УДК 621.646:001.2

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ПРИМЕНЕНИЯ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ТРОЙНИКОВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ТРУБОПРОВОДОВ

М.М. Курносов

ОКБ “ГИДРОПРЕСС” г. Подольск, Московская обл., Российская Федерация
e-mail: mak4460@yandex.ru; strebnev@grpress.podolsk.ru

Выполнены работы по настройке расчетной модели для определения локальных параметров теплоносителя в тройниковых соединениях установок с водо-водяным энергетическим реактором с использованием моделей турбулентности типа LES. Проведен анализ влияния на результаты таких факторов, как субсеточная модель, разрешение расчетной сетки и шаг интегрирования по времени, даны рекомендации по выбору параметров расчетной модели. Выполнена оценка возможности масштабирования расчетных моделей по геометрическим и режимным параметрам. Показана допустимость использования геометрически уменьшенных расчетных сеток для определения значений осредненных по времени температуры и скорости для струйного режима течения в тройниковых соединениях при сохранении значения числа Струхаля. Также проведены расчеты течений в тройниковых соединениях с расположением зоны перемешивания в боковом трубопроводе. Для данного типа течения показана возможность существования низкочастотных колебаний температуры жидкости, а расчет должен выполняться на натурных режимных и геометрических параметрах.

***Ключевые слова*:** тройниковое соединение, расчетная модель, численное моделирование, CFD, LES, субсеточные модели, масштабирование расчетных моделей.

OPTIMIZATION AND APPLICATION OF ANALYTICAL MODEL TO DEFINE HEAT CARRIER PARAMETERS IN T-JOINTS OF PIPELINES

M.M. Kurnosov

OKB “GIDROPRESS”, Podolsk, Moscow region, Russian Federation
e-mail: mak4460@yandex.ru; strebnev@grpress.podolsk.ru

Setting of the analytical model is executed to define the heat carrier local parameters in T-joints of the light-water reactor plants. The LES-type (large eddy simulation) turbulence model is used. Influence of such factors as sub-grid models, mesh resolution and in-time integration steps on the results is analyzed. Recommendations for parameters selection of computational model are specified. The estimation of possibility to scale computational models on geometric and operating parameters is carried out. Possibility to use the reduced analysis grids for defining time-averaged temperature and velocity of the jet flow in T-joints at constant Strouchal number, with mixing zone situated in branch pipe, is considered, too. Possibility of existence of low-frequency temperature variations in the liquid is shown. Calculations are performed on full-scale modes and geometric parameters.

Keywords: T-joint, analytical model, numerical simulation, computational fluid dynamics (CFD), LES, sub-grid model, analytical model scaling.

Тройниковое соединение трубопроводов (ТСТ) — широко распространенный узел, с помощью которого выполняются соединения тру-

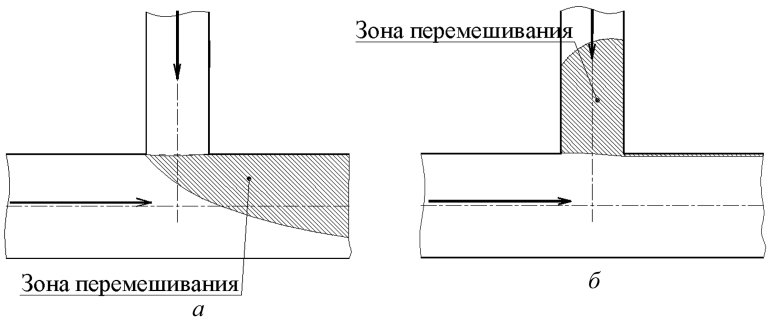


Рис. 1. Схема течения в тройниковом соединении трубопроводов:
а — струйное течение (вариант, рассмотренный в МСЗ); *б* — течение с отрывом (при малой относительной скорости)

бопроводов в различных системах реакторных установок (РУ) с водо-водяным энергетическим реактором (ВВЭР). Для ТСТ со смешением потоков характерны процессы турбулентного перемешивания, сопровождающиеся пульсациями температуры, скорости и давления; пульсации температуры преимущественно определяются пульсациями скорости (переносом объемов жидкости). Общая картина течения в ТСТ может быть упрощенно показана следующим образом. В зоне перемешивания (ЗП) потоков за счет их взаимодействия происходит образование крупных вихрей, которые постепенно распадаются вследствие диссипации энергии. В зависимости от расположения ЗП течение в собирающем тройнике может быть представлено следующим образом (рис. 1):

— как струйное (в случае смешения потоков в основном трубопроводе при большой относительной скорости $v_{\text{отн}}$ ($v_{\text{отн}} = v_{\text{бок.}}/v_{\text{прям.}}$);

— как течение с отрывом потока (в случае смешения потоков в боковом трубопроводе при относительно малой скорости $v_{\text{отн}}$).

Для струйного течения размеры образующихся вихрей ограничены их взаимодействием со стенками основного трубопровода, а время их существования и прохождения через конкретное сечения напрямую зависит от общей (суммарной) скорости в ЗП, что можно наглядно проследить, сравнивая картины течения в различные моменты времени. При течении с отрывом происходит отрыв потока из основного трубопровода и образование вихрей, которые располагаются в примыкающем трубопроводе, размер вихрей ограничен стенками трубопровода и взаимодействием с потоком из примыкающего трубопровода; скорость продвижения вихрей мала (их образование и распад происходят практически на месте).

В работах [1, 2] приведены описание расчетной модели для определения локальных параметров теплоносителя в ТСТ, разработанной для обоснования циклической прочности узлов РУ с ВВЭР, и результаты верификации указанной модели по температуре, компонентам

скорости и напряжениям Рейнольдса, выполненной в рамках "слепого" предтестового расчета по международной стандартной задаче (МСЗ) [3, 4]. В эксперименте МСЗ $v_{\text{отн}}$ составляла порядка единицы и наблюдалось расположение ЗП в основном трубопроводе (рис. 1, *а*). В настоящей работе приведены результаты исследований по оптимизации расчетной модели и некоторые вопросы ее применения в расчетном обосновании РУ с ВВЭР (ранее частично рассматривались в работе [5]).

Данные [3, 4] показывают, что модели турбулентности типа LES (моделирование крупных вихрей), как правило, обеспечивают более высокую точность расчета характерного для ТСТ течения, обеспечивается наиболее высокая точность определения как температуры, так и осевой компоненты скорости по сравнению с моделями URANS, SAS и DES, на аналогичных по размерности расчетных сетках. Отметим, что разработанные за последние годы варианты LES — Zonal LES и другие подобные модели, потенциально сокращающие аппаратные требования при хорошей точности моделирования, для течения в ТСТ не всегда могут обеспечить существенное снижение размерности расчетной сетки вследствие как необходимости покрывать LES-зоной всю область записи результатов, так и выносить LES-RANS интерфейсы вверх по потоку за пределы ЗП [6].

Необходимо отметить, что точность полученных в [1, 2] результатов по температуре и скорости достаточна для применения в расчетном обосновании РУ ВВЭР, однако, наблюдалось занижение пульсационной составляющей температуры, что не консервативно с точки зрения теплового нагружения оборудования. Говоря о "достаточной" точности имеется в виду, что погрешность расчета локальных параметров ниже, чем погрешность результатов расчета по системному теплогидравлическому коду. Параметры РУ определяются общеконтурными теплогидравлическими кодами, такими как ТРАП, КОРСАР, ATHLET. Результаты расчетов являются исходными данными при выполнении расчетов локальных параметров. Системные коды ориентированы на определение параметров, напрямую влияющих на безопасность РУ и, как правило, не верифицированы на задачах по определению локальных параметров в элемента РУ, за исключением реактора. Можно принять, что относительная погрешность опредедления параметров в элементах РУ вдвое превышает погрешность для целевых параметров, влияющих на безопасность, т.е. составляет порядка 20 %.

Выполним работы по выбору параметров расчетной модели ТСТ, исходя из следующих основных предпосылок:

— для задания теплового нагружения конструкции определяются скорость теплоносителя в расчетной области и температура в пристеночном слое, в целях задания граничных условий третьего рода (задача

непосредственного определения температуры стенки, которая в настоящее время не может быть решена с достаточной точностью [2], не ставится);

— при настройке параметров расчетной модели ТСТ требуется определить допустимые границы по минимальному разрешению расчетных сеток и проанализировать работу различных субсеточных моделей на подобных сетках.

Также необходимо рассмотреть и другие вопросы, имеющие существенное значение для практического использования, — масштабирование по геометрическим и режимным параметрам, и моделирование течений с расположением ЗП в боковом трубопроводе.

Вариантный расчет по выбору параметров расчетной модели ТСТ. Обычно принимаемым условием для использования моделей типа LES является разрешение сетки

$$\Delta^+ = \Delta \frac{u_\tau}{\nu},$$

где Δ — характерный размер ячейки сетки; ν — кинематическая вязкость; u_τ — скорость трения порядка 100 м/с или ниже (характерным размером для построения сетки могут также служить толщины сдвигового или пограничного слоев). Необходимое среднее разрешение сетки, очевидно, является функцией задачи. Выполненные в работе [7] расчеты на сетках различного разрешения показывают, что высокое разрешение сетки наиболее существенно с точки зрения воспроизведения высокочастотного спектра колебаний. По данным [3], единственным параметром, по которому однозначно наблюдается корреляция между размерностью сетки и точностью (даже на сетках достаточно большой размерностью — более 5. . . 10 млн элементов), является воспроизведение спектра колебаний на частотах выше 15. . . 20 Гц, который не имеет практического значения для обоснования прочности РУ.

Параметры сеток, на которых выполнялись расчеты, приведены в таблице. Все сетки — гексагональные, соотношение сторон элементов в зоне замеров составляло не более 1,5 в центральной части и не более 10 в пристеночной области, соотношение размеров соседних элементов по мере удаления от стенки — не более 1,2. Расстояние первого узла от стенки для сеток $A0$, $A-$, A и B принято примерно равным заглублению термопар в эксперименте. Сетка $A0$ (с очень низким даже по критериям моделей типа RANS разрешением) в численном эксперименте выступает “вне конкурса”.

Также к основным параметрам сетки относится безразмерное расстояние y^+ от стенки, характеризующее разрешение пристеночного слоя. Данный параметр при расчете с использованием пристеночных функций должен находиться в диапазоне от 20 до 150 единиц. Для

Параметры использованных сеток

Сетка	Число узлов, млн	Значение Δ^+		Максимальный размер ячейки в зоне $x = 0{-}20D$, мм		Расстояние первого узла от стенки, мм
		Направление		Направление		
		Осевое	Радиальное	Осевое	Радиальное	
A0	0,135	260	260	10,0	10,0	1,0
A-	0,29	210	180	8,01	6,67	1,0
A	0,5	190	150	7,5	5,7	1,0
B	1,2	130	120	4,9	4,4	0,86
B+	1,65	130	120	4,9	4,4	0,21
C	2,57	90	90	3,33	3,33	0,4

задач со значительным влиянием пограничного слоя для LES рекомендуется иметь значение расстояния y^+ порядка единицы [8], что приводит к очень высоким аппаратным требованиям. Предполагалось, что в условиях рассматриваемой задачи определяющую роль играет взаимодействие практически свободных турбулентных струй и перемешивание и вихреобразование, определяющие структуру потока, происходят в центральной части ТСТ на значительном удалении от стенок. Поэтому было принято использовать значение y^+ порядка $70\ldots80$, что удовлетворяет требованиям по равномерности и соотношению сторон элементов при небольшой размерности сетки. Также были выполнены расчеты на сетках с увеличенным разрешением пристеночной области — B (B^+ и By^+) и A (Ay^+). Размеры элементов выбирали, исходя из безразмерного расстояния y^+: для сетки B^+ — $\sim$20, для сеток By^+ и Ay^+ — $\sim$5.

На основании анализа приведенных результатов [3, 4] было принято решение рассмотреть три субсеточные модели — Смагоринского [9] (использовалась в предтестовом расчете [1, 2]), “динамическую” модель Смагоринского (модель Германо – Лилли [10, 11]) и модель LES – WALE [12].

Шаг нестационарного расчета по времени определяли, исходя из среднеквадратического значения числа Куранта (Куранта – Фридрихса – Леви) CFL:

$$\mathrm{CFL}_i = \Delta t\, U_i / l_i,$$

где l_i — характерный размер i-го контрольного размера (к.о.); i — номер к.о.; U_i — модуль локальной скорости потока в i-м к.о.

По результатам расчетов при уменьшении среднеквадратического значения CFL до $0{,}15\ldots0{,}1$ наблюдается улучшение согласования результатов расчета с экспериментальными данными, при дальнейшем уменьшении значения CFL выраженной зависимости не выявлено.

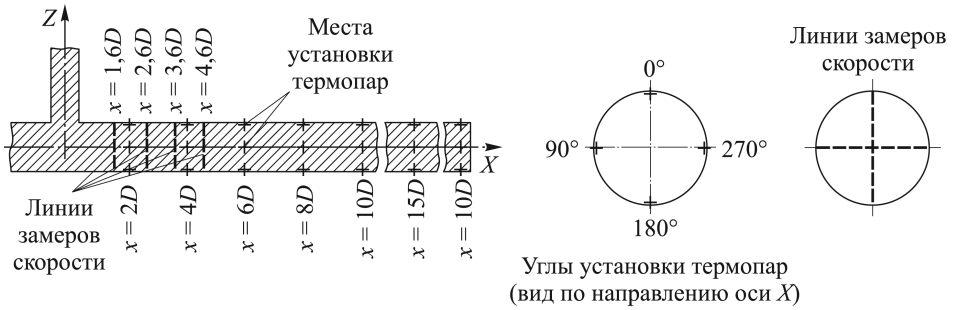


Рис. 2. Схема расположения термопар и линий измерения скорости на модели ТСТ

Начальные и граничные условия, а также настройки численных схем соответствуют использованным в предтестовом расчете [1, 2]; использовался программный комплекс ANSYS CFX [8].

Результаты вариантного расчета. Схема расположения термопар и линий измерения скорости в эксперименте МСЗ [3, 4] приведена на рис. 2. В МСЗ выполнялись измерения температуры (малоинерционными термопарами), а также компонентов скорости и напряжений Рейнольдса (лазерно-доплеровским методом). Термопары располагались на удалении $\sim$1 мм от сетки основного трубопровода, на расстояниях $2D$, $4D$, $6D$, $8D$, $10D$, $15D$ и $20D$ от точки пересечения осей трубопроводов по оси OX (D — диаметр основного трубопровода). В обозначениях расположения термопар приведены расстояние (в диаметрах трубопровода) по оси OX и образующая (угол расположения термопары). Линии измерения скорости располагались в основном трубопроводе по вертикали и горизонтали, перпендикулярно оси OX, на расстояниях 1,6D, 2,6D, 3,6D и 4,6D.

В эксперименте погрешность измерения мгновенных значений скорости составила $\pm 2 \ldots 3\,\%$, среднеквадратических — $\pm 3 \ldots 4\,\%$; погрешность определения безразмерной температуры (или относительного подогрева)

$$T^* = \frac{T - T_c}{T_h - T_c}$$

(T — температура в данной точке; T_c — температура холодной воды; T_h — температура горячей воды) составила не более 3. . . 5 %. Погрешность определения среднеквадратического значения температуры $T_{rms}/T = T_{rms}/(T_h - T_c)$ составила не более 6. . . 8 %. Поскольку экспериментальные данные по гидродинамическим пульсациям недоступны, то для оценки результатов расчетов можно использовать только данные по температуре и компонентам скорости. Как показано в работе [1, 2], значение осевой компоненты скорости u превышает по абсолютному значению компоненты v и w примерно в 25–50 раз. Таким образом, общее значение скорости (и, следовательно, коэффициента теплоотдачи) полностью определяется осевой компонентой

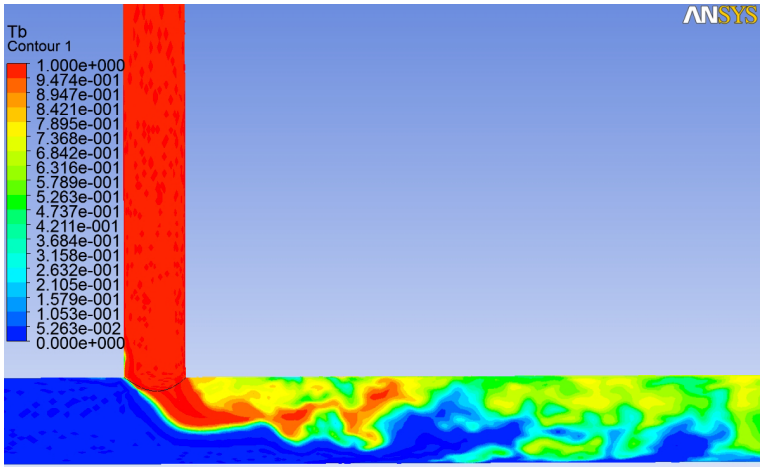


Рис. 3. Расчетная картина течения. Безразмерная температура в плоскости симметрии ТСТ

скорости (средняя относительная погрешность расчета которой невелика и составляет $\sim 5\,\%$ [2]). При этом полученная разность по осевой составляющей скорости существенно меньше, чем разность в определении температуры, следовательно, основным критерием выбора при настройке расчетной модели является правильное воспроизведение температуры. Расчетная картина течения для рассматриваемой задачи приведена на рис. 3. Некоторые результаты расчета осредненных по времени безразмерных температур и среднеквадратических отклонений безразмерной температуры приведены на рис. 4 (более подробные результаты приведены в работе [5]). Обозначения на рис. 4–6 следующие: T/dT — средняя безразмерная температура; T_{rms} — среднеквадратическое отклонение температуры.

Согласно полученным результатам, которые подтверждаются данными МСЗ [3, 4] и приведенными в [5], достаточную для практических расчетов точность можно получить при умеренном разрешении сетки (при увеличении Δ^+ до 150. . . 160 единиц падения точности практически не наблюдается), несмотря на то, что при использовании подобных сеток модель LES будет частично применяться за пределами обычной области применения — большая часть инерционной области спектра оказывается не в разрешаемой, а в моделируемой части (т.е. рассчитывается с использованием субсеточных моделей). Это можно объяснить тем, что крупномасштабная анизотропная турбулентность, зависящая от геометрических и режимных параметров течения, полностью оказывается в разрешаемой части спектра.

Отметим, что модель Смагоринского показывает на сколько значение температурных пульсаций меньше, чем экспериментальные значения, а модели Германо – Лилли и WALE — больше (что также подтверждается и данными [3, 4]. Различия расчетных пульсаций темпе-

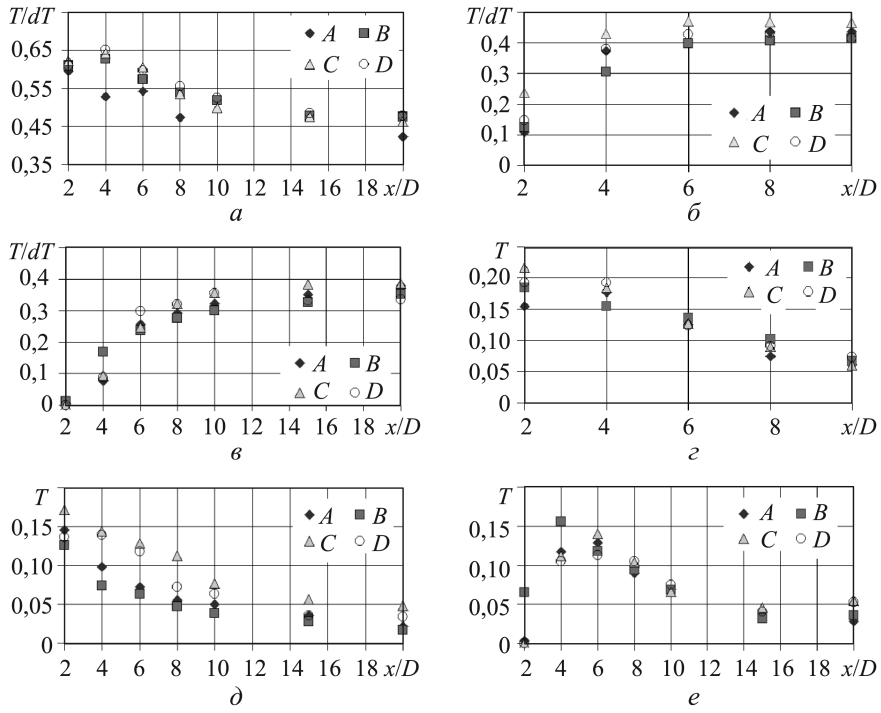


Рис. 4. Результаты вариантного расчета. Средние температуры и среднеквадратические отклонения температуры:
а, д — $T_{\text{ср}}$ (сетка B) и $T_{\text{ско}}$ (сетка C), образующие 0°; *б, г* — $T_{\text{ср}}$ (сетка B) и $T_{\text{ско}}$ (сетка B), образующие 90°; *в, е* — $T_{\text{ср}}$ (сетка C) и $T_{\text{ско}}$ (сетка C), образующие 180°; A — эксперимент; B — модель Смагоринского; C — модель Германо – Лилли; D — модель WALE

ратуры по разным субсеточным моделям в некоторых точках достигают 40. . . 50 % (аналогичные данные приведены в [3]), существенные различия наблюдаются также между разными расчетными сетками. Таким образом, расчет только на одной сетке по одной субсеточной модели не может считаться достаточным для получения достоверных результатов.

На сетках низкого разрешения модели Германо – Лилли и WALE показывают лучшие результаты, чем модель Смагоринского. При увеличении разрешения сетки погрешность модели Смагоринского снижается; при значениях $\Delta^+ \leq 100$ данная модель показывает хорошие результаты. При расчетах на сетках относительно низкого разрешения несколько лучшие результаты показывает модель WALE.

По результатам расчетов на сетках с увеличенным разрешением пристеночного слоя можно отметить, что сетка B^+ ($y^+ = \sim 20$) для всех субсеточных моделей показывает сопоставимые по точности или худшие результаты, чем сетка B. Результаты расчетов на сетке Δy^+ с повышенным до $y^+ = 5$ разрешением пристеночного слоя находятся на том же уровне по точности (по средней температуре точность несколько хуже, по среднеквадратическим отклонениям — несколько

лучше) по сравнению с исходной сеткой. Для сеток B и By^+ ($y^+ = 5$) точность расчета температуры также в целом оказывается выше (в особенности по средней температуре) у сетки с обычным разрешением пристеночного слоя. Следовательно, увеличение разрешения только в пристеночной области не оказывает положительного влияния на точность определения температуры на расстоянии 0,8. . . 1 мм от стенки. Предположительно, положительное влияние на процесс фильтрации в LES при увеличении разрешения компенсируется отрицательным влиянием, возникающим за счет неравномерности сетки и применения элементов с большим соотношением сторон.

В рамках численного эксперимента были проведены вариантные расчеты по изучению влияния коэффициента модели Смагоринского. Результаты аналогичных расчетов приведены в работе [13], в которой численно моделировался отличающийся по условиям эксперимент. В [13] был сделан вывод о том, что наиболее близкие к экспериментальным результаты дает значение $C_S = 0{,}14$. Согласно результатам [5], для сетки A (с низким разрешением) наилучшее согласование дало бы значение C_S между 0,065 и 0,1. На рис. 5 представлены некоторые результаты расчетов для сетки B, наилучшее согласование получено для значения $C_S = 0{,}1$. В целом же влияние коэффициента модели Смагоринского можно охарактеризовать как нелинейное.

Могут быть даны следующие рекомендации по параметрам расчетной модели:

1) по разрешению сетки: значения Δ^+ в зоне получения результатов должны быть не более 150, при этом необходимо обеспечить более

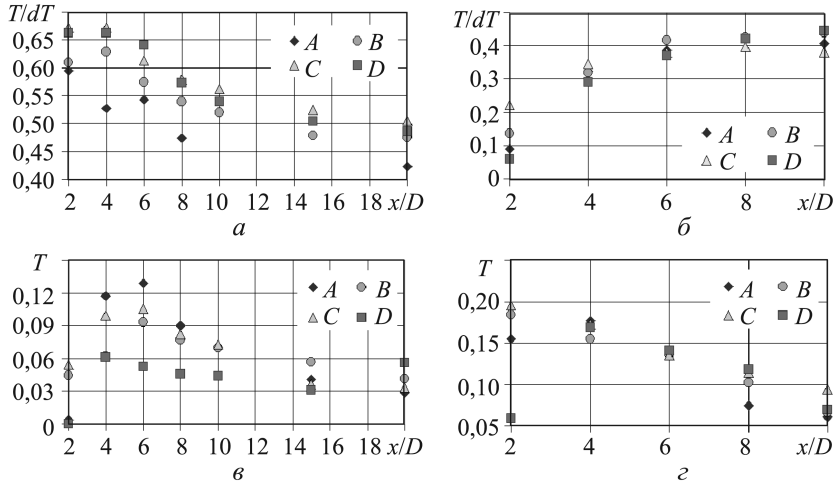


Рис. 5. Средние температуры и среднеквадратические отклонения температуры при различных значениях коэффициента модели Смагоринского:
а — $T_{\text{ср}}$, образующая 0°; *б* — $T_{\text{ср}}$, образующая 270°; *в* — $T_{\text{ско}}$, образующая 180°; *г* — $T_{\text{ско}}$, образующая 90°; A — эксперимент; B — $C_S = 0{,}1$; C — $C_S = 0{,}065$; D — $C_S = 0{,}18$

высокое разрешение сетки (не более $\Delta^+ = 120$) в зоне соединения трубопроводов и близлежащей части ЗП, где происходит формирование структуры течения (приведенные значения относятся к полностью гексагональным сеткам). Разрешение в пристеночном слое сетки можно выбирать, исходя из используемого типа пристеночных функций; значение $y^+ = 50 \ldots 70$ может считаться достаточным;

2) по субсеточной модели: при использовании расчетных сеток достаточно высокого разрешения (Δ^+ менее 100) может использоваться модель Смагоринского (при задании $C_S = 0{,}1$). Для сеток с более низким разрешением рекомендуется модель WALE, которая также представляется предпочтительной в тех случаях, когда нет достаточной информации по параметрам течения;

3) значения шага по времени рекомендуется выбирать, исходя из среднеквадратического значения числа Куранта $\sim 0{,}1$.

Масштабирование расчетных моделей и режимных параметров. Для полноценного применения разработанной расчетной модели необходимо решить вопрос масштабирования – изменения геометрических размеров расчетных моделей и (или) режимных параметров, чтобы исключить необходимость выполнять расчеты узлов РУ в натуральную величину. Отметим, что в последние годы активно развиваются расчеты с применением кластерных установок, при этом задача оптимизации аппаратных требований не теряет своей актуальности, так как “в отличие от верификационных расчетов” в ходе расчетного обоснования возможно рассмотрение значительного числа сочетаний режимных параметров или вариантов конструкции. Для использования масштабирования нужно, чтобы сохранялось подобие полей осредненой температуры, (осевой) скорости и амплитуды пульсаций температуры, и сохранялись частотные характеристики пульсаций.

Для нестационарного и неизотермического течения невозможно обеспечить соответствие всех критериев подобия, поскольку число независимых переменных, входящих в описывающие процесс уравнения, очень велико. Рассмотрим критерии подобия для условий МСЗ. Поскольку число Рейнольдса находится в диапазоне автомодельности, можно считать, что его значение влияет достаточно слабо (по данным [14], как $\mathrm{Re}^{0,1}$). Для струйного варианта течения в ТСТ и высоких значений локальных скоростей роль массовых сил незначительна по сравнению с инерционными, также в условиях МСЗ незначительно и влияние теплообмена со стенкой на температурное поле в жидкости (подтверждается результатами сравнительных расчетов [1]). На основе выполненного анализа можно предположить, что при расчете осредненных по времени параметров должна наблюдаться “полная” автомодельность (хотя ее условия реализуемы лишь частично). Достаточным условием для этого является подобие геометрии и сохранение профилей скоростей, параметров турбулентности и соотношения скоростей

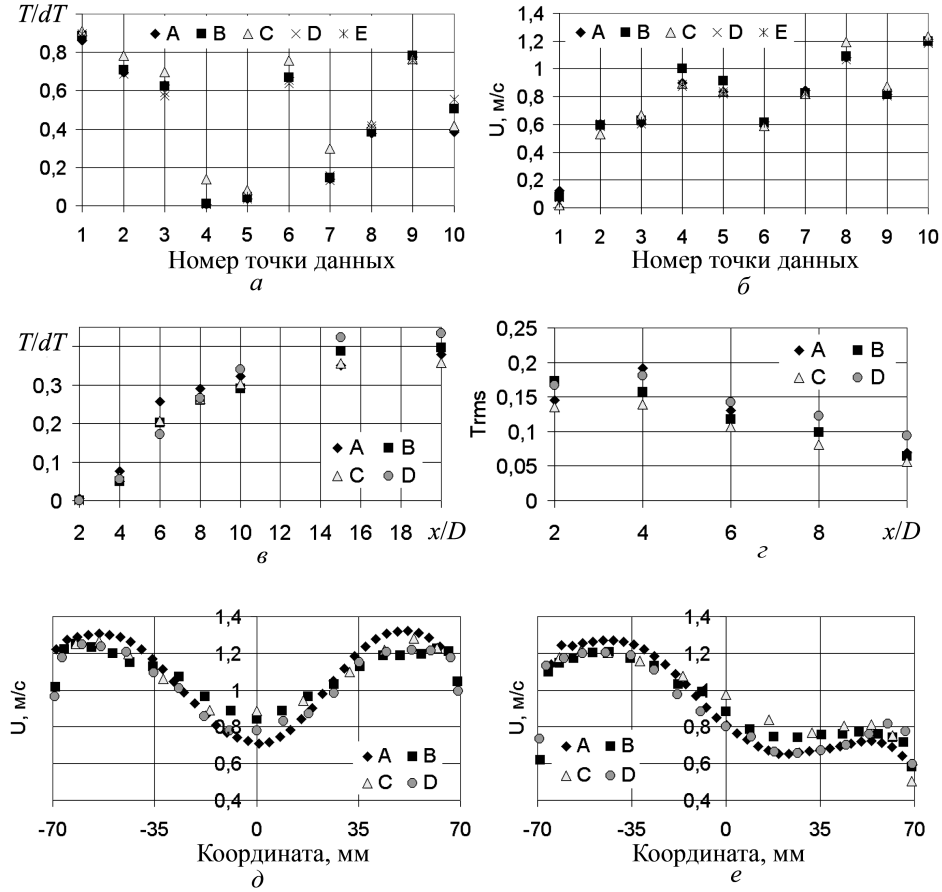


Рис. 6. Безразмерная температура и скорость U при масштабировании расчетных моделей:
а — $T_{\text{ср}}$, 10 точек; *б* — U, 10 точек; *в* — $T_{\text{ср}}$, образующая 180° (МСЗ); *г* — $T_{\text{ско}}$, образующая 270° (МСЗ); *д* — U, горизонтальная ось, $x = 1{,}6D$ (МСЗ); *е* — U, вертикальная ось, $x = 2{,}6D$ (МСЗ); *а, б* – RANS: масштаб 1 : 1 (A, B, C) и 1 : 2 (D, E); скорость 1 : 1 (A, D), 1 : 2 (B, E) и 1 : 4 (C); *в* — *е* — LES, Sh = const: A — эксперимент; B — масштаб 1 : 1; C — масштаб 1 : 2; D — масштаб 1,5 : 1

на входах в ТСТ. Данное предположение подтверждается результатами многочисленных расчетов по разным моделям типа RANS. Различие результатов расчетов осредненных параметров по $(k{-}\varepsilon)$-модели (рис. 6, *а* и *б*) в масштабе 1 : 1 для скоростей на входах в ТСТ, равных 1, 0,5 и 0,25 от исходных, и в масштабе 1 : 2 для скоростей, равных 1 и 0,5 от исходных, составляет по безразмерной температуре 2. . . 4 % (для скорости 0,25 от исходной — до 8 %), по осевой скорости — не более 4 % (скорость пересчитана для исходных размера расчетной модели и значения скорости). Для оценки результатов расчета использовали 10 случайным образом выбранных точек, расположенных как в пристеночном слое, так и в центральной части ЗП.

В отличие от расчетов по модели типа RANS расчеты по моделям типа LES показывают выраженную зависимость как осредненной по

времени температуры, так и интенсивности пульсаций температуры от абсолютного значения скорости [5]. Таким образом, для нестационарных процессов (или методов расчета, не использующих осреднение) даже в области автомодельности по Рейнольдсу сохранение некоторых критериев подобия имеет существенное значение.

Согласно результатам [5], удовлетворительная точность определения температуры при использовании LES может быть получена при расчете модельного и натурного числа Струхаля Sh (безразмерного времени), характеризующего скорость протекания процесса:

$$\frac{V_{\text{м}}\tau_{\text{м}}}{L_{\text{м}}} = \frac{V_{\text{н}}\tau_{\text{н}}}{L_{\text{н}}},$$

т.е. при одновременном изменении как геометрических размеров, так и режимных параметров. В настоящей работе выполнен расширенный анализ возможности масштабирования расчетных моделей на базе МСЗ. Использовалась показавшая лучшие результаты при масштабировании в [5] модель WALE. На рис. 6, *в*,. . . ,*е* приведены некоторые результаты расчета (с сохранением числа Sh) температуры и осредненной по времени осевой компоненты скорости U (пересчитанной для номинального размера расчетной модели путем деления значения скорости на масштаб) для расчетных моделей в масштабе 1 (сетка А), 0,5 $(1:2)$ и 1,5 $(1{,}5:1)$ по сравнению с данными МСЗ. Погрешность полученных при масштабировании результатов составляет по осредненной температуре 10. . . 15 % (при этом погрешность для масштабов $1:2$ и $1{,}5:1$ оказалась ниже, чем для исходной расчетной модели); по среднеквадратическому отклонению температуры — $\sim$15 % (практически одинаковая для всех расчетов); по осевой скорости — 5. . . 8 %. Представленные результаты подтверждают возможность использования масштабирования расчетных моделей для определения значений осредненных по времени температуры и скорости.

Статистическая оценка корректности масштабирования с точки зрения амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) колебаний температуры затруднена вследствие того, что исследуемый процесс носит случайный характер. Так, даже при проверке двух выборок, взятых из одной генеральной совокупности, — мгновенных значений температуры для одной и той же термопары (фрагментов, записанных последовательно друг за другом), полученных в ходе эксперимента МСЗ, значение коэффициента корреляции [15]

$$q = \frac{\dfrac{1}{n}\displaystyle\sum_{i=1}^{n} x_i y_i - \overline{xy}}{s_x s_y}$$

($\overline{x}$,$\overline{y}$ — средние значения по выборочным распределениям x_i, y_i в отдельности; s_x, s_y — соответствующие среднеквадратические отклоне-

ния) может составить около 0,05, что указывает на то, что выборки практически некоррелированы.

Таким образом, может быть выполнена только качественная оценка степени соответствия АЧХ как при экспериментальных исследованиях и численном моделировании в целом, так и при масштабировании расчетных моделей. Качественное сходство АЧХ при масштабировании во многих случаях наблюдается. Тем не менее, этот вопрос должен решаться с учетом консервативного подхода к расчетному обоснованию оборудования, при котором к большим тепловым нагрузкам приводят колебания температуры с более низкой частотой. Вопрос о необходимой степени консерватизма достаточно сложен, однако необходимо учитывать, что в настоящее время расчеты по термопульсации, как правило, не проводятся. Представляется, что вопрос о снижении консерватизма в любом случае может подниматься только после получения отрицательных результатов при обосновании прочности.

Течения в ТСТ с большими периодами колебаний температуры. Экспериментальные данные показывают, что период колебаний температуры в условиях МСЗ составляет не более 0,3. . . 0,5 с и колебания температуры жидкости не могут проникнуть в металл на существенную глубину. Это, однако, не означает безопасности таких колебаний для конструкции. Экспериментальным подтверждением опасности колебаний температуры, хотя и полученным в отличающихся условиях, можно считать результаты работы [16]: после испытаний суммарной длительностью всего 81 ч в металле исследуемого образца средствами УЗ-контроля были обнаружены индикации, свидетельствующие об образовании дефектов. При этом можно отметить качественное сходство частотных характеристик, приведенных в [16] графиков изменения температуры воды с экспериментом МСЗ.

Характерное время температурных пульсаций связано с размером и скоростью движения крупных турбулентных образований. Одним из вариантов, при котором произойдет увеличение периода колебаний, будет снижение скоростей движения теплоносителя (например, применительно к ГЦТ РУ ВВЭР — при переходе на естественную циркуляцию). Наряду с абсолютными значениями скоростей существенным является также соотношение скоростей в боковом и основном (прямом) трубопроводах (относительная скорость) $v_{\text{отн}}$, определяющая [14] характер течения и расположение ЗП (см. рис. 1). Возможным вариантом течений с большими периодами колебаний являются течения с малой относительной скоростью, при которых ЗП располагается в боковом трубопроводе (см. рис. 1, *б*). В РУ с ВВЭР данный вариант может реализовываться в узлах врезок трубопроводов различных систем в ГЦТ при подаче через эти трубопроводы с малыми расходами.

Согласно экспериментальным данным [14], ЗП перемещается в боковой трубопровод при снижении относительной скорости менее 0,05.

По расчетным данным (полученным с использованием моделей турбулентности RANS и LES) получаемый вариант течения в ТСТ практически не зависит от абсолютных значений диаметров трубопроводов; ЗП перемещается в боковой трубопровод при снижении относительной скорости менее 0,04. . . 0,05 для всех соотношений диаметров трубопроводов. Отметим, что по всем расчетным данным отношение диаметров сказывается на глубине проникания ЗП в примыкающий трубопровод (также сказываются и абсолютные размеры — чем больше диаметр, тем больше относительная глубина проникания ЗП).

Были выполнены вариантные расчеты для относительных скоростей 0,1; 0,05; 0,03 и 0,02 (для обоих трубопроводов использовался сформировавшийся турбулентный профиль скорости). Использовалась модель LES WALE. Некоторые результаты представлены на рис. 7 — распределения безразмерной температуры в плоскости симметрии ТСТ для $v_{\text{отн}} = 0{,}05$ и 0,03 и графики изменения температуры для двух точек в пристеночном слое для $v_{\text{отн}} = 0{,}03$ (точки расположены в боковом трубопроводе на расстоянии 2 (точка A) и 2,5 (точка B) диаметра бокового трубопровода от места врезки).

В ходе расчетов получено хорошее соответствие экспериментальным данным [14] и показана возможность существования низкочастотных колебаний температуры жидкости при малых значениях относи-

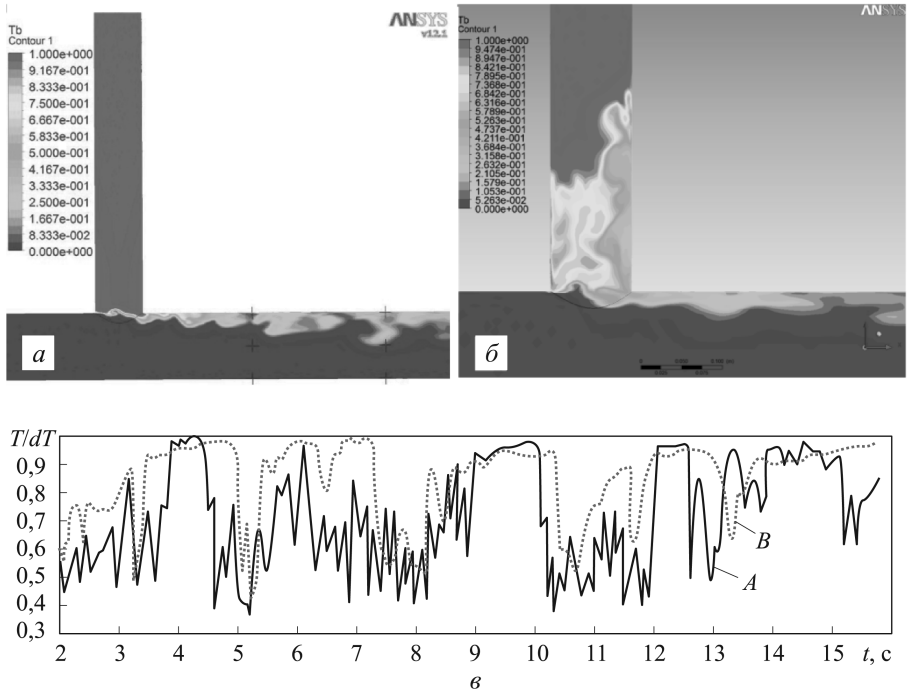


Рис. 7. Безразмерная температура в плоскости (*а*, *б*) и в некоторых точках (*в*) ТСТ при малой относительной скорости:
а, б, в — при $v_{\text{отн}} = 0,\ 05;\ 0{,}03;\ 0{,}03$ соответственно

тельной скорости (полученные периоды колебаний для $v_{\text{отн}} = 0{,}03$ и 0,02. . . 2 с и более).

Также были выполнены расчеты с масштабированием расчетных моделей по описанной ранее методике, которые показали, что для течения данного типа нарушается автомодельность по осредненным по времени значениям температуры и скорости, наблюдающаяся при струйном характере течения, и имеется зависимость размера ЗП от абсолютных размеров узла. Можно отметить, что при понижении локальных скоростей и переходе в части ЗП к смешанной конвекции невозможно одновременное сохранение значений определяющего критерия подобия для смешанной конвекции (число Фруда $\mathrm{Fr} = v^2/gd$) и принятого на основании ранее приведенных результатов критерия подобия нестационарного процесса, при котором сохраняется значение числа Струхаля. Соответственно, для течения данного типа масштабирование расчетных моделей в целом неприменимо даже для определения осредненных по времени параметров.

Заключение. Проведены вариантные расчеты по настройке расчетной модели ТСТ. Даны рекомендации по выбору основных параметров расчетной модели — разрешения расчетной сетки, субсеточной модели и шага по времени.

Исследована возможность использования масштабирования по геометрическим и режимным параметрам в целях снижения аппаратных требований и затрат машинного времени. Показана возможность использования геометрически уменьшенных расчетных сеток для определения значений осредненных по времени температуры и скорости для рассмотренного в МСЗ струйного режима смешения в ТСТ при сохранении равенства модельного и натурного числа Струхаля.

Выполнены вариантные расчеты течений в ТСТ с расположением зоны перемешивания в боковом трубопроводе. В ходе расчетов показана возможность существования низкочастотных колебаний температуры жидкости. Для течения данного типа расчет должен проводиться на натурных режимных и геометрических параметрах.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Курносов М.М.*, *Стребнев Н.А.* Вариант предтестового расчета международной задачи по верификации CFD–кодов на экспериментальных результатах, полученных на модели тройникового соединения трубопроводов // Сб. ВАНТ. Сер. “Обеспечение безопасности АЭС”. 2012. Вып. 32. С. 5–17.
2. *Курносов М.М.* Верификация расчетной модели для определения локальных параметров и тройниковых соединений трубопроводов // Тяжелое машиностроение. 2013. № 10. С. 37–40.
3. *Mahaffy J.* Synthesis of Results for the Tee-Junction Benchmark. Proc. of CFD4NRS-3, Washington D.C., USA, 2010.
4. *Smith B.*, *Mahaffy J.*, *Angele K.*, *Westin J.* Report of the OECD/NEA–Vattenfall T–Junction Benchmark Exercise, OECD/NEA, Technical report, NEA/CSNI/R (2011) 5, 2011.

5. *Курносов М.М.*, *Стребнев Н.А.* Оптимизация методики расчета локальных параметров в тройниковых соединениях трубопроводов при турбулентных пульсациях // Сб. ВАНТ. Сер. “Обеспечение безопасности АЭС”. 2012. Вып. 32. С. 18–32.
6. *Колесник В.П.*, *Ляскин А.С.* Опыт применения программного комплекса ANSYS CFD для решения задач атомной энергетики / Проблемы верификации и применения CFD–кодов в атомной энергетике. Науч.-технич. семинар ГКАЭ “Росатом” // Сб. докладов. ОКБМ, Нижний Новгород, 19–20.09.2012. С. 113–122.
7. *Loginov M.S.*, *Comen E.*, *Kuczaj A.* Application of large-eddy simulation to pressurized thermal shock problem. Proc. of ICONE 17, ICONE 17-75894, Brussels, Belgium, 2009.
8. *ANSYS*, Inc. ANSYS CFX-Solver Theory Guide, Release 12.1, 2009.
9. *Smagorinsky J.* General circulation experiments with the primitive equations, Mon. Weather Review. 1963. Vol. 93. P. 99–165.
10. *Germano M.*, *Piomelli U.*, *Moin P.*, *Cabot W.* A dynamic subgrid-scale eddy viscosity mode // Phys. Fluids. 1991. No. A 3(7). P. 1760–1765.
11. *Lilly D.K.* A proposed modification of the Germano subgrid-scale closure method // Phys. Fluids. 1992. No. A 4(3). P. 633–635.
12. *Nicoud F.*, *Ducros F.* Subgrid-scale stress modeling based on the square of the velocity gradient tensor // Flow, Turbulence and Combustion. 1999. Vol. 62. P. 183–200.
13. *Tanaka M.*, *Ohshima H.* Numerical simulation of thermal mixing in T-junction piping system using large-eddy simulation approach. Proc. of CFD4NRS-3, Washington D.C., USA, 2010.
14. *Parras F.*, *Bosser M.*, *Milan D.*, *Berthollon G.* Heat transfer in pressurized water reactor components most often subjects to thermal shock // Nuclear Technology. Jan. 1980. Vol. 47. P. 125–151.
15. *Худсон Д.* Статистика для физиков. Лекции по теории вероятностей и элементарной статистике. М.: Мир, 1970. 296 с.
16. *Судаков А.В.*, *Словцов С.В.*, *Прохоров В.А.*, *Каширин В.И.*, *Федосов В.Г.* Расчетно-экспериментальное исследование условий трещинообразования в элементах оборудования реакторных установок при пульсациях температур // Материалы 8 Междунар. науч.-техн. конф. “Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР”, г. Подольск, 28–31.05.2013.

REFERENCES

[1] Kurnosov M.M., Strebnev N.A. Version of pre-test calculation of international mission on verification of CFD-codes based on experimental results obtained on the model of T-junction of pipelines. *Sb. Voprosy atomnoy nauki i tekhniki*, *Obespechenie bezopasnosti AES* [Collected articles “Problems of Atomic Science and Technology. Series “Organization of Nuclear Power Plant Safety], 2012, iss. 32, pp. 5–17 (in Russ.).
[2] Kurnosov M.M. Verification of computational model to define local parameters in T-junctions of pipelines. *Tyazheloe mashinostroenie* [Russian J. of Heavy Machinery], 2013, no. 10, pp. 37–40 (in Russ.).
[3] Mahaffy J. Synthesis of Results for the Tee-Junction Benchmark. *Proc. of CFD4NRS-3*, Washington State D.C., USA, 2010.
[4] Smith B., Mahaffy J., Angele K., Westin J. Report of the OECD/NEA–Vattenfall T-Junction Benchmark Exercise, OECD/NEA, *Technical report*, NEA/CSNI/R (2011) 5, 2011.
[5] Kurnosov M.M., Strebnev N.A. Optimization of the method to calculate local parameters in T-junctions of pipelines at turbulent pulsations. *Sb. Voprosy atomnoy nauki i tekhniki*. *Obespechenie bezopasnosti AES* [Collected articles “Problems of Atomic Science and Technology. Series “Organization of Nuclear Power Plant Safety], 2012, iss. 32, pp. 18–32 (in Russ.).

[6] Kolesnik V.P., Lyaskin A.S. Experience of ANSYS CFD complex application to solve problems of nuclear-power engineering . *Problemy verifikatsii i primeneniya CFD-kodov v atomnoy energetike*. *Nauch.-tekhn. seminar GKAE "Rosatom". Sb. dokladov. OKBM* [Problems of verification and CFD-codes application in nuclear-power engineering. Sci.-Tech. Seminar of State Corporation in Atomic Energetics "Rosatom". Collection of reports. Nizhniy Novgorod, 19–20.09.2012, pp. 113–122 (in Russ.).

[7] Loginov M.S., Comen E., Kuczaj A. Application of large-eddy simulation to pressurized thermal shock problem. *Proc. of ICONE 17*, ICONE 17-75894, Brussels, Belgium, 2009.

[8] ANSYS, Inc. ANSYS CFX-Solver Theory Guide, Release 12.1, 2009.

[9] Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations, Mon. Weather Review, 1963, vol. 93, pp. 99–165.

[10] Germano M., Piomelli U., Moin P., Cabot W. A dynamic subgrid-scale eddy viscosity mode. *Phys. Fluids*, 1991, no. A 3(7), pp. 1760–1765.

[11] Lilly D.K. A proposed modification of the Germano subgrid-scale closure method. *Phys. Fluids*, 1992, no. A 4(3), pp. 633–635.

[12] Nicoud F., Ducros F. Subgrid-scale stress modeling based on the square of the velocity gradient tensor. *Flow, Turbulence and Combustion*, 1999, vol. 62, pp. 183–200.

[13] Tanaka M., Ohshima H. Numerical simulation of thermal mixing in T-junction piping system using large-eddy simulation approach. *Proc. of CFD4NRS-3*,Washington State D.C., USA, 2010.

[14] Parras F., Bosser M., Milan D., Berthollon G. Heat transfer in pressurized water reactor components most often subjects to thermal shock. *Nuclear Technology*, Jan. 1980, vol. 47, pp. 125–151.

[15] Khudson D. Statistika dlya fizikov. Lektsii po teorii veroyatnostey i elementarnoy statistike [Lections on probability theory]. Russ. Ed. Moscow, Mir Publ., 1970. 296 p.

[16] Sudakov A.V., Slovtsov S. V., Prokhorov V.A., Kashirin V.I., Fedosov V.G. Computational-experimental research of crack formation in the reactor equipment elements at temperature pulsations. *Mat. 8 Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. "Obespechenie bezopasnosti AES s VVER"* [Proc.8. Int. Sci. Conf. "Safety ensuring of atomic station with water-cooled power reactor"], Podol'sk, 28–31.05.2013 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 2.12.2013

Курносов Максим Михайлович — зам. начальника отдела теплогидравлики ОКБ "ГИДРОПРЕСС". Автор восьми работ в области CFD-моделирования и определения граничных условий для расчетов прочности оборудования.
ОКБ "ГИДРОПРЕСС", Российская Федерация, 142103, Московская обл., г. Подольск, ул. Орджоникидзе, д. 21.

Kurnosov M. M. — deputy head of thermal hydraulics department of the OKB "Gidropress". Author of 8 publications in the field of CFD-simulation and boundary conditions definition for the equipment strength calculation.
OKB "Gidropress, ul. Ordzhonikidze 21, Podolsk, Moscow region, 142103 Russian Federation.