

РАСЧЕТ ТЕПЛОПЕРЕНОСА И ФЛУКТУАЦИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПОВЕРХНОСТИ ТРУБОПРОВОДА ВБЛИЗИ Т-ОБРАЗНОГО СОЕДИНЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИХРЕРАЗРЕШАЮЩИХ ПОДХОДОВ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Гарбарук А.В. (СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия),
Грицкевич М.С. (СПбГМТУ, Санкт-Петербург, Россия)

Введение

Турбулентное перемешивание жидкостей разной температуры в Т-образных соединениях труб может привести к интенсивным низкочастотным колебаниям температуры на прилегающих к соединению стенках и, как следствие, к циклическим термическим напряжениям, термической усталости и последующему разрушению трубопровода. Эти явления характерны для контуров ядерных реакторов, в связи с чем изучение данного класса течений имеет большое значение для безопасности АЭС. В том случае, когда диаметр патрубка меньше диаметра магистральной трубы (такая конфигурация является типичной), картина течения определяется несколькими важными факторами. Во-первых, из-за различия диаметров труб, поток имеет особенности, характерные для струи в поперечном потоке, которые аналогичны срыву вихрей при поперечном обтекании цилиндра. Хотя из-за незначительного различия диаметров этот эффект выражен не так сильно, как в струе, он все же играет заметную роль. Во-вторых, в слое смешения, формирующемся на границе потока, втекающего из патрубка в магистральную трубу, возникает неустойчивость Кельвина-Гельмгольца, приводящая к интенсификации теплопереноса. Наконец, третьим существенным фактором является образование подковообразного вихря перед вытекающей из патрубка струей. Общая картина течения определяется взаимодействием этих явлений друг с другом и с турбулентностью в набегающем потоке, структура которой может быть весьма сложной из-за наличия изгибов магистральной трубы вверх по потоку от патрубка [1–3]. Это делает точное предсказание полей скорости и температуры в окрестности Т-образного соединения весьма сложной задачей вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics - CFD). Так, подходы к ее решению, основанные на осредненных по Рейнольдсу уравнениях Навье-Стокса (Reynolds Averaged Navier-Stokes equations - RANS), которые обычно используются в промышленных приложениях, не обеспечивают приемлемой точности. Более того, высокие значения турбулентной вязкости, предсказываемые RANS моделями турбулентности в области перемешивания потоков из-за высоких локальных скоростей сдвига, зачастую приводят к подавлению нестационарных возмущений и к получению стационарного решения. Это противоречит экспериментальным наблюдениям, согласно которым на стенках магистральной трубы вниз по потоку от Т-образного соединения имеют место сильные пульсации температуры. Данный эффект можно описать только с помощью вихреразрешающих подходов (Scale-Resolving Simulation - SRS) [2–8]. Наиболее перспективными SRS подходами являются гибридные RANS-LES методы, такие как Detached Eddy Simulation (DES) [9], Delayed DES (DDES) [10], Improved DDES (IDDES) [11, 12] и Scale-Adaptive Simulation (SAS) [13]. Хотя эти подходы и являются более трудоемкими, чем RANS, они требуют несопоставимо меньших вычислительных затрат, чем метод моделирования крупных вихрей (Large Eddy Simulation - LES) и вполне могут применяться на практике уже в настоящее время. Однако, для определения границ применимости и точности подобных подходов требуются дополнительные исследования.

Целью настоящей работы является определение наиболее надежного гибридного RANS-LES подхода для рассматриваемого класса течений и исследование

чувствительности гидродинамики и теплообмена в Т-образных соединениях к неоднородности потока в магистральной трубе.

Работа построена следующим образом. В Разделе 1 сравнивается точность различных гибридных RANS-LES подходов для течения с прямой магистральной трубой, соответствующего эксперименту, проведенному в компании Vattenfall в 2009 г. [14] и использовавшегося в качестве теста OECD [15 - 17]. На основании проведенных расчетов в качестве наиболее надежного был выбран зонный RANS-IDDES подход в сочетании с генератором синтетической турбулентности (Synthetic Turbulence Generator - STG) [18]. Затем (Раздел 2) проведена оценка его точности при наличии изгиба магистральной трубы вверх по потоку от Т-образного соединения (течение в такой конфигурации изучалось в экспериментальной работе [1]). Наконец, в разделе 3 представлены результаты параметрического исследования влияния на теплообмен изгиба магистральной трубы вверх по потоку от Т-образного соединения.

Все расчеты были выполнены с использованием кода общего назначения ANSYS FLUENT [19].

1. Валидация различных гибридных RANS-LES подходов на тестовом течении Vattenfall

1.1. Постановка задачи и метод решения

Схема установки, использованной в [14], представлена на Рис. 1. Она состоит из горизонтальной пластиковой магистральной трубы и вертикального стального патрубка с внутренним диаметром $1.4D_0$ и D_0 , соответственно. Длина основной трубы до соединения составляет более $110D_0$, а вертикального патрубка - около $20D_0$. Постоянная среднерасходная скорость воды в магистральной трубе и патрубке во всех экспериментах была равна $0.76 \cdot U_0$ и U_0 , соответственно. Температура воды в патрубке составляла $T_0 = 309 \text{ K}$, а в магистральной трубе - $T_0 - \Delta T$ ($\Delta T = 17 \text{ K}$). Эти параметры соответствуют числу Рейнольдса $Re = \rho \cdot U_0 \cdot D_0 / \mu = 8 \cdot 10^4$ (ρ – плотность, μ – динамическая вязкость, рассчитанная по температуре воды в патрубке согласно [15]) и числу Прандтля $Pr = \mu \cdot C_p / \lambda = 5$ (C_p — удельная теплоемкость, λ — теплопроводность воды).

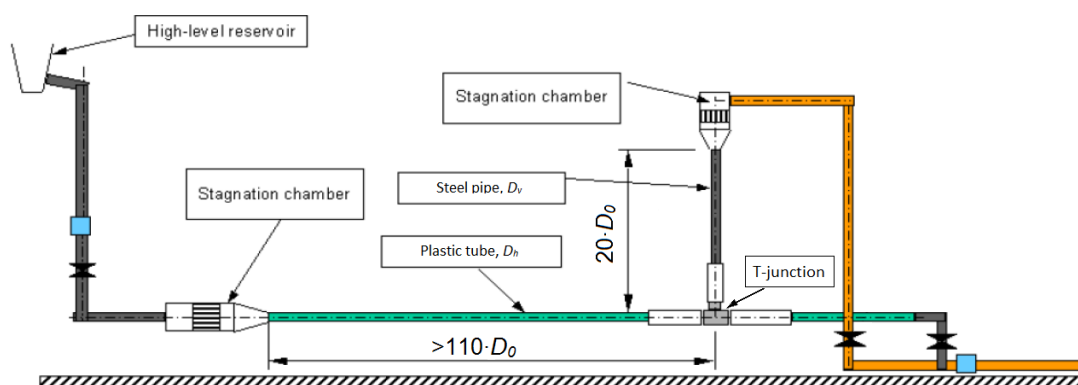


Рис. 1. Вид сбоку испытательного стенда Т-образного соединения Vattenfall [14]

Измерения средней скорости и ее среднеквадратичного отклонения были выполнены в нескольких сечениях x/D_0 (1.6, 2.6, 3.6 и 4.6) вдоль синих линий, показанных на Рис. 2 (начало координат находится в точке пересечения осей магистральной трубы и патрубка). Средняя температура, а также ее среднеквадратичное отклонение измерялись вдоль 4 линий, обозначенных на Рис. 2 «Top», «Front», «Bottom» и «Rear».

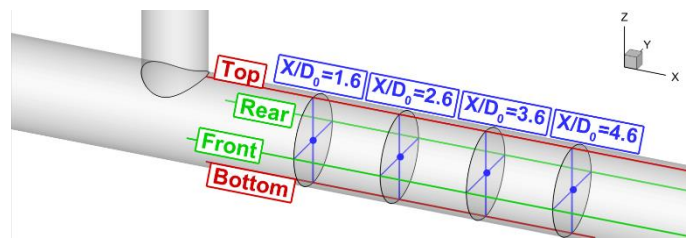


Рис. 2. Линии, вдоль которых производится сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными

Схема расчетной области представлена на Рис. 3. Входные сечения (Inlet) расположены при $z/D_0 = 3.1$ для патрубка и при $x/D_0 = -4.2$ для магистральной трубы, а выходное сечение (Outlet) - при $x/D_0 = 28.0$.



Рис. 3. Схема расчетной области и граничные условия для течения в Т-образном соединении труб

Граничные условия задаются следующим образом (см. Рис. 3).

На стенках обеих труб задаются условия прилипания и непроницаемости для скорости и адиабатические условия для температуры.

На входных границах задаются профили скорости, температуры и турбулентных характеристик, полученные на основе предварительных RANS-расчетов течения в трубе с использованием модели SST [20]. При этом течение в магистральной трубе считается полностью развитым, а толщина пограничного слоя во входном сечении патрубка соответствует экспериментальному значению $\delta_0 = 0.22 \cdot D_0$.

Наконец, на выходной границе задается постоянное давление, а все остальные величины экстраполируются изнутри расчетной области.

Расчеты проводились с использованием трех глобальных гибридных RANS-LES подходов, а именно SAS [14], SST DDES [10] и SST IDDES [12]. Наряду с этим были проведены расчеты зонным RANS-IDDES методом. В последнем случае для активации режима Wall-Modeled LES (WMLLES) и обеспечения быстрого перехода от полностью моделируемой турбулентности в RANS подобласти к преимущественно разрешенной турбулентности в IDDES подобласти в районе RANS-IDDES интерфейса использовался генератор синтетической турбулентности STG [18]. Интерфейсы RANS-IDDES в магистральной трубе и патрубке были расположены при $x/D_0 = -1.4$ и $z/D_0 = -0.7$, соответственно (см. Рис. 4). Что касается интерфейса IDDES-RANS, расположенного при $x/D_0 = 9.8$, то на нем никаких специальных действий не требуется, поскольку IDDES автоматически переходит в режим RANS при увеличении шага сетки, а возникающая при этом погрешность практически не влияет на течение в окрестности Т-образного соединения.

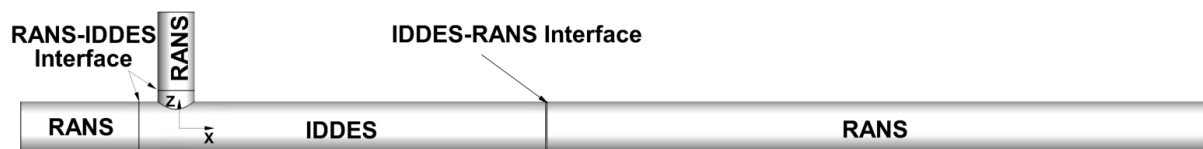


Рис. 4. Разделение расчетной области на подобласти для зонного RANS-IDDES расчета

Расчетная сетка (см. Рис. 5) содержит примерно $4.9 \cdot 10^6$ шестигранных ячеек и удовлетворяет требованиям к сеткам для IDDES [11]. В частности, максимальные шаги сетки в осевом и азимутальном направлениях составляют $\Delta a/D_0 = 0.036$ и $\Delta c/D_0 = 0.018$, а первый пристеночный шаг по нормали к стенкам удовлетворяет условию $\Delta y_w^+ < 1$ в большей части расчетной области.

Шаг интегрирования по времени во всех расчетах равен $\Delta t = 0.016 \cdot D_0/U_0$ и соответствует максимальному числу Куранта около 4. Время установления статистически зрелого решения составляло $100D_0/U_0$, после чего для определения статистических характеристик потока проводилось осреднение нестационарных полей скорости, давления и температуры в течение временного интервала $640D_0/U_0$ (40 000 временных шагов).

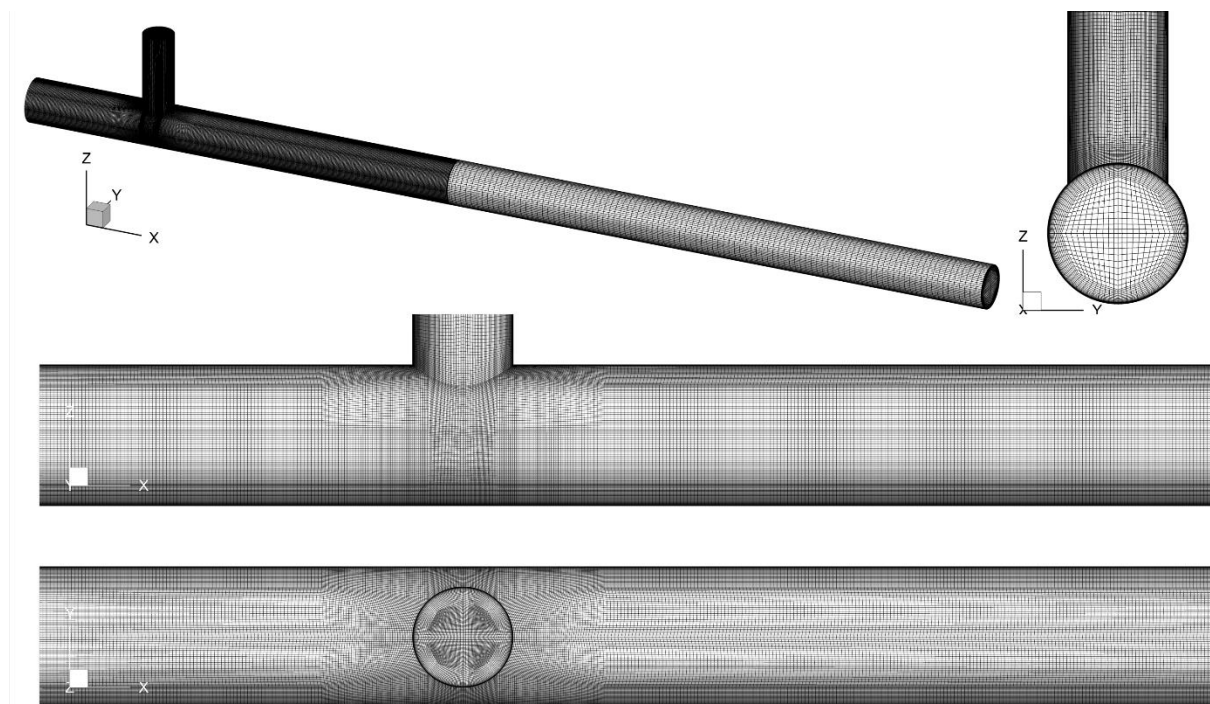


Рис. 5. Используемая расчетная сетка в различных проекциях

Как уже было сказано, расчеты проводились с помощью кода ANSYS-FLUENT CFD [19]. В нем используется метод конечных объемов на неструктурированных сетках с хранением данных в центрах ячеек. В настоящей работе для решения исходных нестационарных уравнений движения и теплопереноса для несжимаемой жидкости применялся метод SIMPLEC. При этом для аппроксимации производных по времени использовалась трехслойная схема второго порядка. Для подавления нефизических осцилляций давления при аппроксимации невязких потоков применялась поправка Rhie-Chow. Градиенты переменных рассчитывались в центрах ячеек с использованием теоремы Гаусса. Интерполяция скорости на грань ячейки осуществлялась с использованием центрально-разностной схемы второго порядка, а интерполяция давления – с помощью схемы «Standard» (взвешенная интерполяция на основе центральных коэффициентов). Наконец, для аппроксимации конвективных слагаемых в уравнении энергии и в уравнениях переноса турбулентных характеристик использовалась противоточная схема второго порядка.

Полученные дискретные уравнения решались итерационно с использованием неявного метода Гаусса-Зейделя в сочетании с алгебраическим многосеточным подходом (использовалось 10 итераций на шаг по времени). Подробное описание методов, применяющихся в ANSYS FLUENT, можно найти в [19].

1.2. Результаты расчетов

На Рис. 6 представлены визуализации течения (изоповерхности Q -критерия $Q = 200 \text{ с}^{-2}$, окрашенные величиной x -компоненты скорости) из расчетов, выполненных с использованием глобальных подходов (DDES, SAS и IDDES) и зонного RANS-IDDES метода. Все глобальные подходы предсказывают сходные вихревые структуры, появляющиеся в начале зоны смешения двух потоков. Эти структуры развиваются вниз по течению, распадаются более мелкие хаотичные вихри и постепенно занимают все сечение трубы. Аналогичная картина наблюдается и при использовании зонного RANS-IDDES подхода, однако в этом случае описанные вихревые структуры затухают и превращаются в мелкомасштабную турбулентность намного быстрее за счет взаимодействия с разрешенной турбулентностью, возникающей в обеих трубах непосредственно за соответствующими RANS-IDDES интерфейсами.

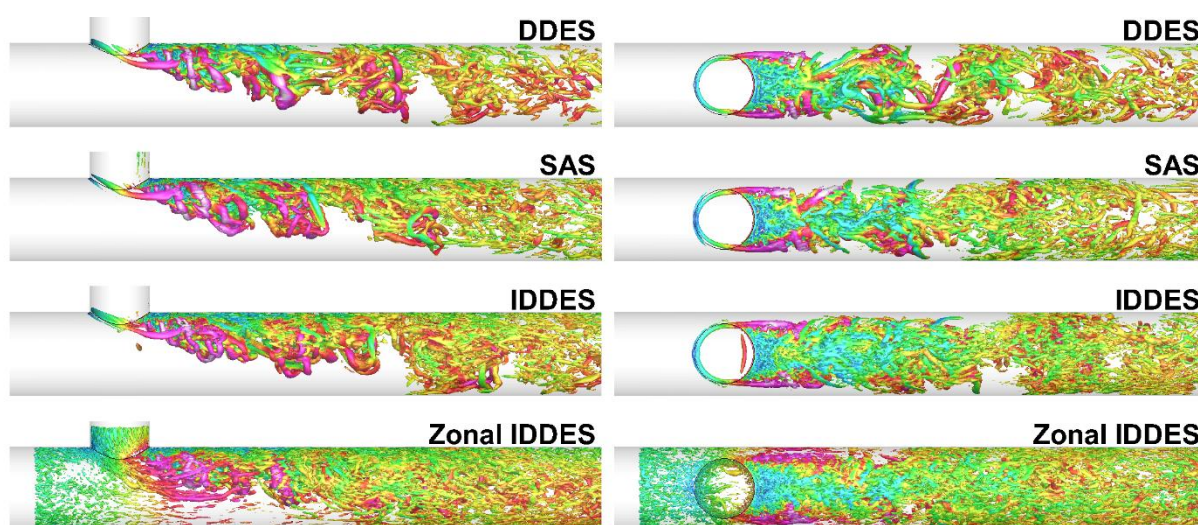


Рис. 6. Изоповерхности Q -критерия ($Q = 200 \text{ с}^{-2}$), окрашенные величиной x -компоненты вектора скорости: слева – вид сбоку; справа – вид сверху

На Рис. 7 приведено сравнение расчетных и экспериментальных спектров пульсаций скорости в двух точках, расположенных на оси магистральной трубы. Видно, что в соответствии с визуализацией течения эти спектры имеют протяженный инерционный интервал, удовлетворяющий закону Колмогорова « $-5/3$ », и что все рассмотренные подходы обеспечивают достаточно хорошее согласие с экспериментом в диапазоне частот до 15 Гц. Это подтверждает достаточно высокое разрешение, обеспечиваемое сеткой, и низкую диссипацию численной схемы, используемой в расчетах. Кроме того, в расчетах хорошо воспроизводится наблюдаемый в эксперименте пик в спектре v -компоненты скорости вблизи $f = 4 \text{ Гц}$, которая примерно соответствует первой моде неустойчивости сдвигового слоя. Отметим также, что в экспериментальных спектрах наблюдается подъем на высоких ($> 15 \text{ Гц}$) частотах, что свидетельствует о наличии в эксперименте не связанного с турбулентными пульсациями источника высокочастотных колебаний.

Наконец, из Рис. 8 видно хорошее согласование расчетных и экспериментальных профилей скорости осредненного течения и ее среднеквадратичного отклонения.

Таким образом, все рассмотренные модели обеспечивают надежное предсказание как гидродинамических характеристик среднего течения, так и его пульсационных характеристик.

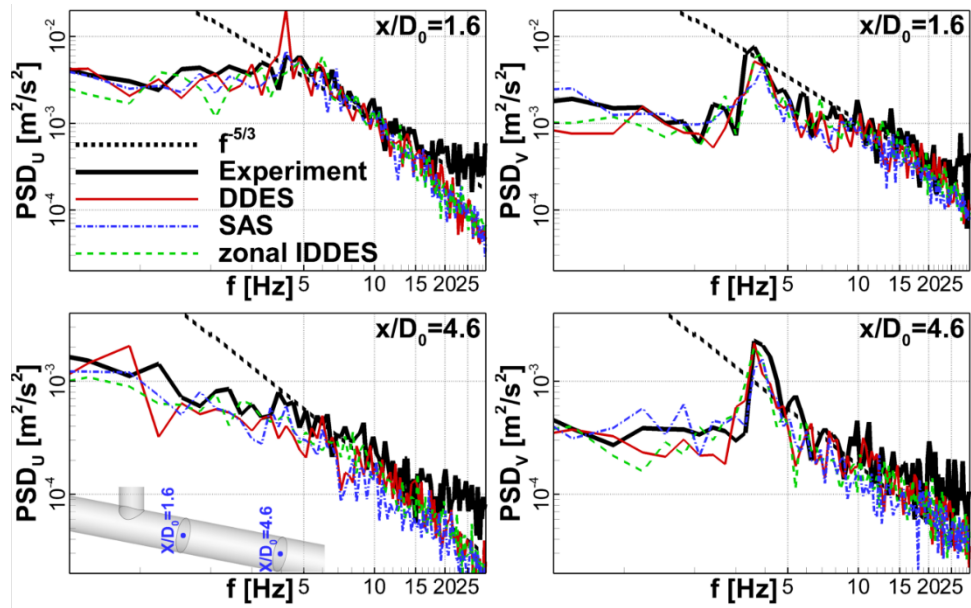


Рис. 7. Сравнение расчетных и экспериментальных узкополосных спектров пульсаций u - и v -компонент скорости с полосой пропускания 0.3 Гц в точках, показанных в левой нижней рамке

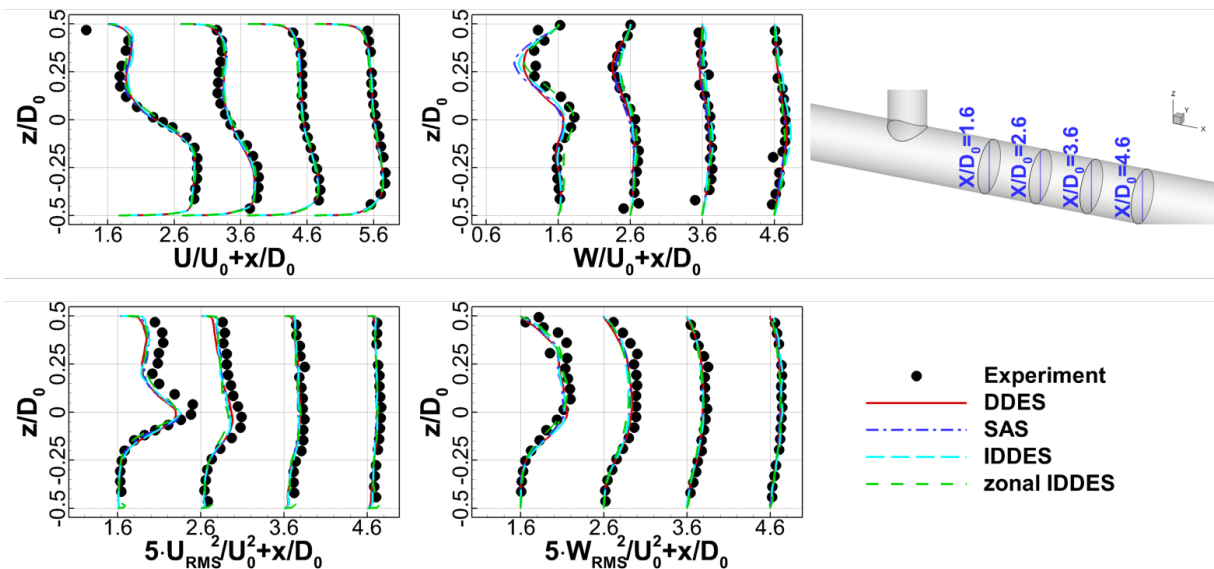


Рис. 8. Сравнение профилей средней скорости и ее среднеквадратичного отклонения вдоль вертикальных линий в плоскости симметрии xz при $x/D_0 = 1.6, 2.6, 3.6$ и 4.6

На рис. 9 представлены осредненные по времени поля безразмерной температуры $T^* = (T_0 - T)/\Delta T$ и ее среднеквадратичного отклонения $T^*_{RMS} = T_{RMS}/\Delta T$, полученные в расчетах с использованием зонного RANS-IDDES метода. Они наглядно иллюстрируют процесс смешения горячей и холодной воды вниз по потолку от Т-образного соединения и свидетельствуют о том, что максимальные колебания температуры происходят в начале слоя смешения, где теплая вода из патрубка втекает в относительно холодный поток в магистральной трубе: на этом участке уровень пульсаций температуры достигает около $0.3\Delta T$, а далее вниз по потоку он снижается до $0.1\Delta T$.

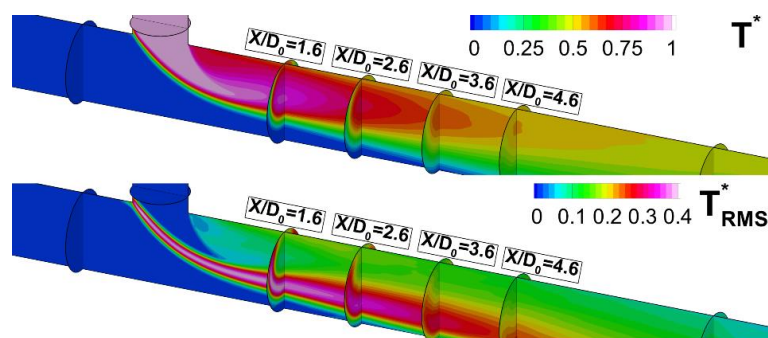


Рис. 9. Контуры средней температуры и ее среднеквадратичного отклонения из зонного RANS-IDDES расчета

На Рис. 10 представлено сравнение профилей средней температуры стенки и ее среднеквадратичного отклонения с соответствующими экспериментальными данными. Видно, что эти величины оказываются более чувствительными к используемому подходу к моделированию турбулентности, чем гидродинамические параметры течения, а результаты, полученные с использованием зонного RANS-IDDES подхода, в целом заметно лучше согласуются с экспериментальными данными, чем соответствующие результаты, полученные с использованием глобальных подходов. Основное различие между распределениями температуры, полученными в рамках глобальных подходов, от результатов зонного RANS-IDDES расчета наблюдается на линии «Тор», где профили, полученные с использованием DDES, SAS и IDDES, не только сильно отклоняются от профилей, полученных с помощью зонного подхода, но и имеют нефизический минимум вблизи $x/D_0 = 1$. Преимущество зонного RANS-IDDES видно и вдоль других линий, однако там оно выражено не столь явно. Такой же вывод можно сделать и в отношении среднеквадратичного отклонения температуры. Хотя все рассмотренные подходы достаточно хорошо предсказывают эту величину (см. Рис. 10), наилучшее согласование с экспериментом достигается при использовании зонного RANS-IDDES. Следует также отметить, что, в отличие от глобальных подходов, зонный RANS-IDDES предсказывает наличие пульсаций температуры на стенке начиная с $x/D_0 = 0$, что обеспечивается благодаря присутствию разрешенной турбулентности вверх по потоку от Т-образного соединения (см. нижнюю рамку на Рис. 6). Хотя экспериментальные данные по величине среднеквадратичного отклонения температуры при $x/D_0 < 1.5$ отсутствуют, ненулевой уровень T_{RMS}^* в этой области представляется физически правильным.

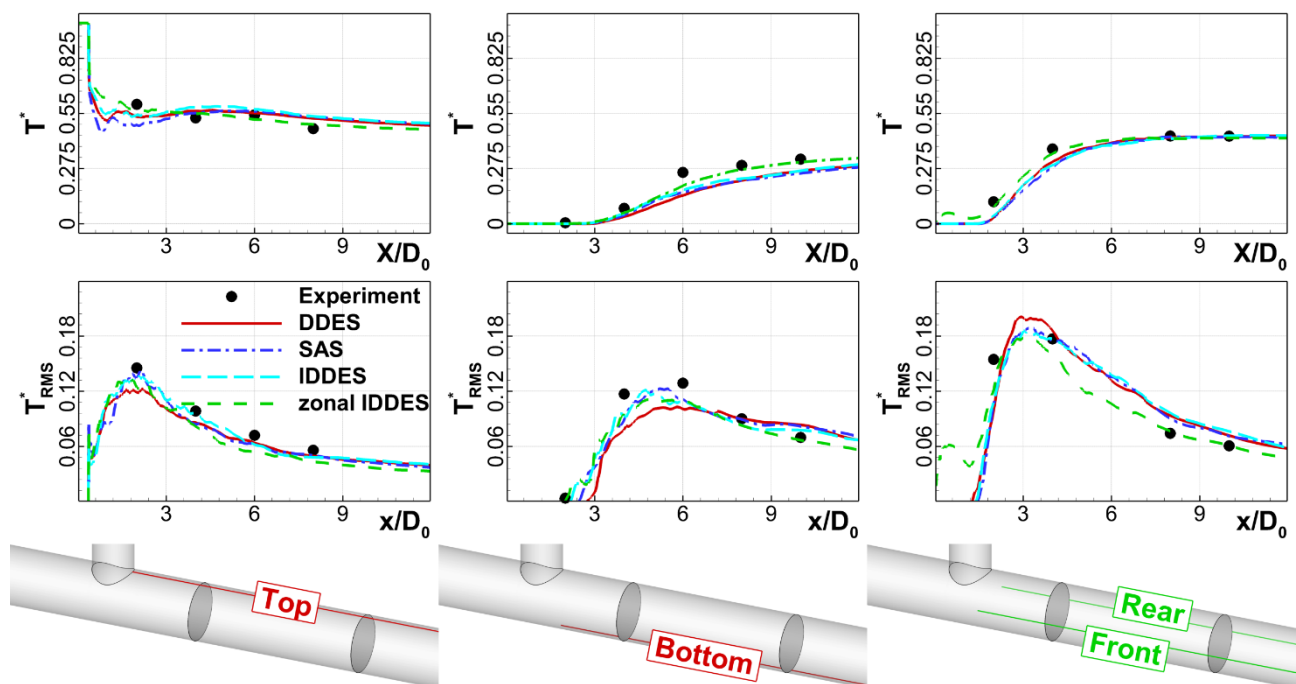


Рис. 10. Сравнение продольных распределений средней температуры и ее среднеквадратичного отклонения на стенке магистральной трубы, рассчитанных с помощью различных вихреразрешающих подходов, с экспериментальными данными

Подводя итог, можно заключить, что для тестового течения Vattenfall [14] все рассмотренные подходы обеспечивают приемлемую точность. Однако наилучшее согласование с экспериментальными данными достигается при использовании зонного RANS-IDDES подхода в сочетании с генератором синтетической турбулентности STG [18]. Для того чтобы проверить, применим ли этот подход и для более сложных конфигураций включающих, в частности, поворот магистрального трубопровода вверх по потоку от Т-образного соединения, были проведены расчеты для одной из таких конфигураций, соответствующей эксперименту [1].

2. Тестирование зонного RANS-IDDES для течения с поворотом магистральной трубы вверх по потоку от Т-образного соединения

2.1. Постановка задачи и метод решения

На Рис. 11 представлены геометрии двух рассмотренных в эксперименте [1] конфигураций, соответствующих трубопроводам, для которых в легководном реакторе наблюдалась течь из-за термической усталости материала стенок [22]. Они включают магистральную трубу и патрубок с внутренними диаметрами D и $D/3$, соответственно. В дальнейшем конфигурация с прямой магистральной трубой называется «straight», а конфигурация с ее изгибом – «elbow». В первом случае длина магистральной трубы до Т-образного соединения составляет $2D$, а во втором магистральная труба с радиусом поворота $1,5D$ и дополнительным прямолинейным участком длиной D располагается на расстоянии $2D$ вверх по потоку от соединения. Среднерасходная скорость одинакова для обоих экспериментов, а объемная скорость поддерживается постоянной на протяжении всех экспериментов и составляет U_0 и $0.68U_0$ в магистральной трубе и патрубке, соответственно. Температура воды на входе в патрубок равна T_0 , а на входе в магистральную трубу $T_0 + \Delta T$. Стенки обеих труб тепло-изолированы. Соответствующее число Рейнольдса, построенное по U_0 и D ($Re = \rho \cdot U_0 \cdot D / \mu$), равно 390000, а число Прандтля $Pr = \mu \cdot C_p / \lambda = 3.7$.

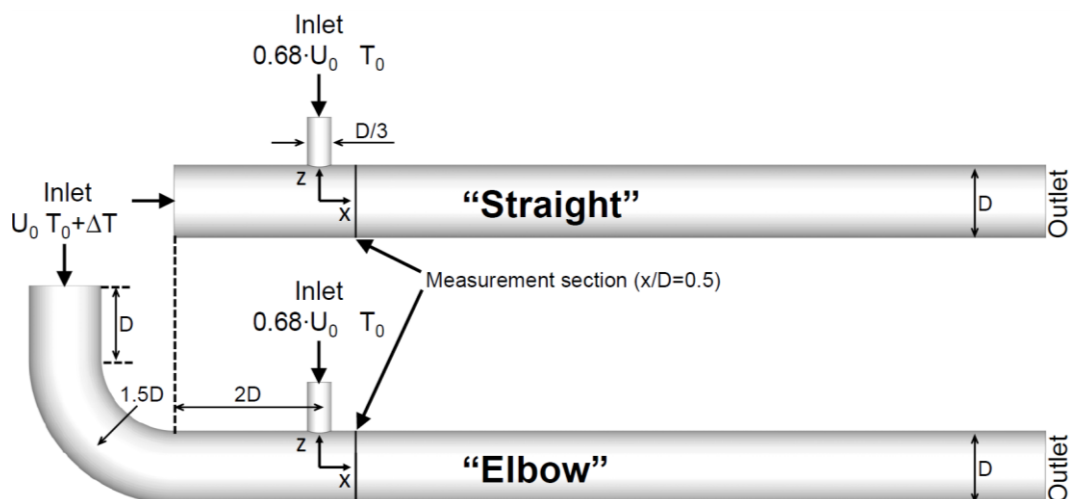


Рис. 11. Расчетная область и граничные условия для «straight» и «elbow» геометрий. Начало координат находится в точке пересечения осей магистральной трубы и патрубка

Расчетная сетка состоит из примерно $4.4 \cdot 10^6$ и $6.6 \cdot 10^6$ шестигранных ячеек для «straight» и «elbow» конфигураций, соответственно. Шаги сетки в продольном и азимутальном направлениях составляют 10% и 5% от толщины пограничного слоя, что соответствует рекомендациям для IDDES расчетов [11]. Шаг по нормали к стенке изменяется от пристеночного значения, обеспечивающего выполнение условия $\Delta y_w^+ < 1$, до 5% толщины пограничного слоя в ядре течения. Шаг по времени составляет $\Delta t = 0.004D/U_0$, что обеспечивает максимальное число Куранта меньше единицы в большей части области.

Граничные условия задаются следующим образом.

На стенках используются условия прилипания и непроницаемости для скорости и адиабатические условия для температуры. Граничные условия на входных границах базируются на предварительных расчетах течения в трубе до сечения, в котором толщина пограничного слоя совпадают с экспериментальной. Задаваемые на входе нестационарные профили скорости являются суммой стационарного профиля скорости и турбулентных пульсаций, рассчитанных с помощью STG [18]. Для температуры на входе задавались стационарные входные профили, извлеченные из тех же RANS-решений. Наконец, на выходе задавалось постоянное давление, а остальные величины вычислялись путем линейной экстраполяции изнутри расчетной области.

2.2. Результаты расчетов

На Рис. 12 и 13 приведено сравнение расчетных и экспериментальных радиальных профилей средних скорости и температуры и их среднеквадратичных отклонений в сечении $x/D = 0.5$ (см. Рис. 11) для «straight» (Рис. 12) и «elbow» (Рис. 13) конфигураций. Как видно из этих рисунков, максимальное различие результатов расчетов и экспериментальных данных наблюдается для среднеквадратичного отклонения скорости в нижней части магистральной трубы (при $-0.5 < z/D < 0.15$), т.е. вне зоны смещения (аналогичные результаты получены с использованием LES в [3]). В то же время, для обеих конфигураций как расчетные профили средней температуры, так и ее среднеквадратичного отклонения, которые являются наиболее важными величинами с точки зрения термической усталости, хорошо согласуются с соответствующими экспериментальными профилями. Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что зонный RANS-IDDES подход обеспечивает инженерную точность расчета теплообмена в Т-образных соединениях как с прямой, так и с изогнутой магистральной трубой, что оправдывает его применение для параметрических исследований этого типа течений, результаты которых представлены в следующем разделе.

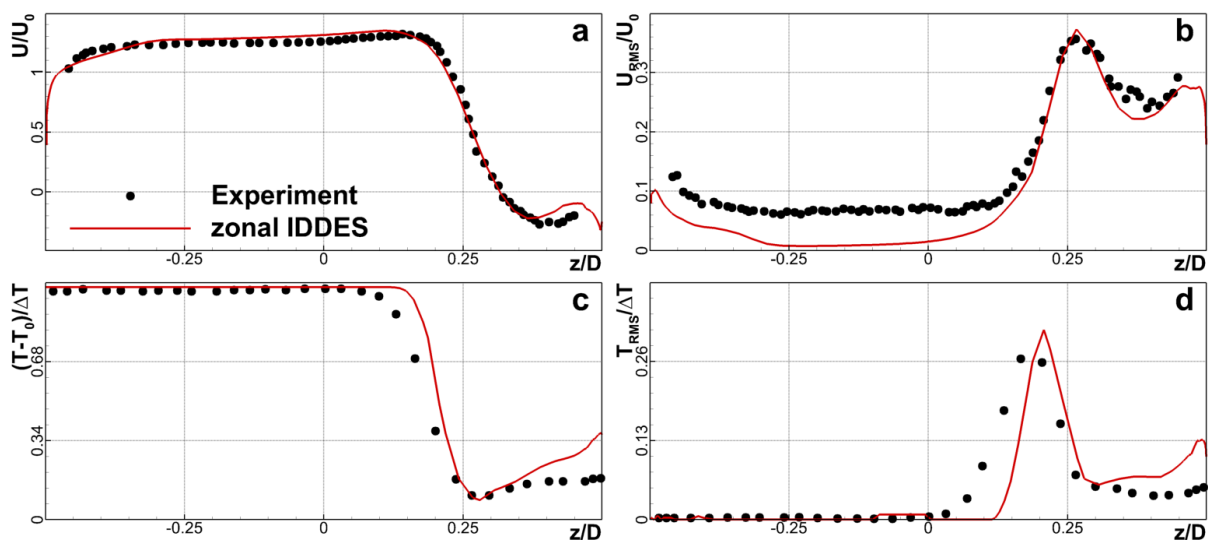


Рис.12. Сравнение расчетных профилей средней продольной скорости (а), ее среднеквадратичного отклонения (б) и профилей средней температуры (в) и ее среднеквадратичного отклонения (г) при $x/D = 0.5$ конфигурации «straight»

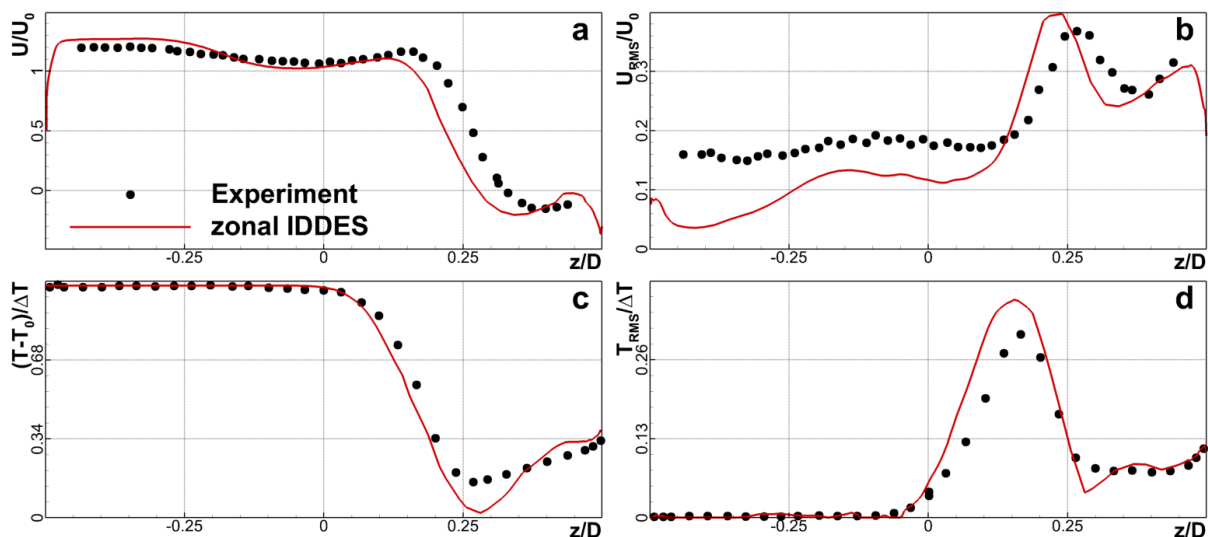


Рис.13. То же, что и на Рис. 12, для конфигурации «elbow»

3. Параметрическое исследование влияния направления изгиба магистральной трубы и расстояния от изгиба до Т-образного соединения

Для оценки этих эффектов было выбрано 9 конфигураций входной части магистральной трубы, характеризующихся различными углами между коленом и патрубком в плоскости YZ ($\phi = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$) и расстояниями от колена до патрубка ($L/D = 1, 2, 4$) (конфигурация с $\phi = 0^\circ$ и $L/D = 2$ соответствует экспериментальной установке [1], представленной в предыдущем разделе). Постановка задач в этих расчетах была идентична постановке, представленной в разделе 2.1.

Анализ контуров мгновенной завихренности, наложенных на линии тока осредненного течения (см. Рис. 14), свидетельствуют о том, что с увеличением угла ϕ слой смешения, отрывающийся от внутренней поверхности колена, внутри магистральной трубы удаляется от патрубка и происходит заметное уменьшение размеров зоны смешения потоков за Т-образным соединением. Что касается влияния параметра L/D , то его увеличение приводит к утолщению упомянутого слоя смешения и к уменьшению зоны смешения за Т-образным соединением.

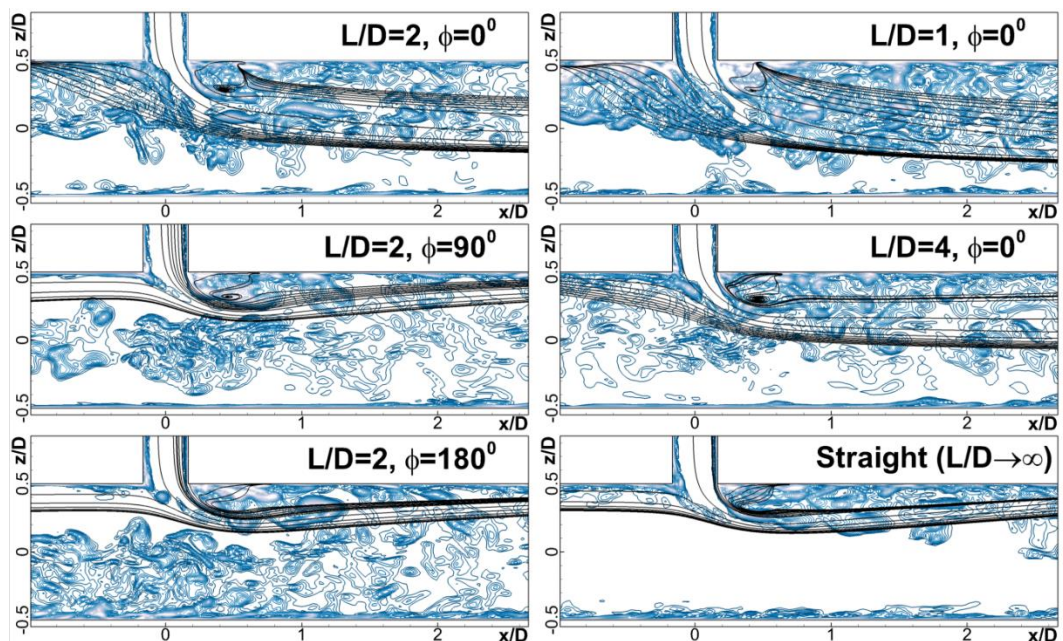


Рис. 14. Влияние угла (ϕ) и расстояния (L/D) между коленом и патрубком на контуры мгновенной завихренности и линии тока осредненного течения в плоскости $y = 0$

Описанные выше изменения структуры течения оказывают значительное влияние на средние и мгновенные поля температуры, которое наиболее сильно проявляется в области Т-образного соединения. Как видно из продольных распределений средней температуры при $L/D = 1$ (Рис. 15а), увеличение угла ϕ от 0° до 90° приводит к сильному падению температуры до уровня, соответствующего прямой магистральной трубе. При дальнейшем увеличении ϕ (от 90° до 180°) эта тенденция не меняется, но становится значительно менее выраженной (см. Рис. 15б). Наконец, при фиксированном значении угла ϕ температура снижается с увеличением L/D и постепенно приближается к соответствующему профилю в асимптотическом случае $L/D \rightarrow \infty$ (прямая магистральная труба) – Рис. 15с.

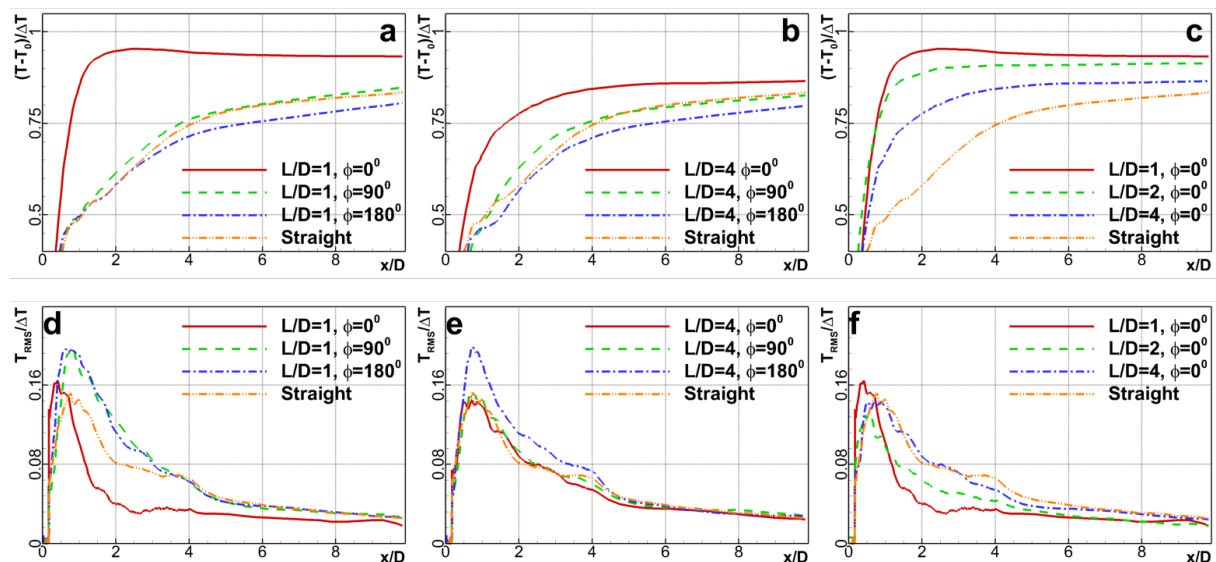


Рис. 15. Влияние параметров ϕ и L/D на распределения средней температуры (a – c) и ее среднеквадратичного отклонения (d – f) вдоль линии $z = 0.5$ в плоскости $y = 0$

Влияние увеличения угла ϕ на среднеквадратичное отклонение температуры (Рис. 15d, e) противоположно влиянию на температуру (среднеквадратичное отклонение увеличивается с ростом ϕ) и менее выражено. Это также верно для влияния расстояния L/D : его рост приводит к росту среднеквадратичного отклонения температуры (Рис. 15f).

Приведенные данные свидетельствуют о том, что конфигурации с $\phi = 180^\circ$ и малыми значениями L/D являются наиболее опасными с точки зрения термической усталости конструкции. Этот вывод наглядно иллюстрирует Рис. 16, на котором представлены азимутальные распределения максимальных среднеквадратичных отклонений температуры стенки при различных значениях ϕ и L/D . Указанное обстоятельство следует учитывать при проектировании трубопроводов.

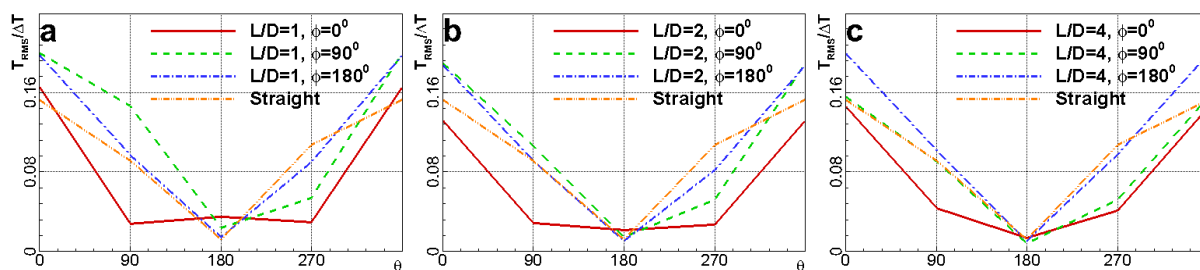


Рис. 16. Влияние параметров ϕ и L/D на азимутальные распределения максимальных среднеквадратичных отклонений температуры

Заключение

Проведено сравнительное исследование возможностей различных глобальных (DDES, IDDES, SAS) и зонных (RANS-IDDES) вихреразрешающих подходов к моделированию турбулентности для предсказания средних и пульсационных характеристик теплообмена в трубопроводах с Т-образными соединениями. Результаты моделирования тестового течения Vattenfall, экспериментально изученного в [14], свидетельствуют о том, что все рассмотренные подходы обеспечивают весьма точное предсказание мгновенных и средних полей скорости и температуры за Т-образным соединением. Однако, по точности предсказания среднеквадратичного отклонения температуры глобальные подходы несколько уступают зонному RANS-IDDES подходу, обеспечивающему значительно лучшее согласие с экспериментальными данными. Это метод также оказывается вполне применимым для расчета более сложных конфигураций, в том числе, конфигураций с поворотами магистральной трубы, расположенными выше по потоку от Т-образного соединения. С использованием зонного RANS-IDDES проведено параметрическое исследование таких конфигураций. Результаты расчетов свидетельствуют о том, что азимутальный угол между патрубком и коленом магистральной трубы, расположенным выше Т-образного соединения, сильно влияет на флуктуации температуры на стенке магистральной трубы. В частности, если патрубок и колено магистральной трубы направлены в противоположные стороны, максимум среднеквадратичного отклонения температуры на стенке магистральной трубы примерно на 40% превышает эту величину для геометрии с со-направленными патрубком и коленом, что свидетельствует о большей опасности таких конфигураций с точки зрения термической усталости. Расстояние между коленом и патрубком оказывает относительно слабое (менее 25%) влияние на пульсации температуры на стенке, но заметно влияет на тепловое перемешивание потоков за стыком: его эффективность возрастает с увеличением расстояния между коленом и патрубком.

Список литературы

1. Kimura, N., Ogawa, H., Kamide, H. Experimental study on fluid mixing phenomena in T-pipe junction with upstream elbow // Nuclear Engineering and Design, 2010, v. 240, pp. 3055–3066
2. Tunstall, R., Laurence, D., Prosser, R., Skillen, A. Large eddy simulation of a T-Junction with upstream elbow: The role of Dean vortices in thermal fatigue // Applied Thermal Engineering, 2016, v. 107, pp. 672–80

3. Lu, T., Attinger, D., Liu, S.M. Large-eddy simulations of velocity and temperature fluctuations in hot and cold fluids mixing in a tee junction with an upstream straight or elbow main pipe // *Nuclear Engineering and Design*, 2013, v. 263, pp. 32–41
4. Thermal load determination in the mixing Tee impacted by a turbulent flow generated by two fluids at large gap of temperature / Braillard, O., Jarny, Y., Balmigere, G. // *Proceedings of ICONE13-50361*, 13th International Conference on Nuclear Engineering, Beijing, China, 16-20 May 2005.
5. Frank, T., Lifante, C., Prasser, H.-M., Menter, F. Simulation of turbulent and thermal mixing in T-junctions using URANS and scale-resolving turbulence models in ANSYS CFX // *Nuclear Engineering and Design*, 2010, v. 240, pp. 2313–2328.
6. Large Eddy Simulation of Water Coolant Thermal Striping in a Mixing Tee Junction / Hu, L.-W., Kazimi, M.S. // *Proceedings of The 10th Int. Topical Meeting in Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-10)*, Seoul, Korea, 5-9 October 2003, 10 p.
7. Study on Fluid Mixing Phenomena for Evaluation of Thermal Striping in a mixing Tee / Igarashi, M., Tanaka, M., Kimura, N., Kamide, H. // *Proceedings of The 10th Int. Topical Meeting in Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-10)*, Seoul, Korea, 5-9 October 2003, 12 p.
8. LES analysis of fluid temperature fluctuations in a mixing Tee pipe with the same diameters / Ohtsuka, M., Kawamura, T., Fukuda, T., Moriya, S., Shiina, K., Kurosaki, M., Minami, Y., Madarame, H. // *Proceedings of ICONE 11-36064*, 11th International Conference on Nuclear Engineering, Tokyo, Japan, 20-23 April 2003.
9. Comments on the feasibility of LES for wings, and on a hybrid RANS/LES approach / Spalart, P.R., Jou, W.H., Strelets, M., Allmaras, S.R. // *Proceedings of First AFOSR International Conference on DND/LES*, 1997, 11 p.
10. Spalart, P.R., Deck, S., Shur, M.L., Squires, K.D., Strelets, M.K., Travin, A. A new version of detached-eddy simulation, resistant to ambiguous grid densities // *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, 2006, v. 20, pp. 181–195.
11. Shur, M.L., Spalart, P.R., Strelets, M.Kh., Travin, A.K. A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modeled LES capabilities // *International Journal of Heat and Fluid Flow* 2008, v. 29, pp. 1638–1649
12. Gritskevich, M.S., Garbaruk, A.V., Schütze, J., Menter, F.R. Development of DDES and IDDES formulations for the $k-\omega$ shear stress transport model // *Flow Turbulence and Combustion*, 2012, v. 88, pp. 431–449
13. Menter, F.R., Egorov, Y. The Scale-Adaptive Simulation Method for Unsteady Turbulent Flow Predictions. Part 1: Theory and Model Description // *Flow Turbulence and Combustion*, 2010, v. 85, pp. 113–138.
14. High-Cycle Thermal Fatigue in Mixing Tees: New Large-Eddy Simulations Validated Against New Data Obtained by PIV in the Vattenfall Experiment / Odemark, Y., Green, T.M., Angele, K., Westin, J., Alavyoon, F., Lundström, S. // *Proceedings of the 17th International Conference on Nuclear Engineering*, Brussels, Belgium, 12-16 July 2009.
15. Synthesis of Results for the T-Junction Benchmark / Mahaffy, J. // *Proceedings of CFD4NRS-3 Conference on Experimental Validation of CFD and CMFD Codes to Nuclear Reactor Safety Issues*. Washington, DC, USA, 14-16 September 2010.
16. OECD/NEA: T-Junction Benchmark Specifications, OECD/NEA & Vattenfall, 2009.
17. Smith, B.L., Mahaffy, J.H., Angele, K., Westin, J. Report of the OECD/NEA-Vattenfall T-Junction Benchmark Exercise // *Report No. NEA/CSNI/R(2011)-5*, 2011, 92 p.
18. Shur, M.L., Spalart, P.R., Strelets, M. Kh., Travin, A.K. Synthetic Turbulence Generator for RANS-LES Interfaces in Zonal Simulations of Aerodynamic and Aeroacoustic Problems // *Flow Turbulence and Combustion*, 2014, v. 93(1), pp. 63-92.
19. ANSYS Fluent Manual: Release 16.0. ANSYS Inc., Canonsburg, 2016

20. Ten Years of Experience with the SST Turbulence Model / Menter, F.R., Kuntz, M., Langtry, R. // Proceedings of 4th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer, 2003, pp. 625–632.
21. Global vs. Zonal Approaches in Hybrid RANS-LES Turbulence Modelling / Menter, F.R., Schütze, J., Gritskevich, M.S. // Progress in Hybrid RANS-LES Modelling, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design Volume 117, 2012, pp. 15–28.
22. Thermal fatigue in mixing tees: status and justification of French assessment method / Faïdy, C. // 12th International Conference on Nuclear Engineering, 25-29 April 2004, 8 p.