечения буксировок, а также требования к ледовым качествам на уровне категории ледовых усиления со знаком Arc4. При этом мощность главной энергетической установки ограничена техническими требованиями. Задача создания окончательных обводов, удовлетворяющих противоречивым проектным требованиям, была успешно решена во многом благодаря активному использованию специалистами DMT программного комплекса FlowVision для отработки обводов. При решении этой задачи было исследовано восемь различных вариантов формы корпуса.

#### Главные размерения судна пр. 23120

Длина наибольшая, м	94,88
Длина по грузовую ватерлинию, м	89,43
Ширина по корпусу, м	22,00
Высота борта на миделе до верхней палубы, м	11,20
Осадка по грузовую ватерлинию, м	8,55

**Программный комплекс FlowVision** позволяет решать широкий круг промышленных задач. Комплекс основан на методе конечных

объемов, являющемся промышленным стандартом в вычислительной гидродинамике. FlowVision имеет возможность расчета как сжимаемых, так и несжимаемых течений жидкости и газа, содержит пять моделей турбулентности, включая низкорейнольдсовы модели.

Основное отличие FlowVision от аналогов — автоматическая генерация расчетной сетки. Обычно в программных комплексах вычислительной гидродинамики или прочностного анализа в работе пользователя, связанной с подготовкой моделирования, до 90% времени занимает построение расчетной сетки. В FlowVision эта проблема снимается благодаря генерации расчетной сетки с использованием метода подсеточного разрешения геометрии. Суть этого метода [1] заключается в булевом вычитании из декартовой расчетной сетки объема, заданного замкнутой поверхностью, ограничивающей расчетную область. При этом ячейки расчетной сетки, через которые проходит криволинейная поверхность расчетной области, превращаются в сложные многогранники, внутри которых проводится аппроксимация решаемых уравнений схемой высокого порядка точности. Уточнение решения в областях с высокими градиентами характеристик течения и около границ достигается динамической адаптацией расчетной сетки (делением соответствующих ячеек расчетной области на более мелкие ячейки).

При моделировании турбулентного обтекания судна водой или воздухом используется подход URANS, основанный на решении нестационарных уравнений движения жидкости и двухпараметрической мо-

дели турбулентности типа  $k-\epsilon$  [2]. Для описания ламинарно-турбулентного перехода на корпусе судна используется модификация  $k-\epsilon$  модели, которой посвящена статья «Численное моделирование ламинарно-турбулентного перехода на корпусе судна в программном комплексе FlowVision» в этом же номере журнала «Судостроение». Для расчета свободной поверхности жидкости применяется модифицированный метод определения объема жидкости в ячейке (VOF), позволяющий рассчитывать течение воды около судна с высокой степенью точности.

Важным преимуществом FlowVision при решении задач гидродинамики судов является возможность одновременного расчета перемещения подвижных тел и свободной поверхности.

**Проектирование обводов и полученные результаты.** Уже на начальных этапах разработки пр. 23120 стало ясно, что возможность получения заданных показателей ходкости при ледовой носовой оконечности традиционного типа, которая хорошо отвечает требованиям к ледовым качествам, весьма проблематична. Поэтому специалистами финской компании ILS, осуществлявшей генеральное проектирование совместно с ЗАО «Спецсудопроект», были предложены оригинальные бульбовые обводы носовой части, рассчитанные на движение во льдах. К сожалению, несмотря на очевидные преимущества бульбовых обводов при рассматриваемых относительных скоростях (проектная скорость 18 уз соответствует  $Fr = 0,31$ ), предложенная форма бульба не оправдала ожиданий. Первые же результаты численного моделирования букси-

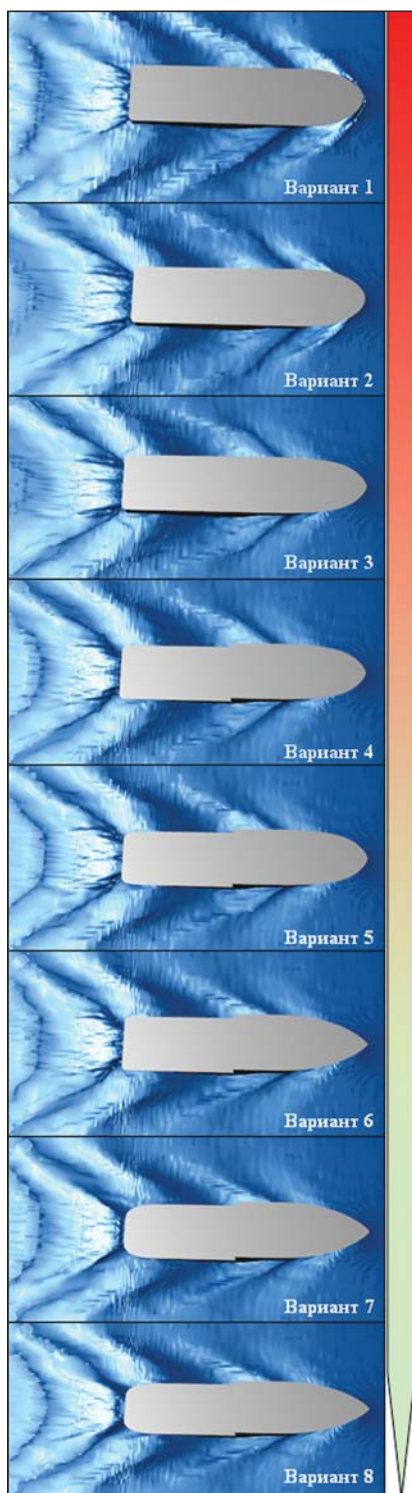


Рис. 2. Волнообразование исследованных вариантов при проектной скорости

ровки показали, что подобные обводы обладают очень высоким сопротивлением на проектной скорости, что практически исключает выполнение требований к ходовым качествам. Не смогли заметно улучшить ситуацию и некоторые поправки, предложенные специалистами ILS после анализа результатов расче-

тов. Оказалось, что бульбовые обводы, специально приспособленные для режима колки льда, в данных условиях недостаточно эффективны при движении полным ходом на чистой воде (варианты 1 и 2 — рис. 2).

Для исправления ситуации была предпринята разработка носовых обводов со скоростным бульбом, позволяющим получить наилучшие показатели ходкости. Для ускорения работ носовая часть со скоростным бульбом была вначале обчислена с уже существующей формой кормовой оконечности (вариант 3). Результаты численного моделирования по этому варианту показали значительное снижение буксировочного сопротивления. Однако для надежного обеспечения требуемых ходовых качеств требовались меры по дальнейшему улучшению обводов. Одна из этих мер — доработка формы кормовой оконечности.

Дальнейшие варианты (4–8) разрабатывались при тесном взаимодействии специалистов по генеральному проектированию («Спецсудопроект», ILS), гидродинамике (DMT, «Балттехнопром» — главный конструктор В. П. Соколов) и ледовым качествам (ЦНИИМФ), с тем чтобы на компромиссной основе добиться создания окончательной формы корпуса, в наибольшей степени удовлетворяющей всем проектным условиям. В результате были получены вполне удовлетворительные по гидродинамическим и ледовым качествам варианты 7 и 8 с крейсерскими обводами кормы. Эти варианты имеют транец в надводной части и бульбовые носовые обводы, приспособленные к движению во льдах. За счет специальной формы носового бульба удалось в конце концов совместить хорошие гидродинамические и ледовые качества, соответствующие техническим требованиям к проекту. Наиболее удачный в отношении ходкости вариант 7 продемонстрировал снижение буксировочного сопротивления относительно базового варианта 1 более чем в 1,5 раза (рис. 3), но, к сожалению, его использование влекло за собой определенные сложности с размещением оборудования пропульсивной установки. В итоге в проекте был принят близкий вариант 8 (рис. 4), несколько менее выгодный с точки зрения ходовых качеств, но все же

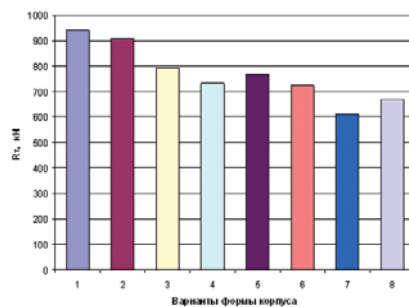


Рис. 3. Сопротивление судна с разными вариантами формы корпуса

позволяющий уверенно рассчитывать на выполнение контрактных требований.

На последующих этапах разработки проекта был выполнен большой объем численных (DMT) и экспериментальных (Технический исследовательский центр Финляндии — VTT, Aker Arctic — AARC) работ, в том числе: экспериментальные исследования ходкости, мореходности и ледовых качеств, численное исследование обтекания надводной части воздушным потоком (аналог продувки в аэродинамической трубе) для определения условий работы вертолета над палубой в кормовой части (рис. 5, 6). Исследования показали правильность принятых при проектировании обводов корпуса решений, обеспечивших судну надлежащие мореходные и эксплуатационные качества.

Сравнение результатов численного и экспериментального исследований ходкости показывает хорошее соответствие между основными показателями, что позволяет сделать вывод о практической равноценности использованных подходов в задаче прогнозирования ходовых качеств натурного судна. Кривая буксировочной мощности по данным численного моделирования проходит несколько выше (до 5%) экспериментальной кривой (рис. 7, 8). Расхождение до 5% в мощности соответствует примерно 1,7% в расчетной скорости хода.

Важно отметить роль, которую сыграло применение численных методов на этапе отработки обводов. Решение сложной проектной задачи в данном случае было получено во многом за счет исследования большого числа вариантов, что вряд ли удалось бы реализовать при чисто экспериментальном подходе. Модификации 3D-моделей в совре-



менной параметрической САПР (использовалась САПР T-Flex) и их параллельные расчеты на суперкомпьютере (использовался суперкомпьютер «Торнадо» Южно-Уральского государственного университета) обеспечивают возможности, которые при сжатых сроках разработки проекта выглядят особенно привлекательно по сравнению с изготовлением все но-



Рис. 4. 3D-модель окончательной судовой поверхности (вариант 8) с выступающими частями

ния, а экспериментальное исследование играет роль окончательной проверки.

**Заключение.** Опыт, полученный в ходе разработки пр. 23120 (генеральный проектант ЗАО «Спецсудопроект») свидетельствует о том, что использование современного и мощного программного комплекса вычислительной гидродинамики, каким является FlowVision, дает в руки проектных орга-

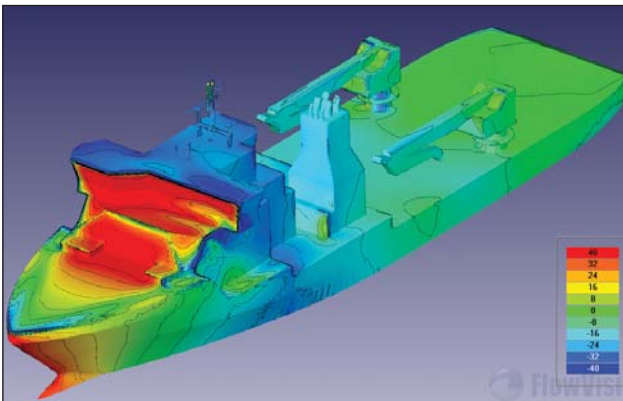


Рис. 5. Распределение давления воздушного потока по надводной части судна (шкала в Па)

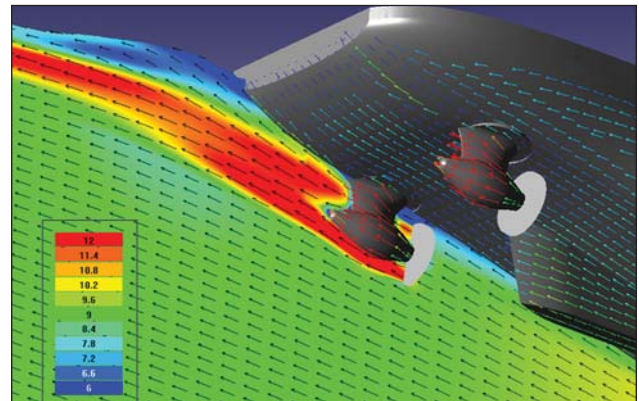


Рис. 6. Численное моделирование работы движителей (аналог самодонного испытания),  $K_{DE} = 1,723$  (шкала скоростей в м/с)

вых моделей для испытаний в опытовом бассейне, что влечет за собой увеличение сроков и стоимости проектных работ. Большое значение играет здесь и точность численного моделирования, обеспечению которой специалисты DMT уделяют всегда большое внимание, так как выполнить требования к судам в сложных проектных задачах часто удается лишь на пределе, без боль-

ших запасов. Прогноз уровня возможной погрешности, основанный на опыте и знании особенностей применяемых методов, в таких случаях очень важен, поскольку при недостаточной точности можно получить качественно неверный результат. Таким образом, оптимальным является подход, при котором проектные решения принимаются на основе численного моделирова-

ний судостроительной отрасли инструмент, позволяющий получить практически полный объем необходимой информации по гидродинамическому комплексу непосредственно в конструкторском бюро, не прибегая к лабораторному эксперименту. Гибкость в выполнении больших объемов исследований, которой можно достичь за счет использования суперкомпьютерных вычислений, совре-

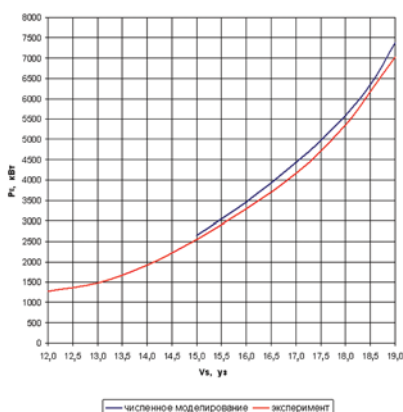


Рис. 7. Сопоставление значений буксировочной мощности, полученных численно и экспериментально



Рис. 8. Волнообразование при расчетной скорости во время модельных испытаний

менных возможностей трехмерного моделирования, а также преимуществ численного подхода в визуализации расчетной информации, очень полезная для скорейшего поиска оптимальных решений.

Возможности программного комплекса FlowVision были продемонстрированы в практической задаче поиска оптимальных обводов

корпуса для пр. 23120. Сравнение результатов численного и экспериментального исследований ходкости показало хорошее соответствие между основными показателями. Это позволяет сделать вывод о практической равноценности использованных численных подходов в решении задачи прогнозирования ходовых качеств натурального судна.

#### Литература

1. Aksenov A., Dyadkin A., Pokhilko V. Overcoming of Barrier between CAD and CFD by Modified Finite Volume Method//Proc. 1998 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, San Diego, ASME PVP-Vol 377-1, 1998.
2. Жлуктов С. В., Аксенов А. А., Харченко С. А., Москалев И. В., Сушко Г. Б., Шишова А. С. Моделирование отрывных течений в программном комплексе FlowVision-НРС//Вычислительные методы и программирование. 2010. Т. 11.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАМИНАРНО-ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕХОДА НА КОРПУСЕ СУДНА В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ FLOWVISION

А. А. Аксенов, С. В. Жлуктов (ООО «ТЕСИС»), С. А. Платов (НТК «Элегаз»)

УДК 532.517.4:532.525.2

В предыдущей статье «Программный комплекс FlowVision как современный инструмент проектирования судовых обводов» в этом же номере журнала «Судостроение» описывается применение программного комплекса FlowVision [1] для моделирования обтекания судна водой и воздухом. Точность моделирования силы сопротивления судна во многом зависит от качества моделирования турбулентности в пограничном слое около корпуса судна. При этом важную роль играет ламинарно-турбулентный переход в носовой части судна. Данный физический процесс заключается в потере устойчивости изначально ламинарного пограничного слоя. Модель турбулентности должна правильно предсказывать место перехода, чтобы адекватно определить силу сопротивления судна. В данной статье предлагается относительно простая модель турбулентности типа  $k-\varepsilon$ , позволяющая рассчитывать характеристики судна с учетом ламинарно-турбулентного перехода.

**Моделирование ламинарно-турбулентного перехода.** Физические основы моделирования турбулентных течений — это обоснованное полуэмпирическое моделирование «неизвестных» («незамкнутых») членов уравнений переноса вторых моментов скоростей жидкости  $u_i u_j$ . Несмотря на высокий уровень развития моделей турбулентности, позволяющий адекватно рассчитывать ряд сложных турбулентных течений [2],

камнем преткновения остается проблема моделирования ламинарно-турбулентного перехода (ЛТП) при низких уровнях турбулентности [2, 3]. Анализ опытных данных [4] и расчетов ЛТП моделями турбулентности [3] показал, что в зональной схеме течения «ламинарное-переходное-турбулентное» «ламинарная» зона является «квазиламинарной», поскольку здесь происходит диффузия турбулентности к стенке. При этом отклонение коэффициента трения  $C_{fx}$  от его «ламинарного» значения наблюдается только в конце этой зоны. Рассмотрим уравнение переноса энергии турбулентности  $k = (u_x^2 + u_y^2 + u_z^2)/2$  в несжимаемой жидкости:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial(U_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \nu \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + P_k - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ k u_i + \frac{p u_i}{\rho} \right]; P_k = u_i u_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \quad (1)$$

Турбулентную диффузию  $k u_i$  и диффузию пульсациями давления  $p u_i / \rho$  принято моделировать совместно градиентным механизмом [2]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[ k u_i + \frac{p u_i}{\rho} \right] = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \frac{\nu_i}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \quad (2)$$

При этом либо используют модель Ламли [6]  $p u_i / \rho = k u_i / 5$ , либо пренебрегают членом  $p u_i / \rho$ . Из анализа поведения членов уравнения (1) (развитое течение в канале, DNS [5]) следует, что моделировать члены  $k u_i$  и  $p u_i / \rho$  необходимо раздельно. Коловандин [6] получил дифференциальные уравнения переноса третьих моментов  $p u_i$ . Упрощенное выражение работы [6] для величины  $\partial[p u_i / \rho] / \partial x_i$  имеет вид

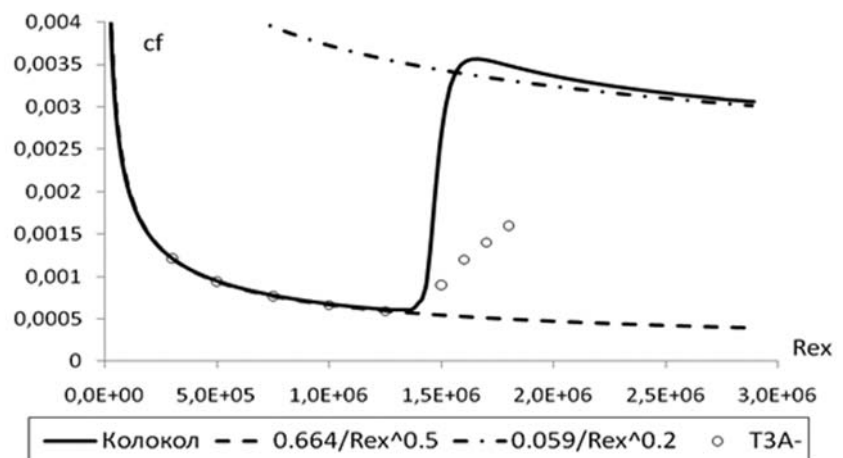


Рис. 1. Распределение коэффициента трения по длине пластины ( $x/L$ ): — — — — расчет по модели КОЛОКОЛ; - - - - соотношение для ламинарного пограничного слоя; - · - · - соотношение для турбулентного пограничного слоя; о — тест ТЗА-1 [7]

<sup>1</sup>Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (государственный контракт № 14.514.11.4058 от 1 марта 2013 г.).

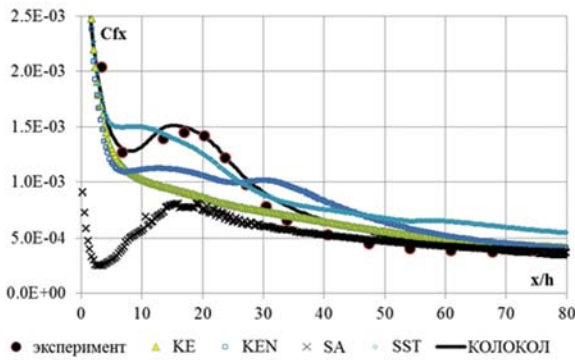


Рис. 2. Коэффициент трения на верхней (плоской) стенке диффузора, расчет по четырем высокорейнольдсовым моделям турбулентности и по низкорейнольдсовой модели КОЛОКОЛ

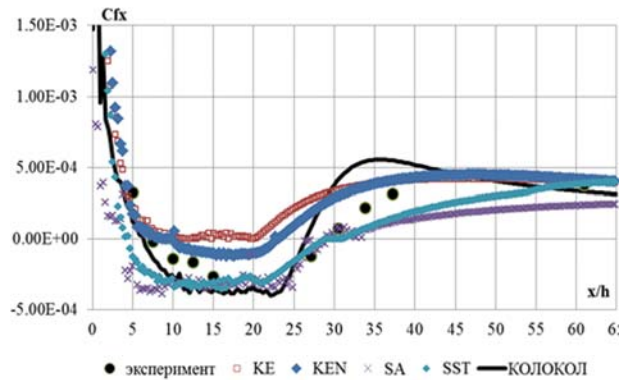


Рис. 3. Коэффициент трения на нижней стенке диффузора, расчет по четырем высокорейнольдсовым моделям турбулентности и по низкорейнольдсовой модели КОЛОКОЛ

$$D_{pp} \equiv -\frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \frac{\rho u_i}{\rho} \right] = C_{pp} \cdot \left\{ \frac{\partial(k\sqrt{U_x^2 + U_z^2})}{\partial y} + \frac{\partial(k\sqrt{U_x^2 + U_y^2})}{\partial z} + \frac{\partial(k\sqrt{U_y^2 + U_z^2})}{\partial x} \right\}. \quad (3)$$

Очевидно, что в однородном потоке  $D_{pp} = 0$ . Путем сравнения членов уравнения (1) с данными DNS [5] была подобрана модельная константа  $C_{pp} = -0,003$ . Модель турбулентности КОЛОКОЛ с членом (3), учитывающим диффузию пульсациями давления, и с демпфирующими функциями, в которых используется колмогоровский масштаб расстояния до стенки  $y_{Kolm}^+ = (v \cdot \epsilon)^{1/4} y / \nu$ , была реализована в CFD-комплексе FlowVision [1]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i k)}{\partial x_i} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \rho P_k - \rho \epsilon + \rho D_{pp}; \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i \epsilon)}{\partial x_i} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} (1 + C_{\epsilon 3} P_k / \epsilon) - \rho P_k - C_{\epsilon 2} f_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k}; \quad (5)$$

$$\mu_t = C_\mu f_\mu \rho k^2 / \epsilon; \quad (6)$$

$$f_\mu = \left\{ 1 - \exp \left( -\frac{y_{Kolm}^+}{16} \right) \right\}^2 \times \left[ 1 + \frac{5}{Re_t^{3/4}} \exp \left\{ -\left( \frac{Re_t}{100} \right)^2 \right\} \right]; \quad (7)$$

$$f_2 = \left\{ 1 - \exp \left( -\frac{y_{Kolm}^+}{3,1} \right) \right\}^2 \times \left[ 1 - 0,3 \exp \left\{ -\left( \frac{Re_t}{6,5} \right)^2 \right\} \right]; \quad (8)$$

$$Re_t = k^2 / (\epsilon \cdot \nu).$$

Константы:  $C_\mu = 0,09$ ;  $\sigma_k = 1$ ;  $\sigma_\epsilon = 1,3$ ;  $C_{\epsilon 1} = 1,44$ ;  $C_{\epsilon 2} = 1,92$ ;  $C_{\epsilon 3} = C_\mu / 2$ ;  $C_{pp} = -0,003$ .

**Тестирование.** В данной работе рассматриваются два эксперимента: ТЗА<sup>(1)</sup> [7] (течение около пластины, помещенной в канал) и Case 8.2 [8] (течение в асимметричном диффузоре).

**Тест ТЗА<sup>(1)</sup>.** Условия:  $U_\infty = 19,8$  м/с, интенсивность турбулентности  $I_t = \sqrt{2/3} k_\infty / U_\infty = 0,00874$ , масштаб  $L_t = 0,01$  м. На рис. 1 показано изменение коэффициента трения вдоль плоской пластины. Видно, что модель КОЛОКОЛ адекватно предсказывает ламинарно-турбулентный переход. Ее достоинство —

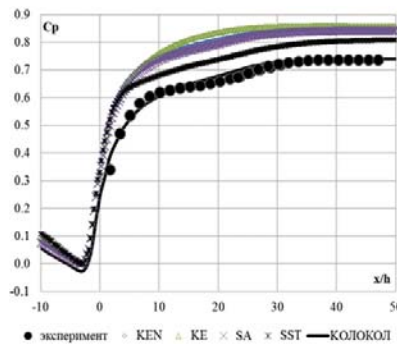


Рис. 4. Коэффициент восстановления давления, расчет по четырем высокорейнольдсовым моделям турбулентности и по низкорейнольдсовой модели КОЛОКОЛ

сквозной расчет всего пограничного слоя без привлечения дополнительных эмпирических моделей для иницирования перехода.

Расчеты на трех сетках, характеризующихся значениями  $y^+ = 2$ ; 1 и 0,5, дали близкие результаты ( $y^+ = u_\tau y / \nu$ ;  $u_\tau$  — динамическая скорость,  $y$  — расстояние до стенки).

**Тест Case 8.2.** Условия: высота входного канала  $h = 0,015$  м, высота выходного канала  $H = 4,7h$ , верхняя стенка плоская, нижняя — «диффузорная»,  $Re = U_\infty h / \nu = 20\,000$ . Этот тест имеет следующие важные особенности: а) турбулентный поток, входящий в диффузорную часть канала, полностью развит; б) течение — двухмерное; в) в диффузоре происходят отрыв, присоединение и восстановление потока (перестройка пограничного слоя за точкой присоединения). Расчеты в FlowVision проводились в двумерной постановке. На расстоянии  $30h$  перед входом в диффузорную часть задавался профиль средней скорости для развитого турбулентного течения в плоском канале, обеспечивающий среднюю скорость в канале  $U_\infty = 18$  м/с. Значения интенсивности турбулентности ( $I_t = 0,03$ ) и масштаба ( $L_t = 0,05h$ ) задавались постоянными по сечению канала. Расчеты проводились на нескольких сетках: а) по нескольким «высокорейнольдсовым» моделям с пристеночными функциями (SA, SST, «стандартная» и квадратичная  $k-\epsilon$  модели — см. [6]); б) по модели КОЛОКОЛ с условием прилипания на стенках для скорости. На рис. 2, 3 приведены результаты расчета коэффициента трения на верхней и нижней стенках асимметричного диффузорного канала.



Расчеты коэффициента восстановления давления  $C_p = \Delta p / (\rho U^2 / 2)$  приведены на рис. 4.

**Заключение.** Численное решение тестовых задач ТЗА<sup>(-)</sup> и Case 8.2 на разных сетках с использованием низкорейнольдсовой модели КО-ЛОКОЛ показало, что модель удовлетворительно предсказывает положение ламинарно-турбулентного перехода и поэтому позволяет с хорошей точностью рассчитывать характеристики судна.

#### Литература

1. FlowVision, версия 3.08.04. Руководство пользователя. М.: ООО «ТЕСИС», 2013.
2. Launder B. E., Sandham N. D. Closure Strategies for Turbulent and Transitional Flows, Cambridge Univ. Press, GB, 2002.
3. Golovnev I., Platov S. The critical analysis of models of turbulence of laminar-turbulent transition and a role of diffusion by pressure fluctuations // 10 Int. Conf. Control, Measurements, Visualisation. 2009. August 17–21.
4. Дыбан Е. П., Элик Э. Тепломассообмен и гидродинамика турбулизированных потоков. Киев: Наук. думка, 1985.
5. Hoyas S. & Jimenez J. Reynolds number effects on the Reynolds-stress budgets in turbulent channels // Phys. Fluids. 2008. Vol. 20.
6. Коловандин Б.А. Моделирование теплопереноса при неоднородной турбулентности. Минск: Наука и техника, 1980.
7. Coupland J. ERCOFTAC Special Interest Group on Laminar to Turbulent transition and Retransition: TZA Test cases, 1990.
8. Obi S., Aoki K., Masuda S. Experimental and Computational Study of Turbulent Separating Flow in an Asymmetric Plane Diffuser // Proc. 9th Symposium on Turbulent Shear Flows. 1993.

## ИНФОРМАЦИОННО-НОРМАТИВНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОЛНОГО ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА КОРАБЛЯ. ОПЫТ БЮРО ЕСГ

И. А. Казанцева, руководитель направления NormaCS, А. А. Рындин, заместитель директора (ООО «Бюро ЕСГ», www.esg.spb.ru), Б. Л. Резник, начальник отдела ИЛП, канд. техн. наук (ОАО «Адмиралтейские верфи»)

удк

Интерес к теме поддержки жизненного цикла (ЖЦ) корабля, технологиям PLM (CALS, ИПИ) не только не угасает, но и выходит на качественно другой уровень — уровень государственной политики в сфере разработки и производства продукции, в том числе военного назначения. Так, в выступлении 5 июня на PLM-форуме, проводившемся в рамках Международного военно-морского салона-2013, члена Военно-промышленной комиссии при Правительстве Российской Федерации В. Я. Поспелова была подчеркнута возрастающая роль компаний-производителей в поддержке ЖЦ. Указано, что вопрос поднимался на высшем государственном уровне при проведении 21 мая 2013 г. Президентом России В. В. Путиным совещания о состоянии и перспективах развития ОАО «Объединенная судостроительная корпорация». По мнению министра обороны С. К. Шойгу «все государственные контракты на 2014 г. должны оформляться, как контракты на полный жизненный цикл».

Поддержка многообразия процессов на всех этапах ЖЦ для такого наукоемкого изделия, как корабль невозможна с использованием некоего единого программного средства.

Например, автоматизация проектирования на соответствующей стадии и информационная поддержка борьбы за живучесть или логистическая поддержка на стадии ЖЦ эксплуатации — разнородные задачи единого процесса. В связи с этим, компания InterCAD рассматривает процесс информационной поддержки ЖЦ, как интегрированный комплекс программных, технических средств, мероприятий и технологий. Важным аспектом обеспечения всех этапов ЖЦ является информационно-нормативное обеспечение.

В настоящее время на современном рынке существует ряд продуктов — электронных баз нормативно-справочной документации. В судостроении широко применяется программное обеспечение (ПО) NormaCS. Продукт неоднократно и подробно описан. Темой статьи не является еще одно его описание. Подчеркнем лишь то, что NormaCS давно и успешно используется в машиностроении, приборостроении, промышленном и гражданском строительстве и многих других отраслях, остановимся на практических аспектах применения этого ПО в судостроении.

Несомненно, для специалистов отрасли наибольший интерес пред-

ставляет специализированная информация и документы, разработчиком и хранителем которой является НИИ «ЛОТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Создание электронной нормативной базы, действительно представляющей интерес и востребованной в судостроении, без участия базовой организации невозможно.

В связи с этим, был осуществлен совместный проект ОАО «Бюро ЕСГ» и НИИ «ЛОТ» ФГУП «Крыловский ГНЦ», в результате которого была создана специальная конфигурация NormaCS—ЛОТ, содержащая следующие разделы:

- «Общие вопросы стандартизации и унификации в судостроении»;
- «Корпус и корпусные конструкции»;
- «Оборудование помещений»;
- «Судовое машиностроение»;
- «Судовое приборостроение»;
- «Судовая электротехника»;
- «Технология и изделия общего применения»;
- «Судостроительные материалы и их испытания»;
- «Изделия общей техники».

Отметим, что вся информация постоянно актуализируется и пополняется.

Наиболее успешными примерами использования продукта NormaCS—ЛОТ являются результаты внедрения в ОАО «Адмиралтейские верфи» и ОАО «Северное ПКБ».

Остановимся на кратком описании работ по внедрению на ОАО «Адмиралтейские верфи». Прежде всего, в процессе внедрения, была решена задача конвертации в формат NormaCS—ЛОТ базы данных ранее используемого на предприятии ПО Технорма/ИнтраДок. Для