

УДК: 519.6

Расчетные исследования процесса перемешивания неизотермических потоков натриевого теплоносителя в тройнике

А. А. Аксёнов^{2,b}, С. В. Жлуктов², В. В. Шмелев², Е. В. Шапоренко²,
С. Ф. Шепелев¹, С. А. Рогожкин^{1,a}, А. Н. Крылов¹

¹АО «ОКБМ «Африкантов»,
Россия, 603074, г. Нижний Новгород, Бурнаковский проезд, д. 15

²ООО «ТЕСИС»,
Россия, 127083, г. Москва, ул. Юннатов, д. 18, оф. 705

E-mail: ^a birbraer@okbm.nnov.ru, ^b andrey@tesis.com.ru

Получено 12.05.2016, после доработки — 21.12.2016.

Принято к публикации 30.12.2016.

В программном комплексе FlowVision проведено численное моделирование процесса перемешивания неизотермических потоков натриевого теплоносителя в тройнике для обоснования применимости различных подходов — URANS (Unsteady Reynolds Averaged Navier Stokers), LES (Large Eddy Simulation) и квази-DNS (Direct Numerical Simulation) — для предсказания осциллирующего характера течения в зоне смешения и получения температурных пульсаций. Одна из основных задач данной работы — выявление преимуществ и недостатков использования этих подходов.

Численное исследование пульсаций температуры, возникающих в жидкости и в стенках тройника в процессе перемешивания неизотермических потоков натриевого теплоносителя, проведено в рамках математической модели, предполагающей, что рассматриваемое течение турбулентное, плотность жидкости не зависит от давления и что между теплоносителем и стенками тройника происходит теплообмен. При моделировании турбулентного теплопереноса в рамках подхода URANS применялась модель турбулентного теплопереноса LMS.

Исследование было проведено в два этапа. На предварительном этапе были определены влияние расчетной сетки на формирование осциллирующего течения и характер температурных пульсаций в рамках указанных выше подходов к моделированию турбулентности. В результате этого исследования были выработаны критерии построения расчетных сеток для каждого из подходов и произведена оценка потребных вычислительных ресурсов.

Затем были проведены расчеты для трех режимов течения, отличающихся соотношением расходов и температур натрия во входных сечениях тройника. Для каждого режима выполнены расчеты с применением подходов URANS, LES и квази-DNS.

На заключительном этапе работы был проведен сравнительный анализ численных и экспериментальных данных. Определены и сформулированы преимущества и недостатки использования каждого из указанных подходов к моделированию процесса перемешивания неизотермических потоков натриевого теплоносителя в тройнике.

Ключевые слова: подходы URANS, LES, DNS к моделированию турбулентности, натриевый теплоноситель, неизотермические потоки, пульсации температуры

UDC: 519.6

Numerical investigations of mixing non-isothermal streams of sodium coolant in T-branch

A. A. Aksenov^{2,b}, S. V. Zhlukto², V. V. Shmelev², E. V. Shaporenko²,
S. F. Shepelev¹, S. A. Rogozhkin^{1,a}, A. N. Krylov¹

¹ Joint Stock Company “I. I. Afrikantov OKB Mechanical Engineering”,
15 Burnakovskiy proezd, Nizhny Novgorod, 603074, Russia

² LTD “TESIS”,
of. 705, 18 Unnatov st., Moscow, 127083, Russia

E-mail: ^a birbraer@okbm.nnov.ru, ^b andrey@tesis.com.ru

Received 12.05.2016, after completion — 21.12.2016.

Accepted for publication 30.12.2016.

Numerical investigation of mixing non-isothermal streams of sodium coolant in a T-branch is carried out in the FlowVision CFD software. This study is aimed at argumentation of applicability of different approaches to prediction of oscillating behavior of the flow in the mixing zone and simulation of temperature pulsations. The following approaches are considered: URANS (Unsteady Reynolds Averaged Navier Stokers), LES (Large Eddy Simulation) and quasi-DNS (Direct Numerical Simulation). One of the main tasks of the work is detection of the advantages and drawbacks of the aforementioned approaches.

Numerical investigation of temperature pulsations, arising in the liquid and T-branch walls from the mixing of non-isothermal streams of sodium coolant was carried out within a mathematical model assuming that the flow is turbulent, the fluid density does not depend on pressure, and that heat exchange proceeds between the coolant and T-branch walls. Model LMS designed for modeling turbulent heat transfer was used in the calculations within URANS approach. The model allows calculation of the Prandtl number distribution over the computational domain.

Preliminary study was dedicated to estimation of the influence of computational grid on the development of oscillating flow and character of temperature pulsation within the aforementioned approaches. The study resulted in formulation of criteria for grid generation for each approach.

Then, calculations of three flow regimes have been carried out. The regimes differ by the ratios of the sodium mass flow rates and temperatures at the T-branch inlets. Each regime was calculated with use of the URANS, LES and quasi-DNS approaches.

At the final stage of the work analytical comparison of numerical and experimental data was performed. Advantages and drawbacks of each approach to simulation of mixing non-isothermal streams of sodium coolant in the T-branch are revealed and formulated.

It is shown that the URANS approach predicts the mean temperature distribution with a reasonable accuracy. It requires essentially less computational and time resources compared to the LES and DNS approaches. The drawback of this approach is that it does not reproduce pulsations of velocity, pressure and temperature.

The LES and DNS approaches also predict the mean temperature with a reasonable accuracy. They provide oscillating solutions. The obtained amplitudes of the temperature pulsations exceed the experimental ones. The spectral power densities in the check points inside the sodium flow agree well with the experimental data. However, the expenses of the computational and time resources essentially exceed those for the URANS approach in the performed numerical experiments: 350 times for LES and 1500 times for DNS.

Keywords: URANS, LES, DNS approaches to simulation of turbulence, sodium coolant, non-isothermal streams, temperature pulsations

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2017, vol. 9, no. 1, pp. 95–110 (Russian).

1. Введение

В рамках верификации программного комплекса FlowVision были выполнены расчетные исследования смешения неизотермических потоков натриевого теплоносителя в тройнике, проведено сравнение с результатами экспериментов.

Одна из целей данных исследований — обоснование применимости подходов URANS (UnsteadyReynoldsAveragedNavierStokers), LES (LargeEddySimulation) и квази-DNS (DirectNumericalSimulation) к моделированию турбулентности для предсказания осциллирующего характера течения в зоне смешения разнотемпературных потоков натрия и выявление преимуществ и недостатков использования этих подходов.

На первом этапе исследования были выработаны критерии построения расчетных сеток для каждого из подходов. Второй этап включал в себя расчеты для трех режимов течения, отличающихся соотношением расходов и температур натрия, поступающего во входные участки тройника. На третьем этапе был проведен сравнительный анализ с экспериментальными данными.

2. Описание экспериментальной установки

Тройник представляет собой Т-образное соединение прямых труб из нержавеющей стали с внутренним диаметром 39.5 мм и толщиной стенки трубы 1.45 мм, как показано на рис. 1.

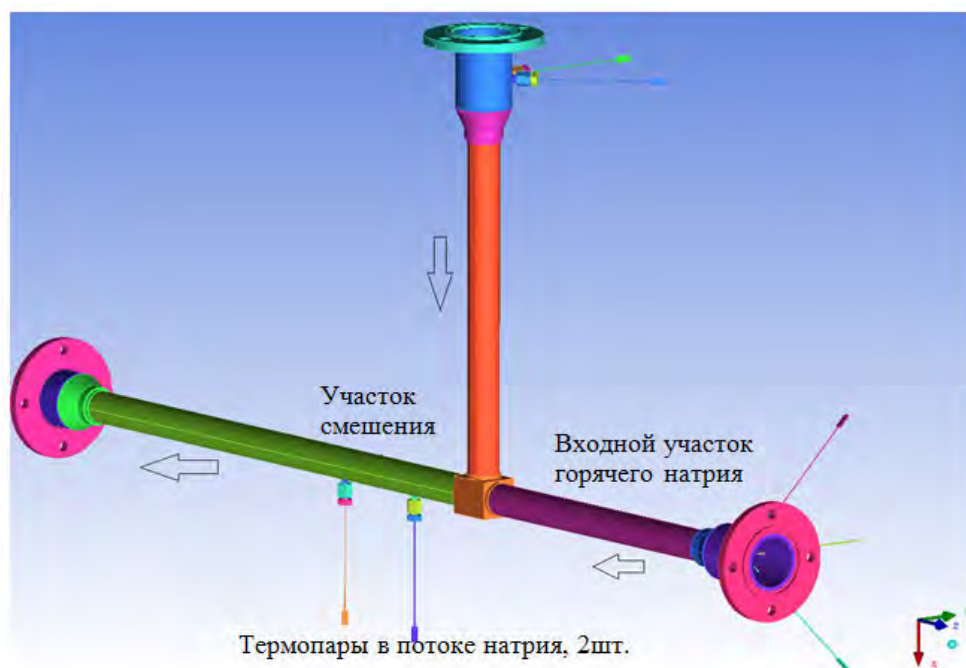


Рис. 1. Геометрическая модель тройника (цветная версия рисунка доступна в электронной версии на сайте журнала)

Тройник расположен в горизонтальной плоскости. Модель тройника соединяется с контуром через фланцевые соединения, объединенные с диффузорами, обеспечивающими переход от Ду68 к Ду40. В тройнике горячий натрий циркулирует по основной трубе, а холодный — через боковой подвод. Вход горячего и холодного натрия в тройник осуществляется через хонейкомбы «Хг» и «Хх» (размещение хонейкомба в тройнике показано на рис. 2, а, а конструкция хонейкомбов — на рис. 2, б, в).

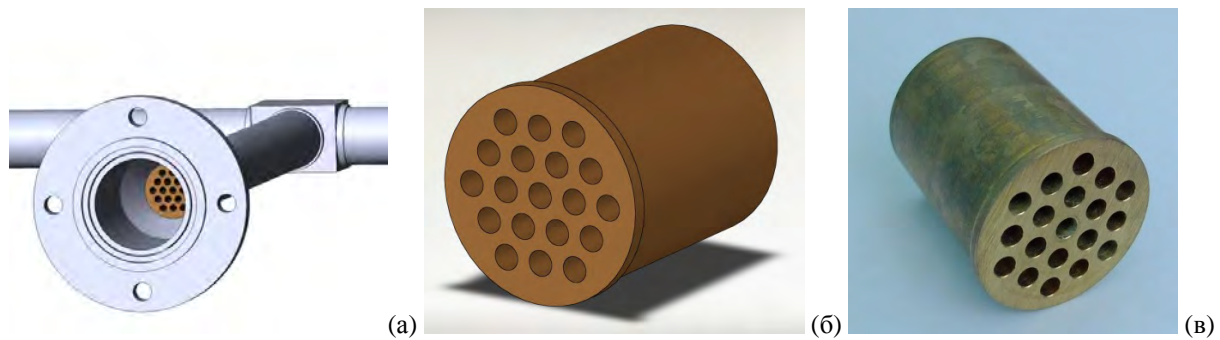


Рис. 2. Модель тройника: а) вид со стороны холодного входа (фрагмент), б, в) хонейкомбы

В целях экономии вычислительных ресурсов исходная геометрическая модель тройника была упрощена путем обрезания диффузора на выходе из тройника, как показано на рис. 3. Выход из тройника находится на расстоянии более 20 диаметров трубы от зоны слияния холодного и горячего теплоносителей; предполагается, что течение на выходе не будет оказывать влияния на течение в зоне смешения разнотемпературных потоков.

Центр используемой системы координат (СК) расположен в точке пересечения осей входных участков горячего и холодного натрия. Направление оси Ox соответствует оси входного участка холодного натрия и совпадает с направлением течения теплоносителя. Ось Oz совпадает с осью входного участка горячего натрия и участка смешения и направлена против движения теплоносителя. Ось Oy направлена перпендикулярно плоскости XOZ , как показано на рис. 1.

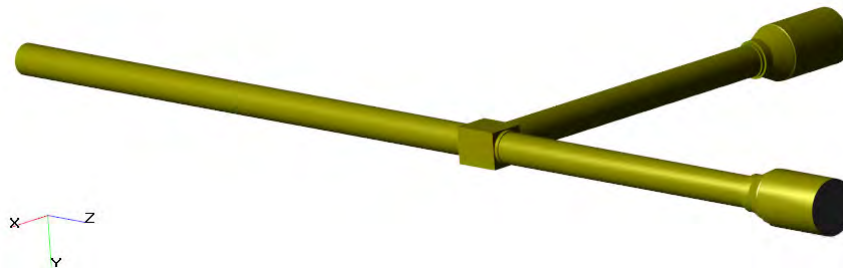


Рис. 3. Упрощенная геометрическая модель тройника

3. Математическая модель

Исследование проведено в рамках модели турбулентного течения и теплообмена несжимаемой жидкости и сопряженного теплообмена между теплоносителем и стенками тройника.

Для подхода URANS модель включала в себя нестационарные осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье–Стокса, уравнения энергии, уравнения стандартной $k-\varepsilon$ модели турбулентности [Wilcox, 1994] и уравнения модели турбулентного теплопереноса LMS [Аксенов и др., 2014]. Для учета анизотропии турбулентного теплопереноса в рамках подхода URANS задавался коэффициент объемного расширения для натрия $\beta = 0.00025 \text{ K}^{-1}$.

Для подхода LES модель включала в себя уравнения Навье–Стокса, уравнения энергии и подсеточную алгебраическую модель Смагоринского [Гарбарук и др., 2012] для вихревой вязкости, турбулентное число Прандтля $Pr_t = 0.4$.

Модель для подхода DNS включала в себя уравнения Навье–Стокса и уравнения энергии.

В качестве граничных условий во входных каналах задавались нормальная составляющая массовой скорости течения $(\rho V)|_{\text{вх}} = \frac{\rho(T_{\text{вх}}) \cdot Q_{\text{вх}} \cdot 10^{-6}}{S_{\text{вх}}}$ и температура $T_{\text{вх}}$ натрия согласно таб-

лице 1. Здесь $Q_{\text{вх}}$ — объемный расход теплоносителя, мл/с, $Q_{\text{вх}} = Q_{\text{г}}$, $T_{\text{вх}} = T_{\text{г}}$ для горячего натрия, $Q_{\text{вх}} = Q_{\text{х}}$, $T_{\text{вх}} = T_{\text{х}}$ для холодного натрия, $S_{\text{вх}}$ — площадь входного сечения, м².

Начальная степень турбулизации потока натрия (k , ε , k_{θ} , ε_{θ}) задавалась согласно следующим соотношениям:

$$k|_{\text{вх}} = \frac{3(I \cdot V)^2}{2}, \quad \varepsilon|_{\text{вх}} = \frac{C_{\mu}(k|_b)^{3/2}}{0.001}, \quad k_{\theta}|_{\text{вх}} = 0, \quad \varepsilon_{\theta}|_{\text{вх}} = 0. \quad (1)$$

Здесь $I = 0.16 \cdot (\text{Re})^{-1/8}$ — интенсивность турбулентности.

Таблица 1. Входные данные

№ режима	$Q_{\text{г}}$, мл/с	$Q_{\text{х}}$, мл/с	$T_{\text{г}}$, °C	$T_{\text{х}}$, °C
1	1040	490	207	153.4
2	556	231	222.1	126.3
3	915	830	184.9	140.8

На границах стальных труб и теплоносителя задан сопряженный теплообмен. На выходе из трубы в качестве граничного условия задавался свободный выход. На внешней границе стальных труб задан внешний теплообмен с коэффициентом $\alpha = 14.5$ и температурой окружающей среды 110 °C.

4. Контрольные параметры

В контрольных точках определялись следующие параметры: зависимость температуры от времени, зависимость скорости потока натрия от времени, средняя температура, среднеквадратичное отклонение температуры, спектральная плотность мощности, относительная погрешность расчета.

Среднее значение температуры определяется по формуле (2), а среднеквадратичное отклонение (RMS) температуры — по формуле (3) в соответствии с [ГОСТ, 2013]:

$$\langle T \rangle = \frac{\sum_{i=1}^N T_i}{N}. \quad (2)$$

Здесь $\langle T \rangle$ — среднее значение температуры, °C; T_i — значение температуры с индексом i из массива экспериментальных данных, °C; N — количество значений температуры в массиве экспериментальных данных;

$$\text{RMS}(T) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T_i - \langle T \rangle)^2}{N - 1}}. \quad (3)$$

Обработка результатов расчета для получения СПМ выполнялось на основе приведенных ниже соотношений в соответствии с [Гольденберг и др., 1985; Отнес, Эноксон, 1982].

Для последовательности измеренных за интервал времени Δt значений нормированных температур $T_{\text{norm},n}(T_{\text{norm}} = (T_n - T_c)/(T_h - T_c))$, где $n = 0, 1, \dots, N - 1$, вычисляется преобразование Фурье:

$$F_k = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N T_{\text{norm},n}, & k = 0, \\ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-1} \left(T_{\text{norm},n} \exp\left(-j \frac{2\pi}{N} nk\right) \right), & k = 1, \dots, \frac{N}{2} - 1. \end{cases} \quad (4)$$

Функция спектральной плотности мощности определяется соотношением

$$PSD_k = \begin{cases} \frac{|F_0|^2}{\Delta f}, & k=0, \\ 2 \frac{|F_k|^2}{\Delta f_k}, & k=1, \dots, \frac{N}{2}-1. \end{cases} \quad (5)$$

Здесь $\Delta f = \frac{1}{\Delta t}$, $f_k = k\Delta f$ — частота *k*-го сигнала.

Относительная погрешность вычислений по отношению к экспериментальным данным вычислялась по формуле

$$\delta = \frac{T - T_{\text{экспер}}}{T_r - T_x} \quad (6)$$

Расположение контрольных точек соответствовало расположению датчиков в эксперименте. Контрольные точки Na5_150 ($x = 0, y = 0, z = -0.15$), Na5_300 ($x = 0, y = 0, z = -0.30$) находятся в плоскости XOZ и расположены на оси участка смешения. Данные контрольные точки соответствуют положению термопар в потоке натрия (рис. 4). В этих точках контролируемые параметры являются температура и скорость теплоносителя.

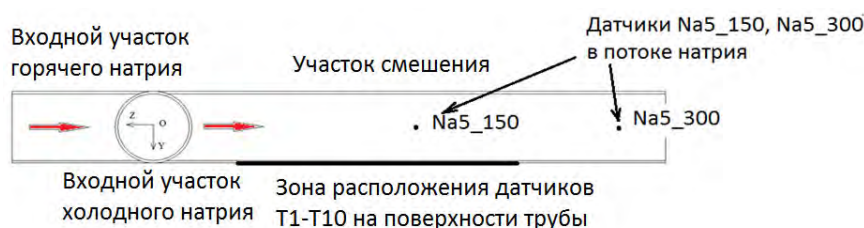


Рис. 4. Схема расположения контрольных точек в потоке натрия Na5_150, Na3_300 и на поверхности трубы T1–T10

Контрольные точки T1–T10 расположены в плоскости ZOY на внешней поверхности трубопровода участка смешения вдоль линии, как показано на рис. 4. Координаты точек представлены в таблице 2.

Таблица 2. Контрольные точки в стали, $x = 0, y = 0.02125$

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
$z, \text{ м}$	-0.058	-0.074	-0.091	-0.107	-0.123	-0.14	-0.156	-0.172	-0.189	-0.205

5. Предварительное исследование

Основная цель предварительного исследования — определение влияния расчетной сетки на формирование осциллирующего характера течения для различных подходов (RANS, LES, DNS) к моделированию турбулентности, а также влияния расчетной сетки на характер температурных пульсаций.

Для уменьшения потребных вычислительных ресурсов предварительное исследование проводилось в упрощенной постановке задачи. Упрощение касалось как геометрической, так и математической моделей задачи.

Геометрическая модель была упрощена путем выделения непосредственно зоны смешения без области стабилизации потока во входных трубах. В выходной трубе была оставлена только область смешения холодного и горячего теплоносителей. В качестве контрольной точки была выбрана точка в потоке, соответствующая контрольной точке Na5_150. Упрощенная геометрическая модель представлена на рис. 5.

В рамках упрощенной математической модели рассматривались только течение и теплообмен в натрии, без учета теплообмена между натрием и стенками трубы.

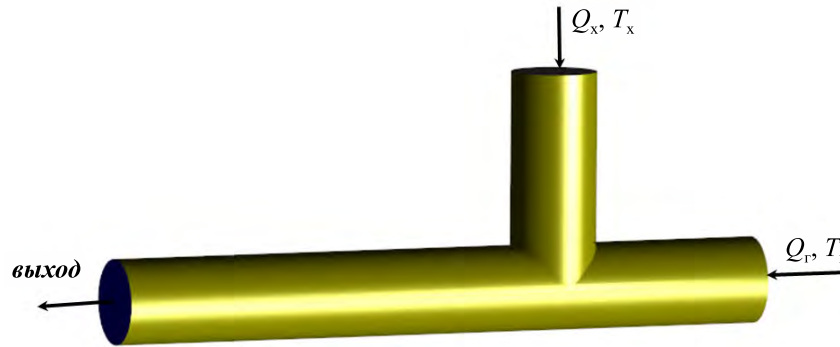


Рис. 5. Упрощенная модель тройника для проведения исследования влияния расчетной сетки на формирование осциллирующего характера течения

Граничные условия: $Q_x = 516$ мл/с, $T_x = 143.3$ °С на входе холодного теплоносителя, $Q_r = 570$ мл/с, $T_r = 187.3$ °С на входе горячего теплоносителя, свободный выход — на выходе, на стенках трубы — адиабатическая стенка.

Перед проведением расчетов была проведена оценка расчетной сетки для каждого из подходов.

При подходе URANS к моделированию задач гидродинамики необходимо минимизировать влияние схемной вязкости, возникающей в результате ошибки аппроксимации, на результаты моделирования. То есть линейный размер ячейки должен обеспечивать схемную вязкость меньше эффективной (физической + турбулентной) вязкости $\nu_{эф}$. Для пакета FlowVision, использующего, как и большинство CFD-кодов, схемы второго порядка точности, оценку ошибки аппроксимации можно представить в виде искусственной диффузии с коэффициентом диффузии D_a :

$$D_a = AV \frac{\partial^3 f / \partial x^3}{\partial^2 f / \partial x^2} h^2. \tag{7}$$

Здесь A — константа, зависящая от разностной схемы; V — характерная скорость, м/с; h — линейный размер расчетной ячейки, м; f — физическая переменная, по которой дается оценка влияния искусственной диффузии; в нашем случае f — скорость, м/с.

Условие $D_a = AV \frac{\partial^3 f / \partial x^3}{\partial^2 f / \partial x^2} h^2 < \nu_{эф}$ переписывается в следующем виде:

$$\frac{V}{d} h^2 < \nu_{эф}. \tag{8}$$

Здесь d — характерный размер задачи, в нашем случае — диаметр трубы. Из неравенства (8) получим оценку для максимального линейного размера расчетной сетки:

$$h < \sqrt{\frac{\nu_{эф} d}{V}} = d \cdot Re^{-1/2}, \quad Re = \frac{Vd}{\nu_{эф}} \text{ — число Рейнольдса.} \tag{9}$$

Около стенки, где толщину пограничного слоя можно оценить как $\delta = d / \sqrt{\text{Re}}$, размер ячейки должен удовлетворять условию

$$\frac{V}{\delta} h^2 < \nu_{\text{эф}} \text{ и } h < d \cdot \text{Re}^{-3/4}. \quad (10)$$

Турбулентная вязкость оценивается как [Левич, 1959] $\nu_t \sim V' L$. Здесь V' — пульсации скорости. Задавшись пульсациями скорости порядка 1 %, получим: $\nu_t \sim V' L$, $V'/V \sim 0.01$; для заданных в задаче параметров имеем: $h < 0.004$ м в потоке и $h < 0.0012$ м около стенки.

При моделировании в рамках подхода LES необходимо обеспечить такой размер ближайшей к стенке расчетной ячейки, который бы обеспечил условие (14):

$$y^+ = \frac{y \cdot \nu_\tau \cdot \rho}{\mu} \sim 1. \quad (11)$$

Здесь $y = h/2$ — расстояние до стенки, м; ν_τ — динамическая скорость, м/с, которая выражается как $\nu_\tau = V_{\text{cp}} \sqrt{\xi/8}$ [Кириллов, 1965], $\xi = 0.31 \cdot \text{Re}^{-0.25}$ — коэффициент трения в трубе [Михеев, Михеева, 1977].

$$y^+ = \frac{h \cdot \rho \cdot V_{\text{cp}} \sqrt{\xi/8}}{2\mu} \leq 1, \quad (12)$$

$$h \sim \frac{2\mu(T_{\text{cp}})}{\rho(T_{\text{cp}}) \cdot V_{\text{cp}} \sqrt{\xi/8}} < 4.6 \cdot 10^{-4} \text{ м}. \quad (13)$$

Для расчетов DNS необходимо обеспечить размер ячейки, чтобы число Рейнольдса в ней было не более единицы:

$$\text{Re} = \frac{\rho(T_{\text{cp}}) \cdot V_{\text{cp}} \cdot h}{\mu(T_{\text{cp}})} \sim 1, \quad (14)$$

$$h \sim \frac{\mu(T_{\text{cp}})}{\rho(T_{\text{cp}}) \cdot V_{\text{cp}}} \sim 6 \cdot 10^{-7} \text{ м}. \quad (15)$$

Исходя из приведенных оценок, численное исследование было проведено для подходов URANS, LES и квази-DNS на кубических расчетных сетках с линейным размером расчетной ячейки $h = 1.6, 0.8$; $h = 1.6, 0.8, 0.4$ мм и $h = 1.6, 0.8, 0.4, 0.2$ мм соответственно.

Для всех подходов использовалась начальная расчетная сетка с $h = 1.6$ мм. Затем применялась последовательно адаптация первого, второго и третьего уровня. В таблице 3 приведено количество расчетных ячеек задачи в зависимости от линейного размера расчетной ячейки.

Таблица 3. Количество расчетных ячеек задачи в ходе предварительного исследования

h , мм	Количество ячеек
1.6	$\approx 0.1 \cdot 10^6$
0.8	$\approx 10^6$
0.4	$\approx 7.5 \cdot 10^6$
0.2	$\approx 60 \cdot 10^6$

На рис. 6 представлены результаты исследования сходимости по сетке в виде зависимости температуры от времени и спектральной плотности мощности на четырех расчетных сетках для подхода DNS для контрольной точки Na5_150. Результаты исследования сходимости по сетке

для подхода LES представлены на рис. 7. Как для подхода LES, так и для подхода DNS, для всех расчетных сеток получен осциллирующий характер течения. Для подхода URANS решение сходится к стационарному течению. В таблице 4 приведены результаты исследования сходимости по сетке для подходов URANS, LES и DNS.

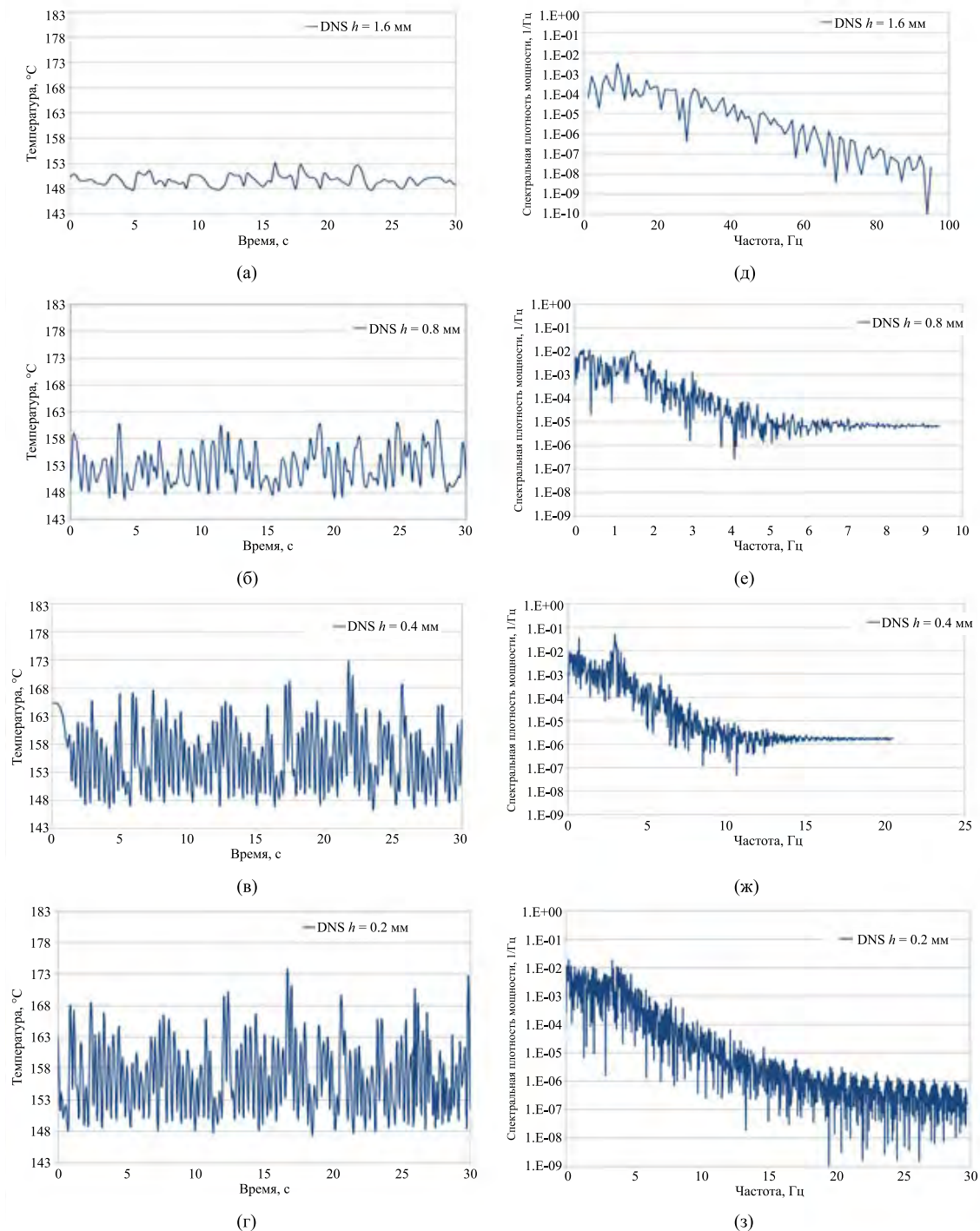


Рис. 6. Временные зависимости и спектральная плотность мощности пульсаций температуры в контрольной точке Na5_150, $z = -0.15$ м, находящейся в потоке жидкого натрия, полученные в процессе исследования сеточной сходимости по программе FlowVision для подхода DNS в модельной задаче: а, д) для кубической расчетной сетки с линейным размером $h = 1.6$ мм; б, е) $h = 0.8$ мм; в, ж) $h = 0.4$ мм; г, з) $h = 0.2$ мм

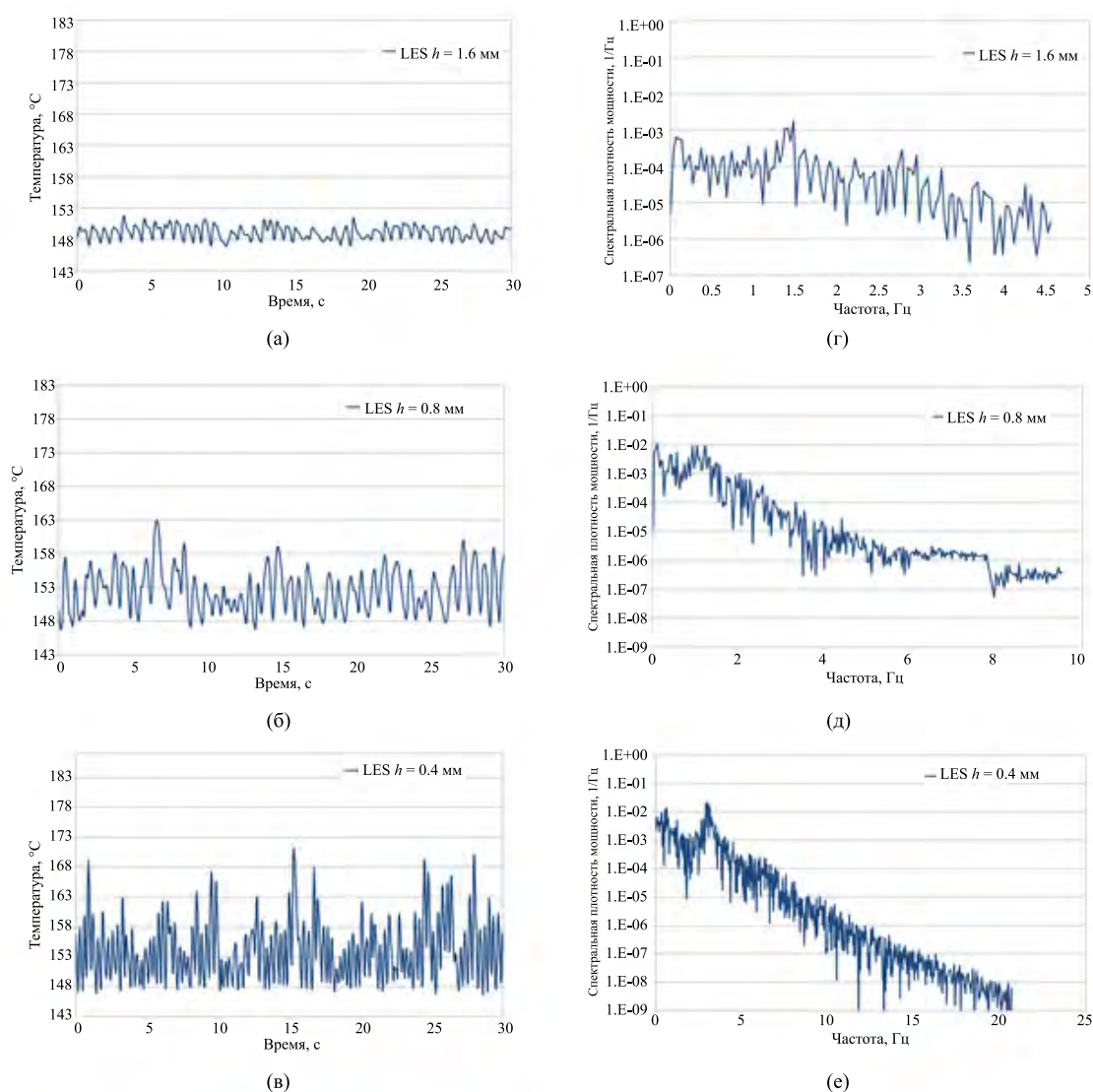


Рис. 7. Временные зависимости и спектральная плотность мощности пульсаций температуры в контрольной точке Na5_150, $z = -0.15$ м, находящейся в потоке жидкого натрия, полученные в процессе исследования сеточной сходимости по программе FlowVision для подхода LES в модельной задаче: а, г) для кубической расчетной сетки с линейным размером $h = 1.6$ мм; б, д) $h = 0.8$ мм; в, е) $h = 0.4$ мм

Таблица 4. Исследование сходимости по сетке, контрольная точка Na5_150

	h , мм	Средняя температура, °С	Несущая частота, Гц	Максимальная амплитуда, °С
URANS	1.6	149.6	—	—
URANS	0.8	152.3	—	—
URANS	0.4	153.1	—	—
LES	1.6	149.1	1.5	3.9
LES	0.8	152.4	1.3	7.9
LES	0.4	154.5	2.9	16.6
DNS	1.6	149.6	9	3.8
DNS	0.8	153.2	1.7	13.8
DNS	0.4	155.8	2.94	17.0
DNS	0.2	156.5	3.4	17.1

Из приведенных выше результатов предварительного численного исследования можно сделать следующие выводы.

Подход URANS не воспроизводит осциллирующего характера течения. Для расчетной сетки при $h = 0.8$ мм достигается сходимость по средней температуре в контрольной точке. Относительная погрешность между результатами расчетов на сетках с $h = 0.8$ мм и $h = 0.4$ мм не превышает 1.8 %.

Подход LES воспроизводит осциллирующий характер течения. Для расчетной сетки при $h = 0.4$ мм относительная погрешность по средней температуре в контрольной точке между результатами расчетов на сетках с $h = 0.8$ мм и $h = 0.4$ мм ~ 5 %. По несущей частоте и максимальной амплитуде в пульсациях температуры решения на этих сетках отличаются в ≈ 2 раза.

Подход DNS воспроизводит осциллирующий характер течения. По сделанным выше оценкам, для данной задачи полная сходимость по расчетной сетке может быть достигнута на ячейках с линейным размером ячейки $6 \cdot 10^{-7}$ мм. Для расчетной сетки 0.4 мм решение согласуется с моделированием LES по средней температуре, 155.8 и 154.5 °С, несущей частоте 2.94 и 2.9 Гц, амплитуде колебаний 17 и 16.6 °С. На расчетной сетке 0.2 мм заметно изменяется несущая частота, с 2.94 до 3.4, изменения по средней температуре и амплитуде колебаний не превышают 1.6 % и 0.6 % соответственно.

В результате предварительных оценок и исследований было принято решение проводить расчетные исследования на следующих сетках: 0.8 мм для подхода URANS, 0.4 мм — для подхода LES и 0.2 мм — для подхода DNS.

В качестве начальной расчетной сетки задавалась равномерная расчетная сетка со стороной $h = 1.6$ мм (рис. 8).

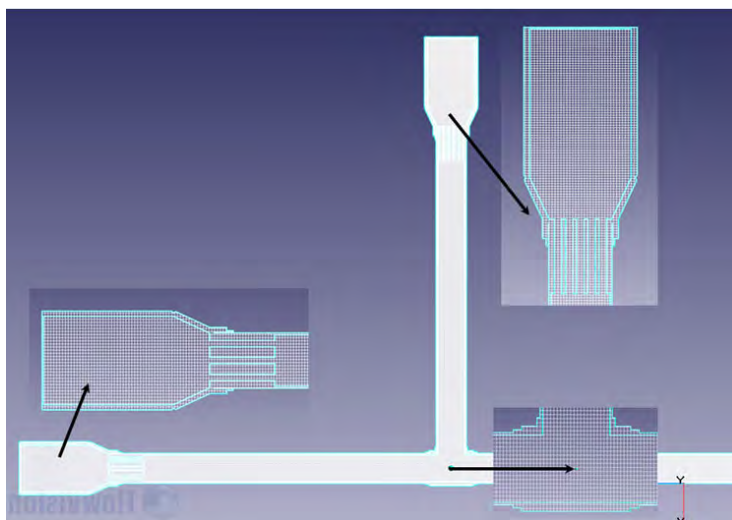


Рис. 8. Начальная сетка задачи

Затем применялась адаптация первого уровня для моделирования URANS, второго уровня — для LES. В целях экономии вычислительных ресурсов для подхода DNS применялась адаптация второго уровня по всей области и третьего уровня непосредственно в области слияния потоков и области наибольших флуктуаций температуры. Количество расчетных ячеек для каждого подхода приведено в таблице 5.

7. Результаты расчетов

В результате численного моделирования с использованием подходов LES и квази-DNS для всех трех режимов были получены осциллирующие временные зависимости температуры и скорости. При использовании подхода URANS для всех режимов было получено стационар-

ное решение. Далее приводятся результаты расчетов для первого режима течения. На рис. 9, 10 приведены временные зависимости температуры и спектральные плотности мощности пульсаций температуры для подходов LES и квази-DNS в сравнении с экспериментальными данными в контрольных точках в натрии для первого режима течения. В таблице 6 приведены средние значения температуры в этих точках для первого режима течения.

Таблица 5. Количество расчетных ячеек для проведения расчетных исследований в полной модели тройника

Подход	Размер расчетной ячейки, мм	Количество ячеек
URANS	0.8	$\approx 1.8 \cdot 10^6$
LES	0.4	$\approx 3.6 \cdot 10^7$
DNS	0.2	$\approx 7 \cdot 10^7$

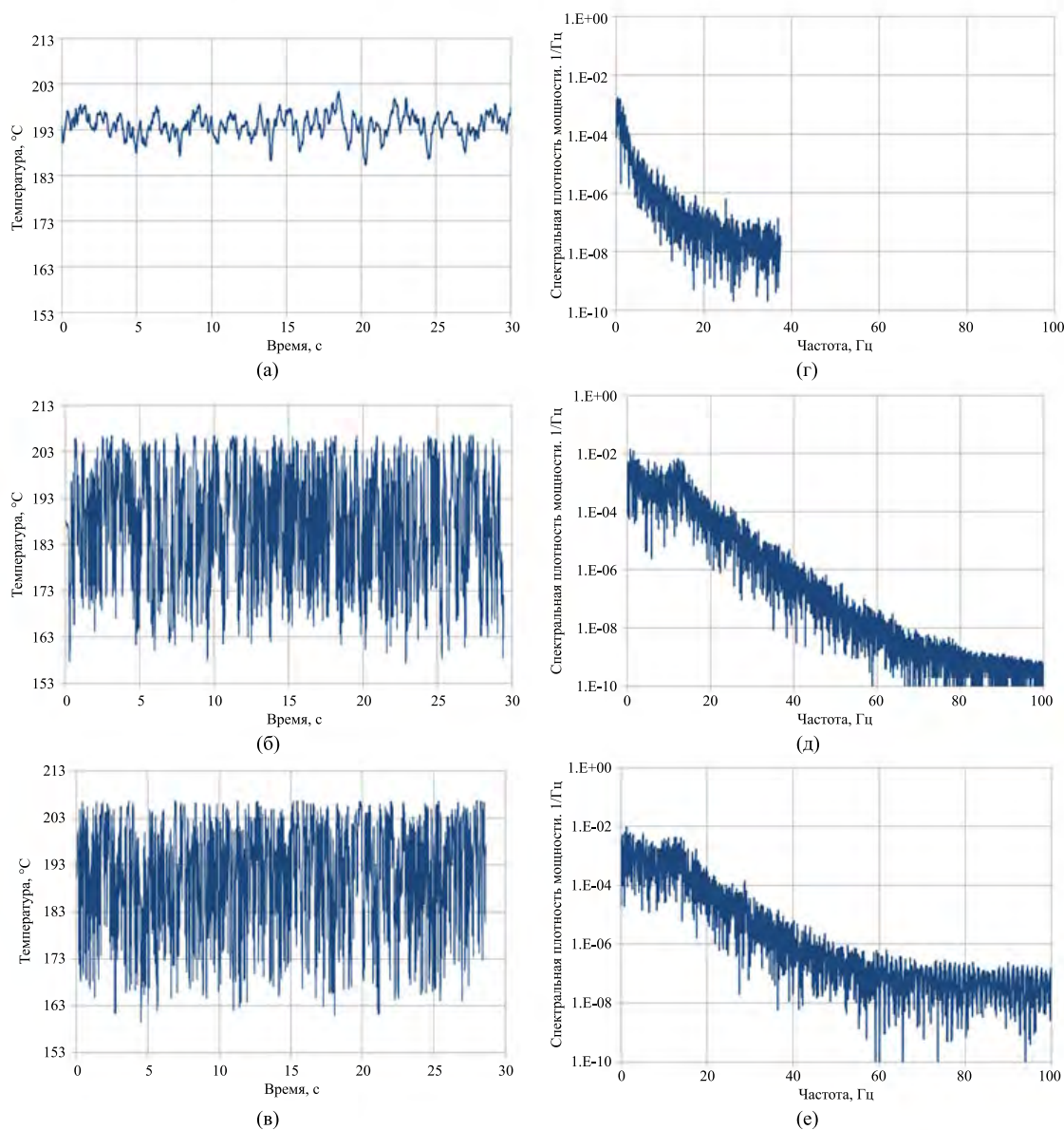


Рис. 9. Временные зависимости и спектральная плотность мощности пульсаций температуры в контрольной точке Na5_150, $z = -0.15$ м, находящейся в потоке жидкого натрия, полученные для режима 1: а, г) в эксперименте; в расчете по программе FlowVision: б, д) подход LES; в, е) подход DNS

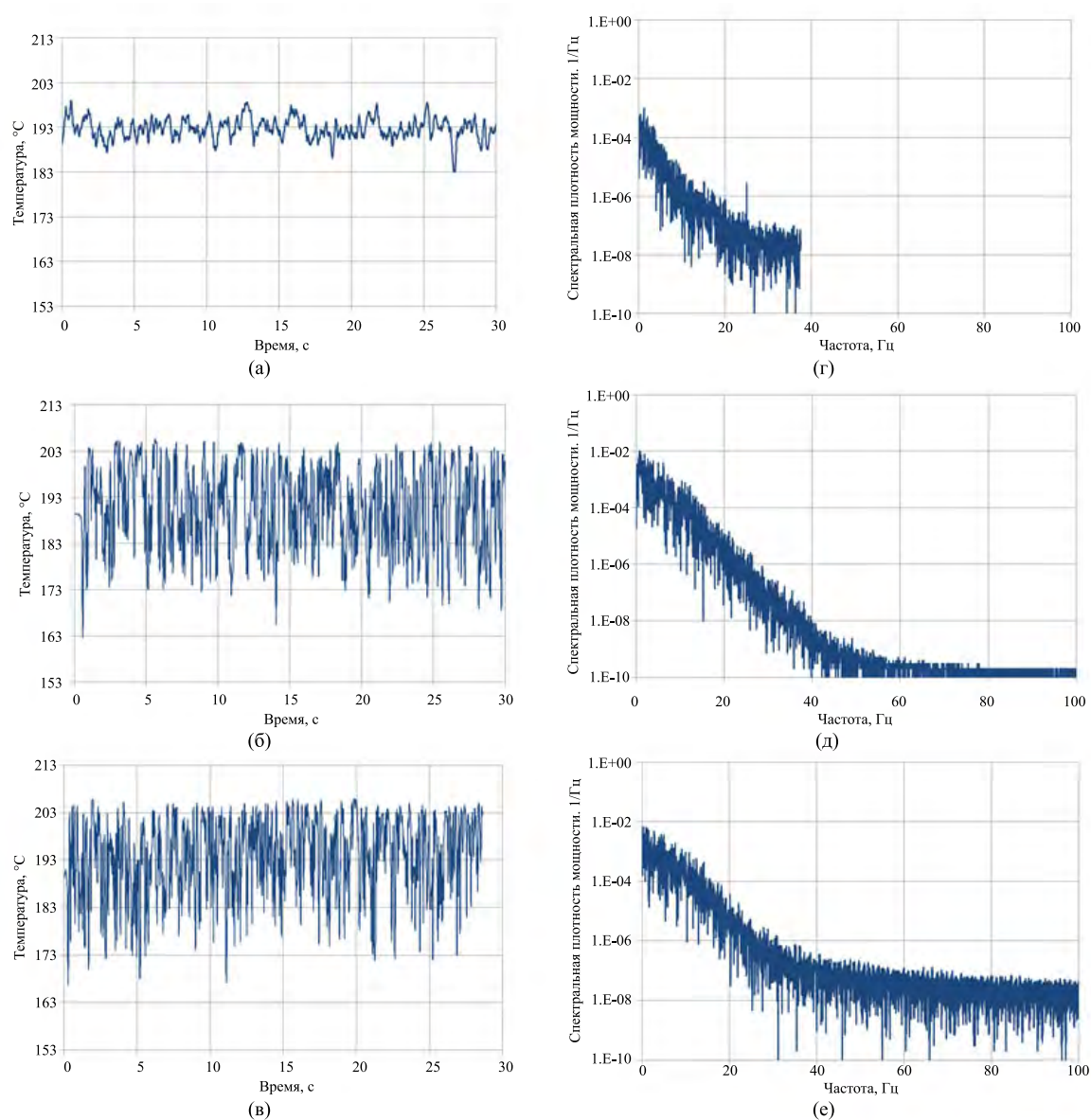


Рис. 10. Временные зависимости и спектральная плотность мощности пульсаций температуры в контрольной точке Na5_300, $z = -0.30$ м, находящейся в потоке жидкого натрия, полученные для режима 1: а, г) в эксперименте; в расчете по программе FlowVision: б, д) подход LES; в, е) подход DNS

Таблица 6. Режим 1, средняя температура в натрии

	Эксперимент	URANS	LES	DNS
Контрольная точка Na5_150, $z = -0.15$ м				
$T_{cp}, ^\circ C$	192.9	190.4	187.9	190.5
$\delta, \%$	–	4.7	9.3	4.4
RMS, $^\circ C$	2.9	–	12.3	11.2
Контрольная точка Na5_300, $z = -0.30$ м				
$T_{cp}, ^\circ C$	192.6	190.8	190.9	193.8
$\delta, \%$	–	3.3	3.2	2.2
RMS, $^\circ C$	2.9	–	8.8	8.2

Как видно из рис. 9, 10 и таблицы 6, отличие между физическим экспериментом и результатами расчетов по средней температуре в контрольной точке Na5_150 не превышает 10 %. Максимальную разницу показывает LES моделирование с погрешностью 9.3 %, URANS и DNS имеют близкие погрешности — 4.7 % и 4.4 % соответственно. Амплитуда колебаний температуры в подходах LES и DNS почти в четыре раза выше экспериментальной. Расчетные СПМ существенно отличаются от экспериментальных. В подходах LES и DNS наблюдается преобладающая частота ≈ 12 Гц, тогда как в эксперименте нет явно выраженных частот. В обоих расчетных подходах наблюдается согласование по инерционному интервалу, который заканчивается около 50 Гц. В эксперименте инерционный интервал гораздо меньше и заканчивается около 12 Гц.

Для контрольной точки Na5_300 отличие по средней температуре не превышает 3.3 % для всех подходов. Расчетные амплитуды колебаний температуры для обоих подходов приблизительно в три раза выше экспериментальных. СПМ в обоих подходах по характеру ближе к экспериментальной, чем для контрольной точки Na5_150. И в расчетах, и в эксперименте нет выраженных частот. Мощности низкочастотных пульсаций, полученные в расчетах, на порядок выше экспериментальных. Расчетный инерционный интервал шире экспериментального.

На рис. 11 приведено распределение средней температуры в контрольных точках T1–T10 на поверхности тройника для трех подходов в сравнении с экспериментальными данными. Для этих контрольных точек во всех подходах температура отличается от экспериментальной. Наибольшее отличие демонстрирует подход URANS (17 %), наименьшее — DNS (11 %). Ни один подход не показывает снижение температуры в контрольных точках T5 и T6, где достигается наибольшая разница по относительной погрешности — 17 % как для URANS, так и для LES подхода.

На рис. 12 приведено распределение температуры на поверхности тройника для подходов URANS и DNS.

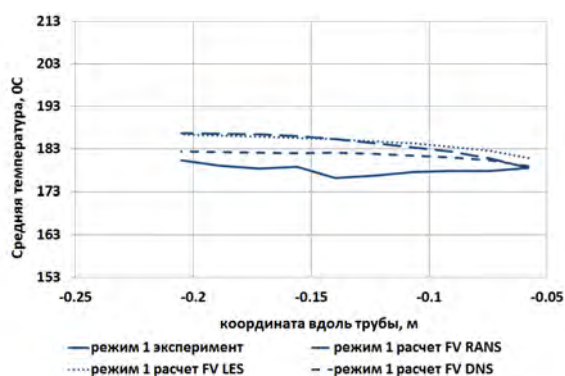


Рис. 11. Средняя температура натрия в контрольных точках T1–T10 на поверхности тройника, полученная в расчетах FV для режима 1

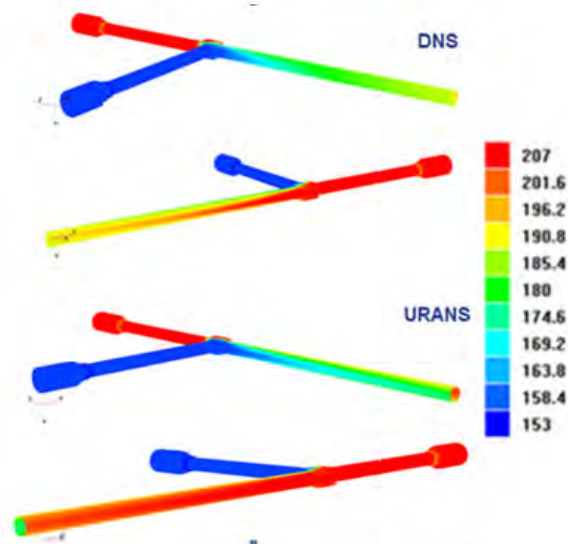


Рис. 12. Мгновенные распределения температуры на поверхности тройника, полученные в расчетах FV для режима 1 в подходах DNS и URANS (цветная версия рисунка доступна в электронной версии на сайте журнала)

Распределение температуры в плоскости симметрии тройника для подходов URANS, LES и DNS представлено на рис. 13, поле скорости в плоскости симметрии для всех режимов приводится на рис. 14.

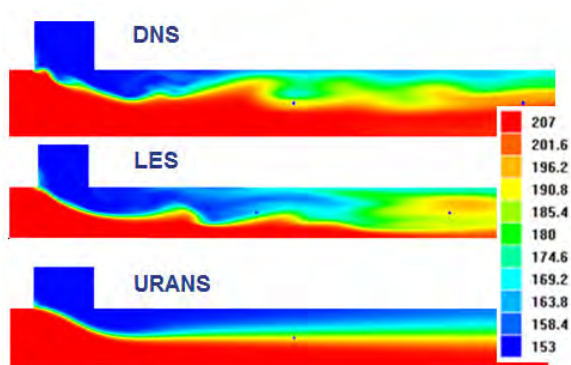


Рис. 13. Мгновенное распределение температуры в плоскости симметрии тройника, полученное в расчетах FV для режима I в различных подходах (цветная версия рисунка доступна в электронной версии на сайте журнала)

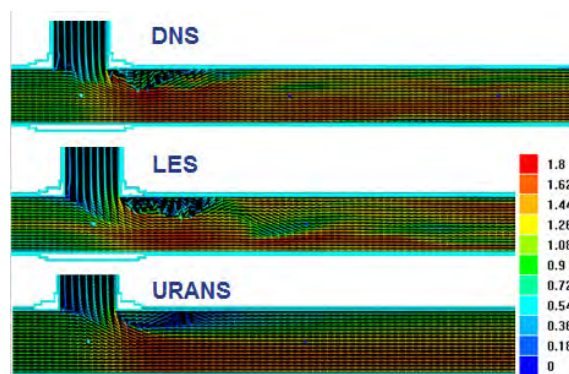


Рис. 14. Мгновенное поле скорости в плоскости симметрии тройника, полученное в расчетах FV для режима I в различных подходах (цветная версия рисунка доступна в электронной версии на сайте журнала)

В таблице 7 приведены характеристики расчетов для каждого из подходов: количество расчетных ячеек в расчете, количество используемых ядер, средний шаг интегрирования, среднее календарное время расчета одного шага интегрирования по времени, календарное время расчета.

Таблица 7. Режим I, характеристики расчетов

	URANS	LES	DNS
Количество расчетных ячеек	$1.8 \cdot 10^6$	$3.6 \cdot 10^7$	$7 \cdot 10^7$
Количество ядер	4×6	60×6	200×6
Средний шаг интегрирования, с	$1.5 \cdot 10^{-2}$	$4.3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$
Среднее время расчета шага по времени, с	25	260	300
Моделируемый интервал времени, с	30	30	30
Календарное время расчета, сут	<1	21	27

Заключение

Проведенные с разными подходами расчеты течения неизотермического натриевого теплоносителя в тройнике показали следующее:

- подход URANS воспроизводит средние значения температур с удовлетворительной погрешностью; данный подход использует при этом гораздо меньше, по сравнению с LES и DNS, как вычислительных, так и временных ресурсов для проведения расчета; недостатком указанного подхода является невозможность воспроизведения осциллирующего характера течения теплоносителя и температуры;
- подходы LES и DNS, также как и подход URANS, воспроизводят средние значения температур в потоке с удовлетворительной погрешностью; при этом оба подхода показывают осциллирующее решение; амплитуды колебаний температуры, полученные в расчетах, превышают экспериментальные; спектральные плотности мощности в контрольных точках в потоке натрия удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными; недостатком указанных подходов являются существенные затраты вычислительных и временных ресурсов, в 350 и 1500 раз превышающие затраты подхода URANS соответственно.

Список литературы (References)

- Гарбарук А. В., Стрелец М. Х., Шур М. Л.* Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений. — СПб: Издательство Политехнического университета, 2012. — 88 с.
Garbaruk A. V., Strelets M. H., Shur M. L. Modelirovanie turbulentnosti v raschyotah slozhnyh techenij [Turbulence simulation in calculations of complex flows]. — St. Petersburg: Publishing house of Polytechnical University, 2012. — 88 p. (in Russian).
- Гольденберг Л. М., Матюшкин Б. Д., Поляк М. Н.* Цифровая обработка сигналов: Справочник. — М.: Радио и связь, 1985. — 312 с.
Goldenberg L. M., Matyushkin B. D., Polyak M. N. Cifrovaya obrabotka signalov: Spravochnik [Digital signal processing: A handbook]. — Moscow: Radio and Sviaz, 1985. — 312 p. (in Russian).
- ГОСТ Р 8.736-2011. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. — Введ. 12.12.2011. — М.: Стандартиформ, 2013. — 19 с.
GOST R 8.736-2011. Metody obrabotki rezul'tatov izmereniy. Osnovnyje polozhenija. [State standard R 8.736-2011. Methods for proceeding results of measurements. Framework. — Introduced 12.12.2011. — Moscow: Standartinform, 2013. — 19 p. (in Russian).
- Кириллов В. М.* Гидродинамика и теплофизика потоков. — М.: Наука, 1965. — 111 с.
Kirillov V. M. Hidrodinamika i teplofizika potokov [Hydrodynamics and thermal physics flows]. — Moscow: Science, 1965. — 111 p. (in Russian).
- Левич В. Г.* Физико-химическая гидродинамика. Изд. 2-е, дополненное и переработанное. — М.: ГИФМЛ, 1959. — 700 с.
Levich V. G. Fiziko-himicheskaya gidrodinamika. Izd. 2-e, dopolnennoe i pererabotannoe. — Moscow: GIFML, 1959. — 700 p. (in Russian). *Levich V. G.* Physico-Chemical Hydrodynamics. — Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice-Hall, 1962 (in English).
- Михеев М. А., Михеева И. М.* Основы теплопередачи. — М.: Энергия, 1977. — 343 с.
Miheev M. A., Miheeva I. M. Osnovy teploperedachi [Fundamentals of heat transfer]. — Moscow: Energija, 1977. — 343 p. (in Russian).
- Отнес Р., Эноксон Л.* Прикладной анализ временных рядов. Основные методы. — М.: Мир, 1982. — 432 с.
Otnes R., Enochson L. Prikladnoj analiz vremennyh ryadov. Osnovnye metody.— Moscow: Mir, 1982. — 432 p. (in Russian). Original English edition: *Otnes R. K., Enochson L.* Applied Series Analysis, Volume I: Basic Techniques. — New York: Wiley-Interscience, 1978.
- Рогожкин С. А., Аксенов А. А., Жлуктов С. В., Осипов С. Л., Сазонова М. Л., Фадеев И. Д., Шепелев С. Ф., Шмелев В. В.* Разработка модели турбулентного теплопереноса для жидкометаллического натриевого теплоносителя и ее верификация // Вычислительная механика сплошных сред. — 2014. — Т. 7, № 3. — С. 306–316.
Rogozhkin S. A., Aksenov A. A., Zhluktov S. V., Osipov S. L., Sazonjva M. L., Fadeev I. D., Shepelev S. F., Shmelev V. V. Razrabotka modeli turbulentnogo teploperenosa dlya zhidkometalicheskogo natrievogo teplonositya i ee verifikaciya [Development and verification of turbulent heat transport model for sodium-based liquid metal coolants] // Vychislitel'naya mekhanika sploshnyh sred [Computational continuum mechanics]. — 2014. — Vol. 7, no. 3. — P. 306–316 (in Russian).
- Wilcox D. C.* Turbulence modeling for CFD. — DCW Industries Inc., 1993. — 460 p.