

МОДЕЛИРОВАНИЕ 3D-ТЕЧЕНИЯ CFD-КОДОМ OpenFOAM

А.А. Казанцев, В.Р. Анисонян

ЭНИМЦ «Моделирующие системы», г. Обнинск



Расчеты 3D-моделирования с использованием методов вычислительной гидродинамики выполнены для течения в цилиндре с закрытой вершиной. С использованием двух популярных моделей турбулентности проведено тестирование возможностей пакета программ OpenFOAM на основе сравнения с экспериментальными данными течения.

Ключевые слова: тестирование кода, теплофизическое моделирование, вычислительная гидродинамика, k - ε -модель турбулентности, k - ω -SST-модель турбулентности, RANS – осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса, OpenFOAM – пакет с открытым исходным кодом, решатель chtMultiRegionFoam.

Key words: test of code, thermal physic simulation, CFD (Computational Fluid Dynamic), k - ε -turbulence model, k - ω -SST-turbulence model, RANS, OpenFOAM open source package.

ОПИСАНИЕ ЗАДАЧИ

В настоящее время вычислительная гидродинамика (CFD) интенсивно развивается, и существует ряд сложившихся удачных реализаций. Интенсивно развиваются американские и европейские (NURESIM [1] Франция) исследовательские программы. Одной из актуальных задач для них является проблема доведения CFD-кодов до состояния, пригодного для использования в расчетах по обоснованию безопасности реакторных установок. Ожидается, что в течение ближайших лет CFD-коды дополнят возможности используемых сейчас кодов улучшенной оценки в расчетах по обоснованию безопасности реакторов.

В отличие от кодов улучшенной оценки, в которых опытные данные обобщаются в виде безразмерных коэффициентов теплоотдачи (чисел Нуссельта) и коэффициентов трения, экспериментальные данные в CFD-кодах обобщаются в виде моделей турбулентности с использованием механизма интерполирования опытных данных на базе дифференциальных уравнений.

Основной подход к численному описанию турбулентного переноса [3,4] основан на решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (Reynolds-Averaged Navier-Stokes, RANS). Для уравнения осредненного турбулентного движения точность описания течений зависит от использования той или иной модели турбулентности.

Целью работы является оценка точности общего решения системы уравнений в зависимости от выбора модели турбулентности. Необходимо знать, насколько точно уравнения описывают природные явления, для чего решение задачи необ-

ходимо сравнить с опытными профилями. Необходимо проверить, правильно ли реализованы в программе эти уравнения, для чего сравниваются отклонения от опытных данных при решении разными авторами по своим программам.

Для реализации поставленной задачи был выбран эксперимент [5] с течением воздуха в осесимметричном тупике. Рассматриваемая расчетная область (рис. 1) представляет собой осесимметричный тупик в виде изолированного сверху цилиндра. В центральной части цилиндра внутри входной трубы специальным устройством создается поток с плоским профилем скорости. В верхней части образуется точка торможения и разворота потока. Выход осуществляется через кольцевой канал, в нижней части которого имеется выход в помещение с атмосферным давлением.

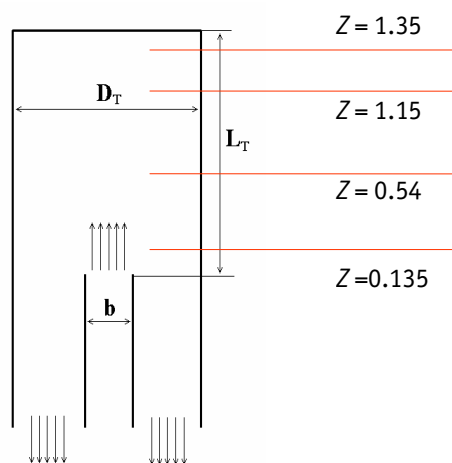


Рис. 1. Геометрия экспериментального устройства

В этом эксперименте реализовано сразу три типа физически различных течений: струйное течение с плоским профилем на входе, натекание на преграду с образованием точки торможения в верхней части цилиндра и внутреннее течение в выходном кольцевом канале. Поэтому следует ожидать разной точности описания в зависимости от типа течения. Для разных типов течений коды вычислительной гидродинамики дают различные погрешности, связанные с подбором коэффициентов и настройкой моделей турбулентности. Можно рассматривать три разных класса турбулентных течений с разной внутренней физикой – свободные сдвиговые течения (аэродинамические следы, затопленные струи...), ограниченные сдвиговые течения (пограничный слой, развитое течение в канале...) и натекание струи на преграду. Имеется противоречие. Для каждого из трех классов должны быть использованы различные коэффициенты моделей турбулентности для их точного описания. Но для универсальности моделей коэффициенты желательно подбирать так, чтобы уметь моделировать задачи всех трех классов. Исходя из потребностей практики точность описания первых двух классов в «стандартных» моделях турбулентности выше. Поэтому натекание струи на преграду (в точке торможения потока координата $Z=1.4$) со стандартными значениями коэффициентов моделируется удовлетворительно.

3D-моделирование воздушного потока выполнялось при помощи открытого пакета OpenFOAM [2]. Для оценки влияния выбора модели турбулентности на профили вертикальной компоненты скорости были выбраны две модели турбулентности: $k-\epsilon$ -модель, которая длительное время являлась фактическим промышлен-

ным стандартом, и претендующая на роль современного стандарта k - ε -SST-модель турбулентности.

Средняя скорость воздуха в эксперименте на входе (через трубу b) $U = 10,0$ м/с. Отношения характерных безразмерных габаритных размеров задачи $Z_{\max} = L_T/D_T = 1.4$; $b/D_T = 0.27$.

Рассматривались установившееся турбулентное течение и теплообмен. Поскольку теплоносителем является воздух, то среда полагается вязкой и сжимаемой. Используемая система уравнений сохранения массы, импульса и энергии имеет следующий вид.

Уравнение сохранения массы

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0. \quad (1)$$

Уравнение сохранения импульса векторное решается в виде трех скалярных уравнений для проекций скорости:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \cdot u_i) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu^T) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] + \rho \cdot g_i. \quad (2)$$

Уравнение сохранения энергии

$$\frac{\partial(\rho \cdot C_p T)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \cdot C_p T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\lambda + \lambda^T) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right]. \quad (3)$$

Связь с двухпараметрической k - ε -моделью турбулентности дает формула Колмогорова

$$\nu^T = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (4)$$

Для k - ω -SST-модели вместо формулы (4) используется соотношение $\nu^T = \frac{k}{\omega}$, полученное на ее основе.

С учетом связи между динамической и кинематической вязкостью $\mu = \rho \nu$ и $\mu^T = \rho \nu^T$ записывается безразмерный профиль турбулентной вязкости:

$$\frac{\mu^T}{\mu} = \frac{\nu^T}{\nu} = C_\mu \frac{k^2}{\nu \varepsilon}. \quad (5)$$

Для описания профиля турбулентной теплопроводности используются безразмерные профили турбулентной вязкости (5); при этом расчет коэффициентов теплопроводности ведется по соотношениям

$$(\lambda + \lambda^T) = \lambda \left[1 + \left(\frac{\mu^T}{\mu} \right) \left(\frac{Pr}{Pr^T} \right) \right]. \quad (6)$$

Уравнение состояния включает в себя зависимость между основными параметрами состояния: давлением p , плотностью ρ и температурой T . Условно представим уравнение состояния в виде

$$\rho = \rho(P, T). \quad (7)$$

Для усредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса необходимо выбрать модель турбулентности и задать начальные и граничные условия. Начальное давление было задано во всей области равным атмосферному давлению 10^5 Па на всех границах, кроме входа, где в качестве граничного условия использовалась нулевая производная давления. Скорость на входе в эксперименте задавалась равной

10 м/с, а на выходе использовалось условие равенства производных скорости и температуры нулю (условия стабилизации течения). Начальная температура задавалась постоянной и равной температуре входа; стенки принимались адиабатными.

МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Моделирование турбулентности является ключевым вопросом при использовании методов вычислительной гидродинамики (CFD). Все практически значимые инженерные приложения основаны на использовании моделей турбулентности. CFD-коды предлагают пользователю широкий выбор моделей турбулентности, из которых необходимо сделать выбор. В открытом пакете OpenFOAM реализовано более десятка таких моделей. Модели турбулентности ограничены имеющимся экспериментальным материалом и являются обобщением, основанным на разных математических способах оптимизации коэффициентов уравнений турбулентности. Краткий обзор моделей турбулентности имеется, например, в работах [3,4].

В области механики жидкости и газа имеется ряд классических монографий и работ, в которых изложены современные представления о турбулентности и методах решения классических и прикладных задач, об этом писали (в историческом порядке) Колмогоров А.Н. [8], Лойцянский Л.Г. [10], Кочин Н.Е., Кибель И.А. [7], Монин А.С., Яглом А.М. [9], Седов Л.И. [11], Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. [12], Лапин Ю.В. [6], Повх И.Л. [13], Шлихтинг Г. [14], Белоцерковский О.М. [15], Ляхер В.М. [16], Рейнольдс А.Дж. [17], Фрост У. [18] и т.д.

Наиболее широко используются модели второго порядка, в которой турбулентная вязкость определяется из двух дифференциальных уравнений. В расчетах использовались две модели турбулентности, ставшие индустриальным стандартом и широко применяемые в практике вычислений: k - ϵ -, k - ω -SST.

Транспортные уравнения для стандартной k - ϵ -модели

Уравнение для кинетической энергии турбулентности k

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu^T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + G_k - \rho \cdot \epsilon. \quad (8)$$

Уравнение для скорости диссипации ϵ

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu^T}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \rho \cdot \frac{\epsilon}{k} (P_k + G_k - C_{3\epsilon} G_k) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}. \quad (9)$$

Формула Колмогорова (4) дает связь с турбулентной вязкостью.

P_k – компонент производства (Production), генерации турбулентности, кратко записываемый для 3D-моделей в тензорной записи:

$$P_k = -\overline{\rho u_i u_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}, \text{ где } -\overline{u_i u_j} = \nu^T \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij}. \quad (10)$$

Второе уравнение определяет составляющие тензора напряжений в турбулентном потоке (здесь δ_{ij} – символ Кронекера).

Эффект плавучести описывается компонентой

$$G_k = \beta g_i \frac{\mu^T}{\rho \Gamma} \frac{\partial T}{\partial x_i}, \quad (11)$$

где g_i – проекция вектора ускорения свободного падения; β – коэффициент теплового расширения, равный

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p. \quad (12)$$

Константы модели $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $C_\mu = 1.44$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$, $C_{3\varepsilon} = 1$. В ядре потока задается $Pr_T = 0.85$, а в пристенном слое $Pr_T = 1$.

Для дифференциальных уравнений модели турбулентности необходимо задавать физические граничные условия. Для стандартной k - ε -модели турбулентности энергия диссипации зависит от характерного размера масштаба турбулентности l , который оценивался как гидравлический диаметр. Оценка входной величины k [м²/с²] выполнялась для изотропной турбулентности при равенстве пульсационных компонент динамической скорости:

$$k = \frac{3}{2} v_*^2 \quad (13)$$

Оценка для ε [м²/с³] при известном k следует из модели при равенстве генерации и диссипации турбулентности:

$$\varepsilon = \frac{C_\mu^{3/4} k^{3/2}}{0.2l}. \quad (14)$$

Точность численного решения при использовании CFD-подхода зависит правильности построения сетки, корректности задания граничных условий, но наиболее существенно от выбранной модели турбулентности и ее возможностей.

k - ε -модель основана на использовании двух транспортных дифференциальных уравнений для расчета кинетической энергии турбулентности k и скорости ее диссипации ε . Эта модель стабильна, не требует значительных вычислительных ресурсов и долгое время была промышленным стандартом. Она хорошо зарекомендовала себя при расчете внутренних течений, но возникают проблемы при расчете течений с большими градиентами давлений или наличии отрыва потока. Начало отрыва определяется слишком поздно и размеры отрывных течений слишком малы по размеру.

k - ω -модель дает более точные результаты, чем k - ε -модель для отрывных течений вблизи стенки. Это достигается тем, что при расчетах диссипации ε используется турбулентная частота ω [1/с]:

$$\omega = \frac{\varepsilon}{C_\mu k}. \quad (15)$$

Это дает для тонкого пограничного слоя более точный результат при расчете отрывных течений. При расчете внутренних течений k - ω -модель уступает в точности k - ε -модели.

По этой причине была разработана **k - ω -SST-модель**. Она объединяет в себе лучшие стороны k - ω -модели вблизи стенки и хорошие свойства k - ε -модели в остальном потоке. Тем самым модель дает хорошие результаты как при расчете отрыва потока, так и при больших градиентах давления. К тому же эта модель оказалась надежной и нетребовательной к вычислительным ресурсам. В ней при итерационном уточнении решения ошибки округления в решении накапливаются меньше

при использовании линейной формулы $v^T = \frac{k}{\omega}$, чем для квадратичной формулы

$v^T = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ Колмогорова.

k - ω -SST-модель – новый промышленный стандарт, дающий очень хорошие ре-

зультаты даже при расчетах таких явлений, как отрыв потока при вдувании в соплах потока воздуха в погранслои или при расчете процессов турбулентной теплопередачи.

Транспортные уравнения для k - ω -SST-модели в тензорной записи

Турбулентная вязкость моделируется формулой

$$\nu^T = \frac{\alpha_1 k}{\max(\alpha_1 \omega, S F_2)} . \quad (16)$$

Уравнение для турбулентной кинетической энергии k

$$\frac{\partial k}{\partial \tau} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \sigma_k \nu^T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \beta^* k \omega . \quad (17)$$

Уравнение для удельной скорости диссипации ω

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} + U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \sigma_\omega \nu^T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha S^2 - \beta \omega^2 + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} . \quad (18)$$

Дополнительные соотношения модели:

$$F_2 = \tanh \left[\left[\max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right] ; \quad P_k = \min \left(\tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j}, 10\beta^* k \omega \right) ;$$

$$F_1 = \tanh \left\{ \left[\min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \right]^4 \right\} ;$$

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10} \right) ;$$

$$\varphi = \varphi_1 F_1 + \varphi_2 (1 - F_1) .$$

Коэффициенты системы уравнений:

$$\alpha_1 = \frac{5}{9}, \quad \alpha_2 = 0.44, \quad \beta_1 = \frac{3}{10}, \quad \beta_2 = 0.0828, \quad \beta^* = \frac{9}{10}, \quad \sigma_{k1} = 0.85, \quad \sigma_{k2} = 1, \quad \sigma_{\omega 1} = 0.5, \\ \sigma_{\omega 2} = 0.856 .$$

Для дифференциальных уравнений модели турбулентности физические граничные условия на входе рассчитывались по формулам (13)–(15).

Сетка генерировалась утилитой blockMesh со сгущением шага в сторону области торможения потока, и содержит свыше двух с половиной миллионов ячеек. На рисунке 2 показана использованная расчетная сетка в разных ракурсах.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для тестирования кодов имеется ряд теплогидравлических задач, для которых накоплен большой по объему и разнообразный по содержанию экспериментальный и теоретический материал. Из-за разной физики турбулентности различают задачи внешнего обтекания тел и внутреннего течения в каналах. Так как течение в реакторе относится к задачам внутреннего течения, будем выбирать тесты для такого класса течений. Для доказательства достоверности решений при использовании выбранного пакета OpenFOAM [2] приводится решение задачи внутреннего течения в осесимметричном тупике.

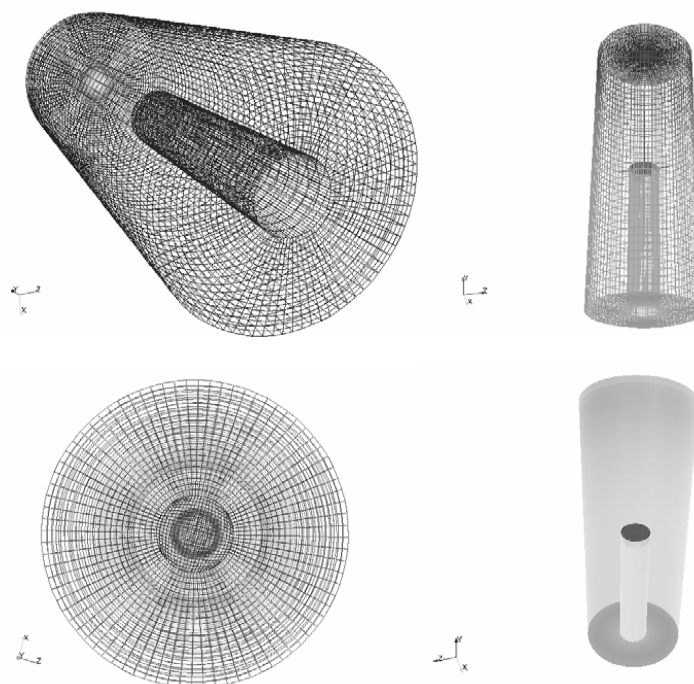


Рис. 2. Структурированные части расчетной сетки, полученные с использованием постпроцессора. Расчетная геометрия экспериментального устройства

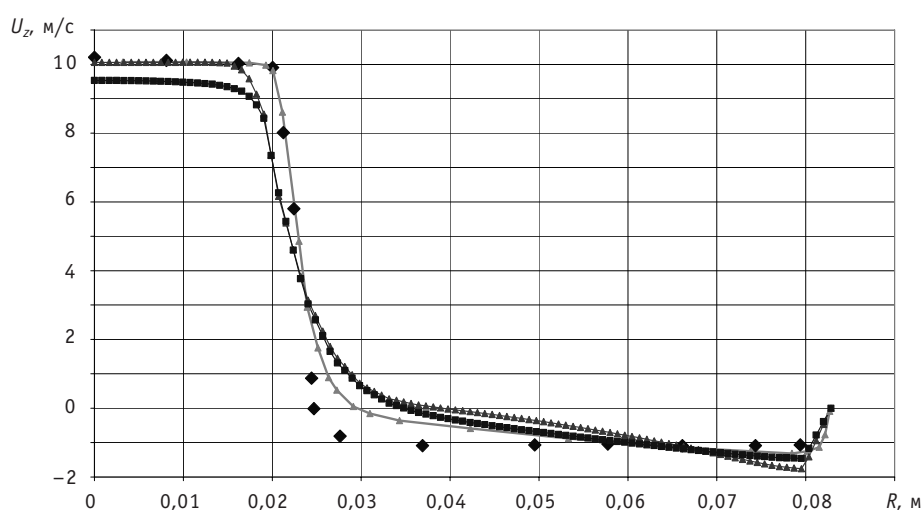


Рис. 3. Сравнение экспериментального (◆) распределения вертикальной размерной осевой скорости на отметке $Z = 0,135$ с расчетами Артемьева (△) и авторскими расчетами по k - ϵ - (■) и k - ω -SST-моделям (▲) турбулентности

На рисунках 3–6 представлены решения при расчете полей после 10 секунд физического расчета стационарного поля, полученного путем решения нестационарной задачи методом установления после 10^6 расчетных шагов. Расчет выполнялся параллельно на четырех ядрах.

Экспериментальные данные по профилям вертикальной компоненты скорости, полученные для четырех высотных отметок (показанных на рис. 1), сравниваются на рисунках 3–6 с опытными данными, расчетами Артемьева В.К. [21] и двумя вариантами расчетов авторов для двух моделей турбулентности. Были выбра-

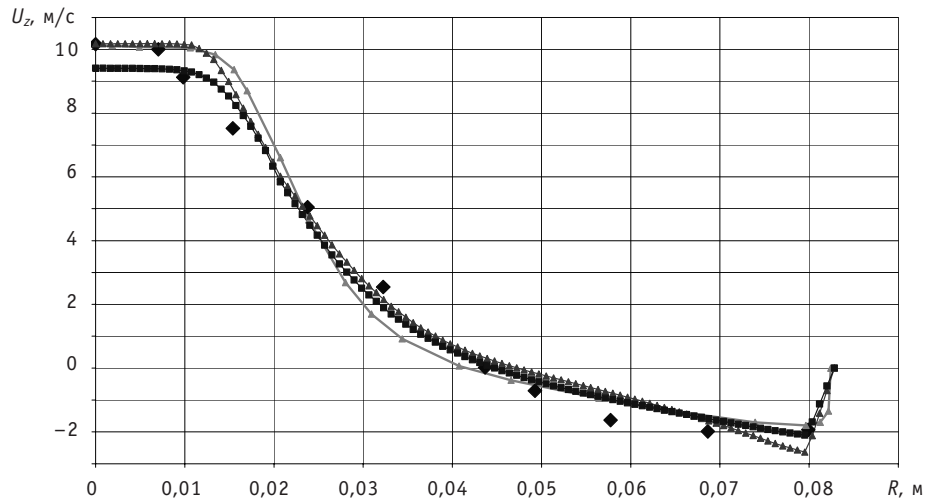


Рис. 4. Сравнение экспериментального (◆) распределения вертикальной размерной осевой скорости на отметке $Z = 0,54$ с расчетами Артемьева (△) и авторскими расчетами по k - ϵ - (■) и k - ω -SST-моделям (▲) турбулентности

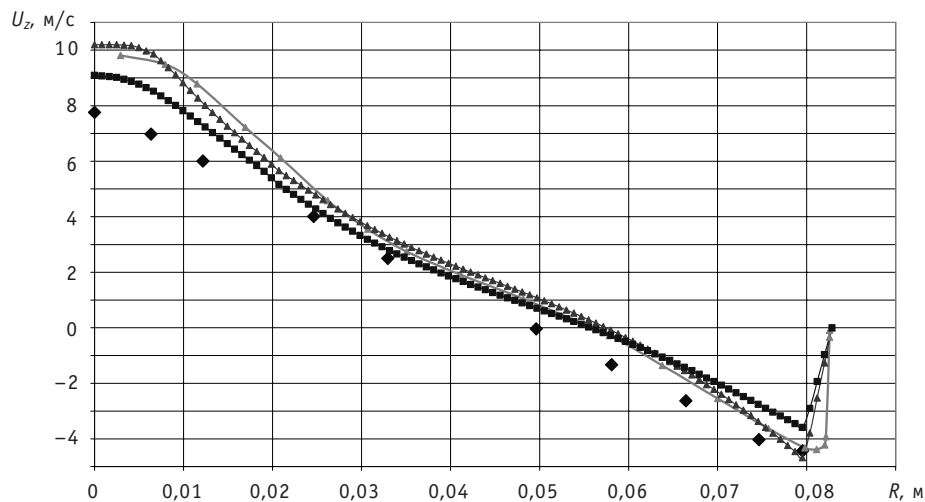


Рис. 5. Сравнение экспериментального (◆) распределения вертикальной размерной осевой скорости на отметке $Z = 1,15$ с расчетами Артемьева (△) и авторскими расчетами по k - ϵ - (■) и k - ω -SST-моделям (▲) турбулентности

ны реализованные в OpenFOAM [2] стандартная k - ϵ -модель турбулентности (аналогично работе [21]) и k - ω -SST-модель.

Результаты тестирования показывают, что две модели турбулентности, реализованные в пакете OpenFOAM, неплохо описывают эксперимент. Отклонения в расчетах соответствуют современным описательным возможностям метода. Результаты, полученные разными кодами с использованием одинаковой модели турбулентности, дают близкие результаты и похожие отклонения от эксперимента. Это означает, что математическая модель реализована правильно, так как получены близкие результаты при сравнении с расчетами по другой программе, в которой реализована аналогичная модель. В точке торможения описание экспериментов удовлетворительное. Для этой области можно рекомендовать выбор специальной версии k - ω -SST-модели турбулентности, позволяющей значительно повысить точность описания такого класса течений.

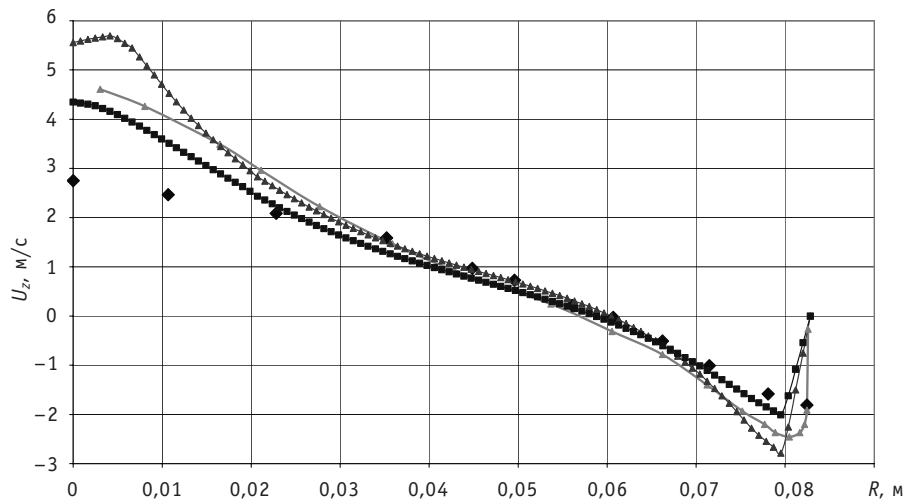


Рис. 6. Сравнение экспериментального (◆) распределения вертикальной размерной осевой скорости на отметке $Z = 1,35$ с расчетами Артемьева (△) и авторскими расчетами по k - ϵ - (■) и k - ω -SST-моделям (▲) турбулентности

ВЫВОДЫ

Для расчетов использовался решатель chtMultiRegionFoam, который после введенных модификаций получил имя vagChtMultiRegionFoam. Практическая значимость работы заключается в подтверждении возможности модификации и использования пакета OpenFOAM [2] для расчета задач вычислительной гидродинамики и сопряженного теплообмена.

Выполненный обзор моделей турбулентности позволил авторам остановиться на двух, являющихся фактическими промышленными стандартами, моделях турбулентности: стандартной k - ϵ -модели и k - ω -SST-модели, позволяющих замкнуть для усредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS подход) систему уравнений сохранения.

Из представленного выше сравнения видно, что экспериментальные данные описываются удовлетворительно. Заметного преимущества в точности описания эксперимента ни одна из моделей не имеет. Отклонения в решении опытных данных и расчетов по разным моделям (включая независимый код) и разным программам аналогичны, что подтверждает корректность реализации моделей в выбранном пакете программ.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ν – кинематическая вязкость [$\text{м}^2/\text{с}$]; ρ – плотность [$\text{кг}/\text{м}^3$]; C_p – удельная изобарная теплоемкость [$\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$]; λ – коэффициент теплопроводности [$\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$];

$a = \frac{\lambda}{\rho C_p}$ – удельная температуропроводность [$\text{м}^2/\text{с}$]; $\text{Pr} = \frac{\nu}{a}$ – число Прандтля; μ – динамическая вязкость [$\text{Па}\cdot\text{с}$]; μ^T – турбулентная динамическая вязкость [$\text{Па}\cdot\text{с}$];

ν^T – турбулентная кинематическая вязкость [$\text{м}^2/\text{с}$]; $a^T = \frac{\lambda^T}{\rho C_p}$ – турбулентная температуропроводность [$\text{м}^2/\text{с}$]; $\text{Pr}^T = \frac{\nu^T}{a^T}$ – турбулентное число Прандтля; λ^T – турбулентная теплопроводность [$\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$]; k – кинетическая энергия турбулентности

ти $[m^2/c^2]$; u_i – компоненты вектора скорости **U** в декартовой системе координат $[m/c]$; ε – скорость диссипации кинетической энергии турбулентности $[m^2/c^3]$; P – давление $[Pa]$; g_i – проекция на ось i координат ускорения свободного падения $[m/c^2]$; CFD – вычислительная гидродинамика (Computational Fluid Dynamic); RANS – осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса (Reynolds-Averaged Navier-Stokes); OpenFOAM – Open source File Operation And Manipulation – пакет с открытым исходным кодом; SST – Schear-Stress-Transport.

Литература

1. Dominique Bestion and Antoine Guelfi/Status and perspective of two-phase flow modeling in the NEPTUNE Multiscale thermal-hydraulic platform for nuclear reactor simulation//Nuclear Engineering and Technology. – 2005. – V. 37. – № 6. – P. 511- 524.
2. OpenFOAM – www.opencfd.co.uk (дата обращения: 24.06.2010)
3. Белов И.А. Моделирование турбулентных течений: Учебное пособие/И.А. Белов, С.А. Исаев. – СПб.: Изд. Балт. гос. техн. ун-та (БГТУ) ВОЕНМЕХ, 2001. – 108 с.
4. Белов И.А. Модели турбулентности: Учебное пособие/И.А. Белов. – СПб.: ЛМИ, 1986. – 100 с.
5. Гнатюк В.В., Гнатюк Г.Я., Ярин Л.П. Исследование структуры течения в осесимметричном тупике//Изв. АН СССР. МЖГ. – 1997. – №2. – С. 16-23.
6. Лапин Ю.В. Алгебраические модели турбулентности для пристенных канонических течений (немного истории и некоторые новые результаты)/Ю.В. Лапин, А.В. Гарбарук, М.Х. Стрелец// Научно технические ведомости. – СПб: Изд-во Политехнического ун-та, 2004. – № 2 (36). – С. 81-95.
7. Кочин Н.Е. Теоретическая гидромеханика. Т. 1/Н.Е. Кочин, И.А. Кибель, Н.В. Розе. – М.: Физматгиз, 1963.
8. Колмогоров А.Н. Локальная структура турбулентности в несжимаемой жидкости при очень больших числах Рейнольдса/А.Н. Колмогоров/ Докл. АН СССР. – 1941. – Т. 30. – № 4. – С. 299.
9. Мони А.С. Статистическая гидромеханика. Т. 1/А.С. Монин, А.М. Яглом. – М.: Наука, 1965.
10. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. Изд. 6-е/Л.Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1970. – 904 с.
11. Седов Л.И. Механика сплошной среды. Т. 1-2/Л.И. Седов. – М.: Наука, 1970.
12. Ландау Л.Д. Теоретическая физика: Учебное пособие в 10 тт./Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1986.
13. Повх И.Л. Техническая гидромеханика. 2-е изд., доп. – Л.: Машиностроение (Ленингр. отделение), 1976. – 504 с.
14. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974. – 711 с.
15. Белоцерковский О.М. Прямое численное моделирование переходных течений газа и задач турбулентности/В кн.: Механика турбулентных потоков. – М.: Наука, 1980.
16. Лятхер В.М., Прудовский А.М. Гидравлическое моделирование. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 392 с.
17. Рейнольдс А.Дж. Турбулентные течения в инженерных приложениях/А.Дж. Рейнольдс. – М.: Энергия, 1979. – 408 с.
18. Турбулентность. Принципы и применения/Под ред. У. Фроста, Т. Моулдена. – М.: Мир, 1980. – 536 с.
19. Волков К.Н. Внутренние турбулентные течения газовзвеси в энергетических установках : дис. ... д-ра физ.-мат. наук : 01.02.05 Санкт-Петербург, 2006 298 с. РГБ ОД, 71:07-1/221.
20. www.os-cfd.ru (дата обращения: 24.06.2010).
21. Артемьев В.К. Развитие численных методов решения задач динамики вязкой жидкости: дис. ... канд. физ.-мат. наук 05.13.18 Обнинск 1997.

Поступила в редакцию 25.06.2010

УДК 621.039.51

Calculations of 3D-Flow by CFD-Code OpenFOAM\A.A. Kazantsev, V.R. Anisanyan; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 10 pages, 6 illustrations. – References, 21 titles.

Calculations 3D modelling with use of methods of computation fluid dynamic are presented for flow in cylinder with closed top. With use of two popular models of turbulence the testing of code OpenFOAM is carried out on the basis of comparison with experimental data.

УДК 621.039.53

Calculation by CFD-Method the Hydraulic Resistance for Rectangular Channel at Different Gap between Obstacles\A.A. Kazantsev, A.S. Kondratiev, Yu.D. Levchenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 6 pages, 4 illustrations. – References, 4 titles.

The problem of parallel operation the best estimation codes (TRAC, RELAP5) and codes of computational fluid dynamics (CFD codes) is actual in field of thermal physics of reactors. In the present paper there was used the software package OpenFOAM [1] as CFD code. For group of the “best estimation codes” as the basic calculation method at present, it is necessary to set the factors of hydraulic resistance obtained from experiment. Modern CFD codes are able to receive these factors of hydraulic resistance as result of “numerical experiments”. The given property is very important for reactor circuits in which on length of some tens hydraulic diameters local hydraulic resistance are located, with nonlinear interaction on each other. It results in a significant error of design calculations of pressure difference on the primary circuit.

The comparison between the experimental data and results of 3D calculations was performed in order to check the applicability of CFD method. Serial calculations were carried out for the rectangular channel for variants with different gaps between obstacles from minimal up to an interval exceeding length of hydrodynamic stabilization. Results of calculations are slightly differs from experimental data with acceptable accuracy for practice.

УДК 621.039.534:536.24

Experimental Research of Heat Removing during Steam Condensation at Vertical Multi-Row Slightly Inclined In-line Tube Bank\G.I. Tarasov, A.N. Sinicin, V.A. Babin, M.A. Bolshukhin, S.G. Antipin, A.V. Belin, A.G. Vasyatkin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 10 pages, 3 illustrations. – References, 5 titles.

Here are presented results of experimental research and generalization of the experimental data on heat transfer rate under complete condensation of the descending flow of the prime water steam on the outer surface of vertical multi-row slightly inclined in-line tube bank under pressure of the condensing steam equal to 0,2-2,0 MPa.

УДК 621.039.534:536.24

Experimental Research of Heat Removing during Steam Condensation at Vertical Multi-Row Slightly Inclined In-line Tube Bank\G.I. Tarasov, A.N. Sinicin, V.A. Babin, M.A. Bolshukhin, S.G. Antipin, A.V. Belin, A.G. Vasyatkin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 7 pages, 3 illustrations. – References, 2 titles.

Here are presented results of experimental research steam condensation conditions from steam-gas mix on the outer surface of vertical multi-row slightly inclined in-line tube bank in the absence and in the presence of relief non-condensable gas from tube space.

УДК 621.039.534

An Experimental Research of Properties of the Boundary Surface «Heavy Liquid Metal Coolant – Constructional Material» with «Express Freezing» Method\A.V. Beznosov, T.A. Bokova, K.A. Makhov, A.I. Shumilkov, Yu.N. Drozdov, V.N. Puchkov, V.V. Makarov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 11 pages, 10 illustrations. – References, 1 title.

Results of experimental research of boundary surface of constructional materials in the medium of high-temperature (550°C) heavy liquid metal coolants (HLMC) of perspective nuclear power installations of LFR type. It is shown that asperity of stainless surface changes considerably as a result of active insoluble impurity moving towards the «steel – coolant» interface that takes place during long-term HLMC circulation. It is shown that long-term passivation of steels in air medium at high temperatures (550°C) does not seriously influence on asperity alteration of its surfaces.