

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. 23'20. 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-НПС // Вычислительные методы и программирование. 2010. Т. 10. № 1.

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-ε, 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:

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

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

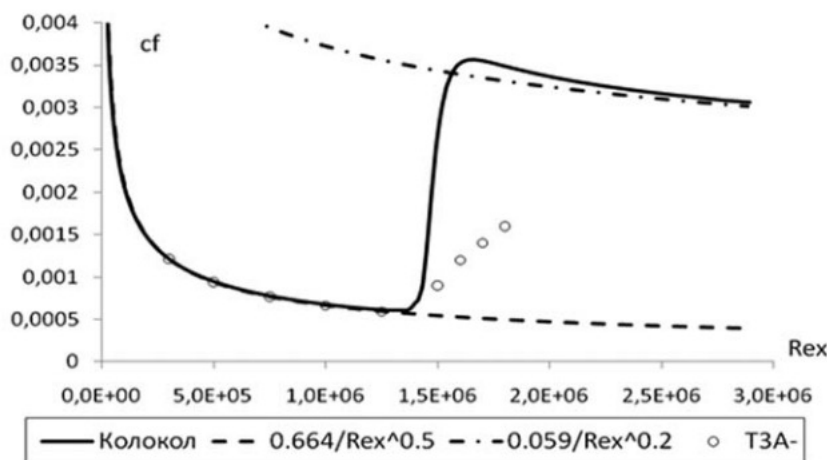


Рис. 1. Распределение коэффициента трения по длине пластины (x/L): — — — — расчет по модели КОЛОКОЛ; - - - - соотношение для ламинарного пограничного слоя; - · - · - соотношение для турбулентного пограничного слоя; o — тест ТЗА [7]

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

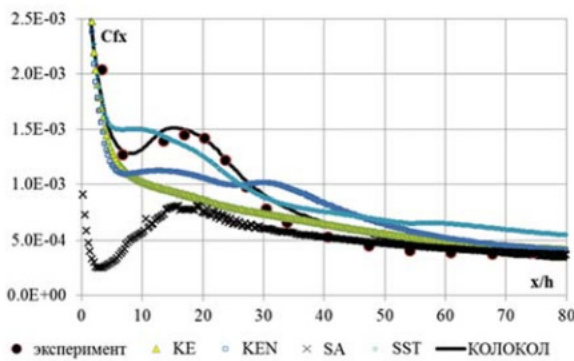


Рис. 2. Коэффициент трения на верхней (плоской) стенке диффузора, расчет по четырем высокорейнольдсовым моделям турбулентности и по низкорейнольдсовой модели КОЛОКОЛ

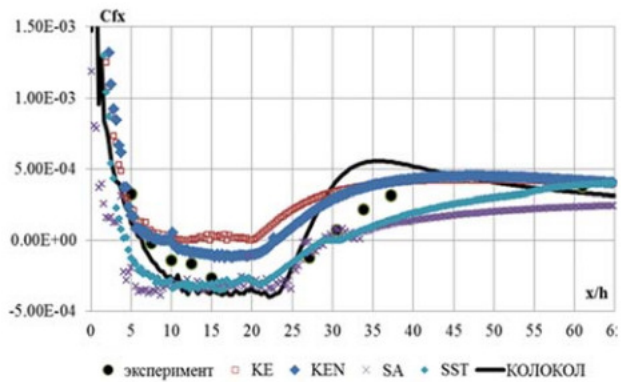


Рис. 3. Коэффициент трения на нижней стенке диффузора, расчет по четырем высокорейнольдсовым моделям турбулентности и по низкорейнольдсовой модели КОЛОКОЛ

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

Очевидно, что в однородном потоке $D_{pp} = 0$. Путем сравнения членов уравнения (3) 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 [6]:

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

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i \epsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + C_{\epsilon_1} \frac{\epsilon}{k} (1 + C_{\epsilon_3} P_k / \epsilon) - \rho P_k - C_{\epsilon_2} f_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k}; \quad (5)$$

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

$$f_{\mu} = \left\{ -\exp \left(-\frac{y_{Kolm}^+}{6} \right) \right\}^2 \times \left[+ \frac{5}{Re_1^{3/4}} \exp \left\{ -\left(\frac{Re_1}{100} \right)^2 \right\} \right]; \quad (7)$$

$$f_2 = \left\{ -\exp \left(-\frac{y_{Kolm}^+}{3} \right) \right\}^2 \times \left[-0,3 \exp \left\{ -\left(\frac{Re_1}{6,5} \right)^2 \right\} \right]; \quad (8)$$

$$Re_1 = k^2 / (\epsilon \cdot \nu).$$

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

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

Тест ТЗА⁽¹⁾. Условия: $U_{\infty} = 9,8$ м/с, интенсивность турбулентности $I_t = \sqrt{2/3} k_{\infty} / U_{\infty} = 0,00874$, масштаб $L_t = 0,0$ м. На рис. 1 показано изменение коэффициента трения вдоль плоской пластины. Видно, что модель КОЛОКОЛ адекватно предсказывает ламинарно-турбулентный переход. Ее достоинство —

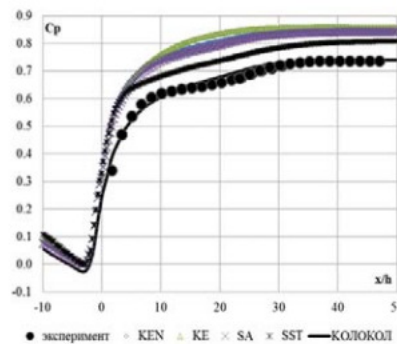


Рис. 4. Коэффициент восстановления давления, расчет по четырем высокорейнольдсовым моделям турбулентности и по низкорейнольдсовой модели КОЛОКОЛ

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_{τ} — динамическая скорость, y — расстояние до стенки).

Тест Case 8.2. Условия: высота входного канала $h = 0,0$ 5 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 $30 h$ перед входом в диффузорную часть задавался профиль средней скорости для развитого турбулентного течения в плоском канале, обеспечивающий среднюю скорость в канале $U_{\infty} = 8$ 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 - ϵ 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⁽¹⁾ 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 // 0 Int. Conf. Control, Measurements, Visualisation. 2009. August 17–21.
4. Дыбан Е. П., Элик Э. Теплообмен и гидродинамика турбулизованных 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 2 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. Подчеркнув 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 ГИЦ», 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