

LES-МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В РЕГУЛЯРНОЙ ЯЧЕЙКЕ ТВС С ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ СВИНЦОВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Ширяев Д.В. (НИУ «МЭИ», Москва, Россия)

Введение

Создание реактора 4-го поколения на быстрых нейтронах со свинцовым жидкометаллическим теплоносителем является одним из наиболее перспективных направлений в сегодняшней мировой ядерной энергетике. В России в г. Северск ведется активное строительство опытно-демонстрационного реактора БРЕСТ-ОД-300 с естественной безопасностью и работающего в замкнутом ядерном топливном цикле. БР-1200 является же первым проектом коммерческого реактора большой мощности со свинцовым теплоносителем, который эволюционно продолжает концепцию БРЕСТ-ОД-300 [1].

В настоящее время расчеты реакторного оборудования невозможны без использования средств вычислительной гидродинамики, так называемого CFD-моделирования, которое в основном базируется на осредненных по Рейнольдсу уравнениях Навье-Стокса (метод RANS). Это обусловлено тем, что моделирование крупных вихрей LES и прямое численное моделирование DNS требует больших временных затрат и вычислительных ресурсов. RANS приближение, хорошо согласующееся с эмпирическими формулами по интегральным характеристикам, не всегда дает точное совпадение по локальным параметрам, особенно в области отрывных течений. Нахождение локальных характеристик требуется в том числе для определения коэффициентов обмена в одномерных кодах и для обоснования безопасности реакторных установок. Поэтому вихреразрешающие методики, такие как LES, необходимы для проверки RANS моделей в отсутствии экспериментальных данных [2].

В работе представлено сравнение результатов численного анализа течения свинцового теплоносителя в области расположения дистанционирующей решетки (ДР) сотового типа регулярной ячейки тепловыделяющей сборки с применением RANS метода и вихреразрешающего метода LES в CFD-коде Star-CCM+. Для метода RANS использовалась двухслойная модель турбулентности k-ε realizable, вихреразрешающий метод LES проводился с использованием модели подсеточной вязкости WALE.

1. Постановка задачи расчетного исследования

Расчетная область представляет собой регулярный трехмерный фрагмент тепловыделяющей сборки, включающий фрагменты оболочек твэлов, участок дистанционирующей решетки, расположенной по центру, и жидкометаллический свинцовый теплоноситель. Длина расчетной области составляет $L=0,36$ м.

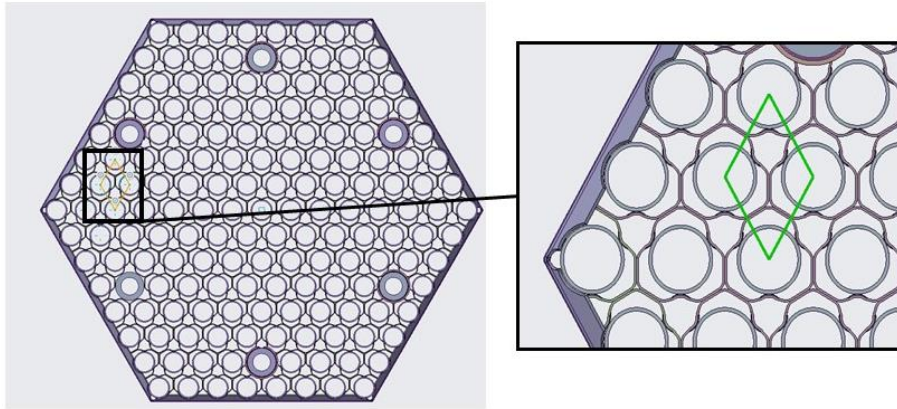


Рис. 1. Поперечное сечение ТВС с исследуемой областью

Для рассматриваемого течения свинцового теплоносителя записываются следующие уравнения сохранения, с учетом, что теплофизические свойства принимаются переменными от температуры:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} &= 0 \\ \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho u_j u_i - \mu \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) &= - \frac{\partial P}{\partial x_i} \quad i = 1..3 \\ \frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i T) &= \frac{\partial}{\partial x_i} (\lambda \nabla T) \end{aligned} \quad (1)$$

где ρ – плотность (кг/м³), t – время (с), u_i – проекция вектора скорости (м/с),
 μ – динамическая вязкость (Па·с), P – давление (Па), T – температура (К),
 λ – теплопроводность (Вт/м·К), x – координата (м).

Для LES расчета необходимы начальные поля, за которые принимались результаты RANS моделирования. На торцах расчетной области ставились периодические граничные условия с фиксированным значением температуры теплоносителя на входе $T_{вх}=753,15$ К, задавался массовый расход теплоносителя $G=2,045$ кг/с, тепловой поток на внутренней поверхности оболочек твэлов $q=1,5$ МВт/м², оболочки твэлов и дистанционирующая решетка моделировались как твердое тело, для которых справедливы условия непроницаемости для свинцового теплоносителя $U=0$ м/с. На боковых параллельных плоскостях ставились условия периодической симметрии.

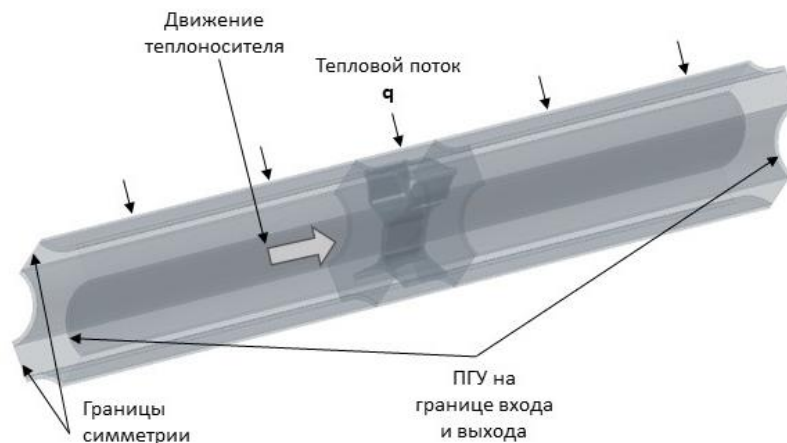


Рис. 2. Граничные условия

Также в местах контакта жидкости и твердого тела было учтено термическое сопротивление оксидной пленки. Модель толщины оксидной пленки [3] включала в себя набор эмпирических констант для используемых конструкционных материалов и являлась только функцией температуры и касательных напряжений на стенке. Теплопроводность слоя оксидной пленки принималась равной $\lambda_{оп}=3$ Вт/м·К.

$$h(T, \tau_w) = \frac{C_s(T)}{J(\tau_w)} P^n(T) \exp\left(\frac{C_t}{T}\right) \quad (2)$$

где h – толщина оксидной пленки (м), C_s – проницаемость слоя шпинели (кг/м³с), J – поток кислорода (кг/м²с), P^n, C_t – эмпирические константы для стали, τ_w – касательные напряжения на стенке (Па).

Расчет проводился в нестационарной постановке, с условием для числа Куранта $Co \leq 1$ шаг по времени составил $1,5 \cdot 10^{-5}$ с. Число Рейнольдса $Re=149763$ соответствует развитому турбулентному течению. Всего было посчитано 13 пролетов вдоль расчетной области, время расчета которых составило порядка 3 месяцев на задействованных 512 ядрах.

2. Сеточная модель

Для расчета турбулентного течения свинцового теплоносителя использовалась неструктурированная расчетная сетка из полиэдральных элементов в ядре потока со сгущением призматического слоя у твердых стенок. Твердотельные элементы состоят также из полиэдральных ячеек. Общее количество контрольных объемов составило 162 млн., 84 млн. приходится на центральный регион свинцового теплоносителя, в котором располагается дистанционирующая решетка. Эта область отрывных течений представляет наибольший интерес для моделирования с применением вихреразрешающих методик так как она вносит основной вклад в турбулизацию потока. Безразмерная толщина ячеек у стенки $y^+ \sim 1$.

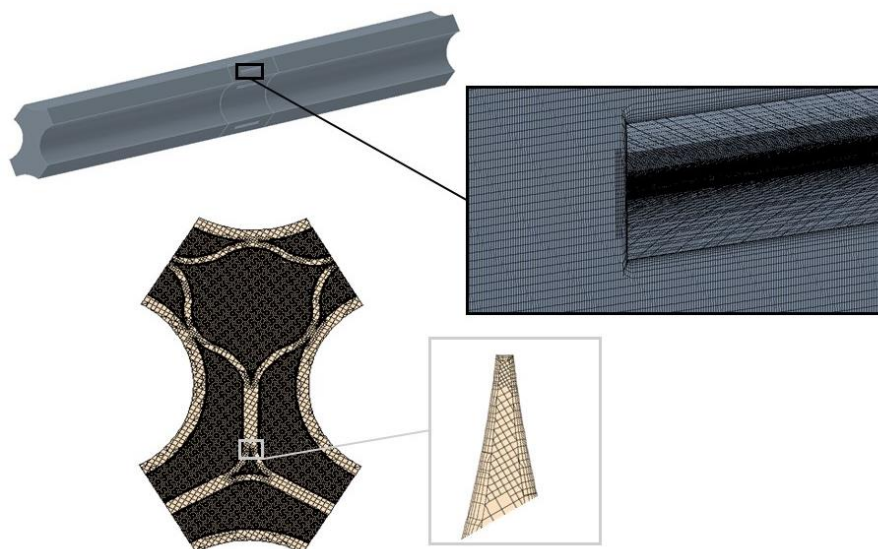


Рис. 3. Фрагменты сеточной модели

3. Результаты численного моделирования

В результате проведения расчета получены напорно-расходные характеристики и характеристики теплообмена свинцового теплоносителя в регулярной ячейке ТВС для RANS и LES приближений. На рисунке 4 представлены распределения скорости и температуры в области расположения дистанционирующей решетки.

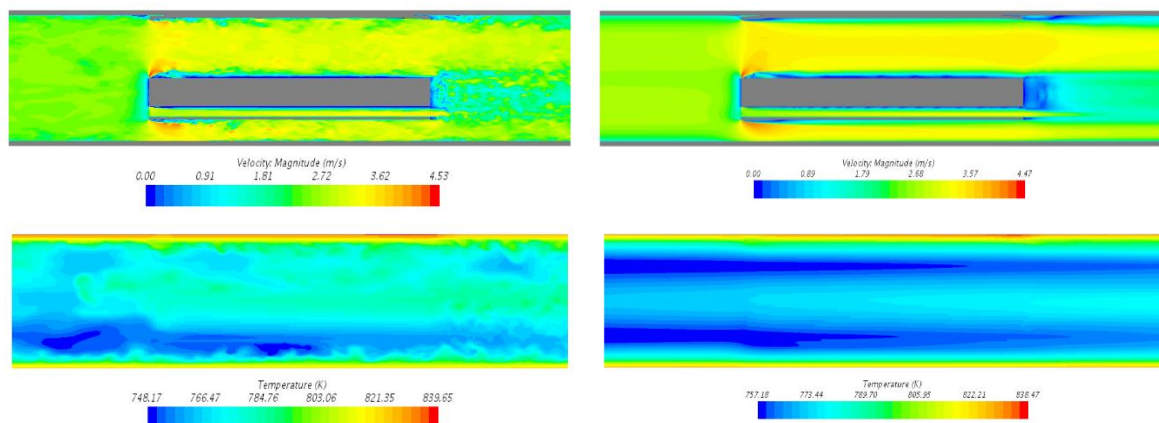


Рис. 4. Поле скорости и температуры в продольном сечении (слева – LES; справа – RANS)

Перепад давлений определялся как разность давлений между входом и выходом. На рисунках 5, 7, 8 пунктирными линиями отмечены границы ДР. Коэффициент гидравлического сопротивления (КГС) ДР оценивался по соотношению:

$$\xi = \frac{2\Delta P}{\rho u^2} \quad (3)$$

Для сравнения с теоретической зависимостью использовалась формула для решеток сотового типа [4]:

$$\xi_{\text{теор}} = \frac{1 - K_{\epsilon}}{2K_{\epsilon}^2} + \left(\frac{1}{K_{\epsilon}} - 1\right)^2 - 0.036 + \frac{3400}{K_{\epsilon}^{1.5} \text{Re}} + \left(1.74 - 2 \lg \left(\frac{3.5 \cdot 10^{-5}}{d_{\Gamma}}\right)\right)^{-2} \cdot \frac{h}{d_{\Gamma}} \cdot \frac{1}{K_{\epsilon}^2} \quad (4)$$

где K_{ϵ} – относительное проходное сечение решетки (коэффициент затеснения), h – ширина решетки, d_{Γ} – гидравлический диаметр решетки, Re – число Рейнольдса в области расположения ДР.

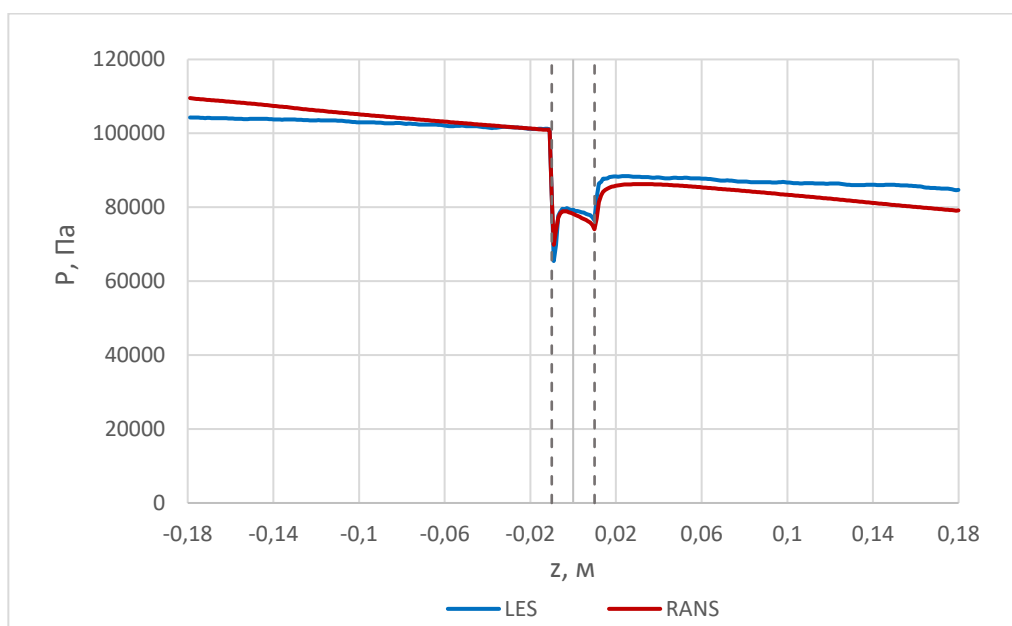


Рис. 5. Распределение давления в продольном направлении

Таблица 1

Значения гидродинамических характеристик

Параметр	LES	RANS
Перепад давления в расчетной области, Па	19632	30429
Коэффициент гидравлического сопротивления в расчетной области	0,657	1,018
Падение давления за счет ДР, Па	5875	4128
Коэффициент гидравлического сопротивления ДР	0,197	0,138
Теоретическое значение коэффициента гидравлического сопротивления ДР	0,210	
Относительная отклонение КГС, %	6,2	34,2

Наибольшее отклонение по давлению между LES и RANS решениями в области расположения дистанционирующей решетки наблюдается на ее входе и достигает 6,6 %, для гладкого участка расчетной области наибольшее отклонение составляет 5,9 %. На рисунке 6 представлены мгновенные поля скоростей в поперечных сечениях для двух моделей.

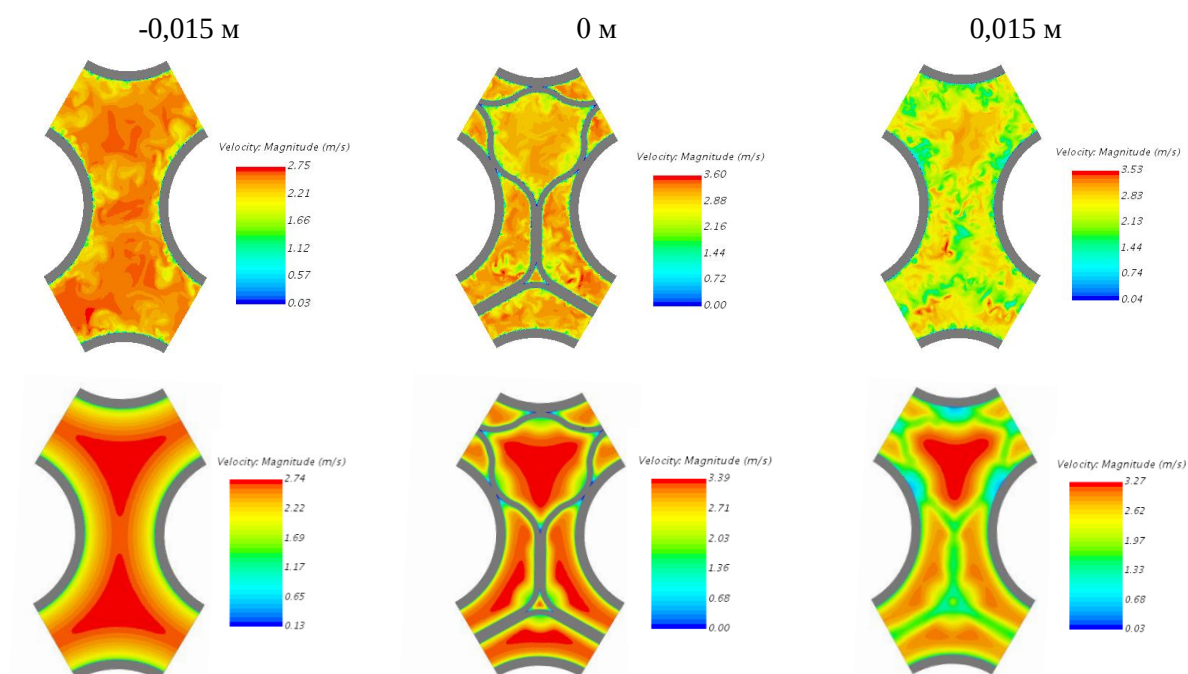


Рис. 6. Распределение мгновенной скорости в поперечном сечении с координатой z (сверху – LES; снизу – RANS)

Коэффициент теплоотдачи между внешней поверхностью оболочек твэлов и потоком свинцового теплоносителя определяется по формуле:

$$\alpha = \frac{q}{T_c - T_{\text{ж}}} \quad (5)$$

Температура стенки оценивалась как средняя температура стали на поверхности оболочки твэлов, за температуру жидкости принимается средняя температура свинцового теплоносителя в поперечном сечении. На рисунке 7 показано распределение коэффициента теплоотдачи по длине расчетной области.

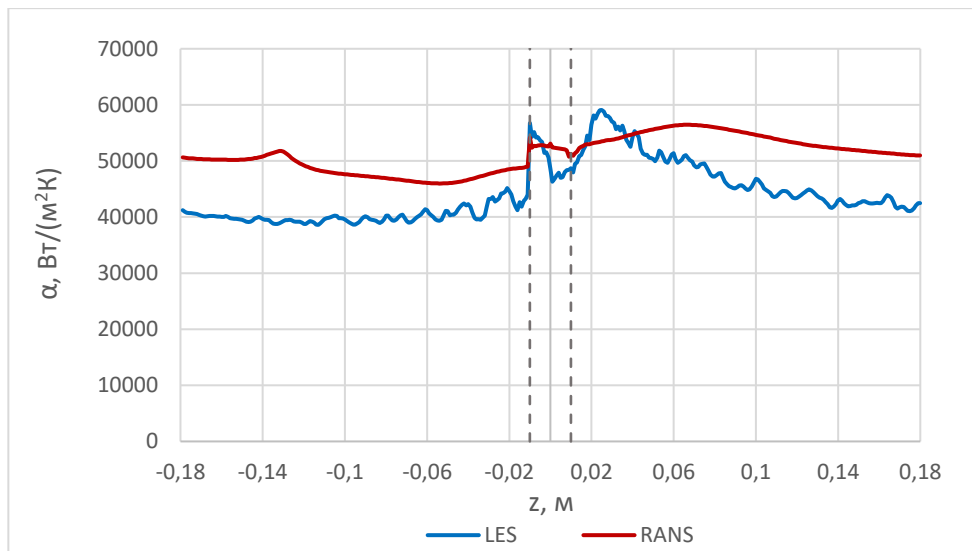


Рис. 7. Распределение коэффициента теплоотдачи в продольном направлении

Число Нуссельта определено по формуле:

$$Nu = \frac{\alpha d_\Gamma}{\lambda} \quad (6)$$

Для сравнения с теоретической зависимостью использовалась следующая формула [5]:

$$Nu_{\text{теор}} = 7,55x - 20x^{-13} + 0,041x^{-2}Pe^{0,56+0,19x} \quad (7)$$

$$x = s/d$$

где s – шаг решетки, d – внешний диаметр твэла, Pe – число Пекле.

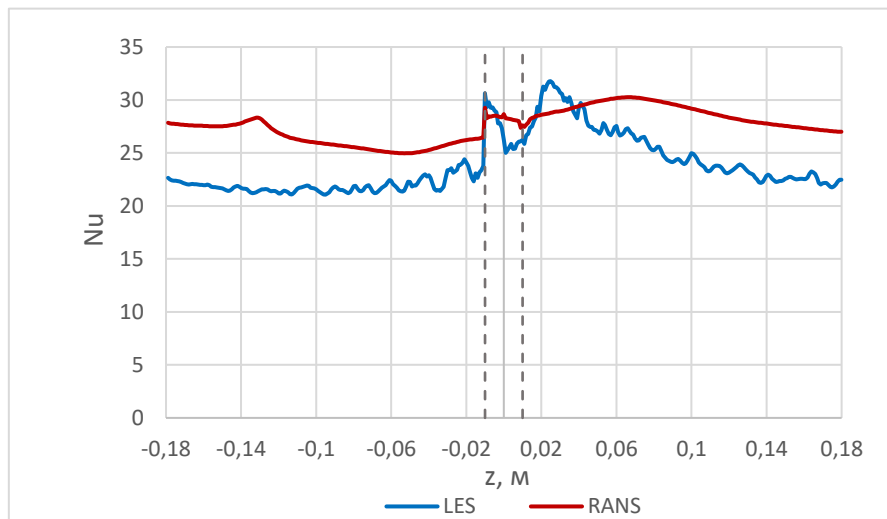


Рис. 8. Распределение числа Нуссельта в продольном направлении

Как следовало бы и ожидать, дистанционирующая решетка турбулизует поток, что приводит к увеличению коэффициента теплоотдачи и числа Нуссельта.

Таблица 2

Значения характеристик теплообмена

Параметр	LES	RANS
Коэффициент теплоотдачи, Вт/м²К	44168,9	51177,4
Число Нуссельта	23,8	27,6
Теоретическое значение числа Нуссельта	22,9	
Относительная отклонение Nu, %	3,9	20,5

Наибольшее отклонение по числу Нуссельта Nu между моделированием крупных вихрей и использованием модели турбулентности k-ε realizable в области расположения дистанционирующей решетки наблюдается на ее центре симметрии и составляет 13,1%, для гладкого участка расчетной области наибольшее отклонение достигает 33%. На рисунке 9 представлены мгновенные поля температур в поперечных сечениях для двух моделей.

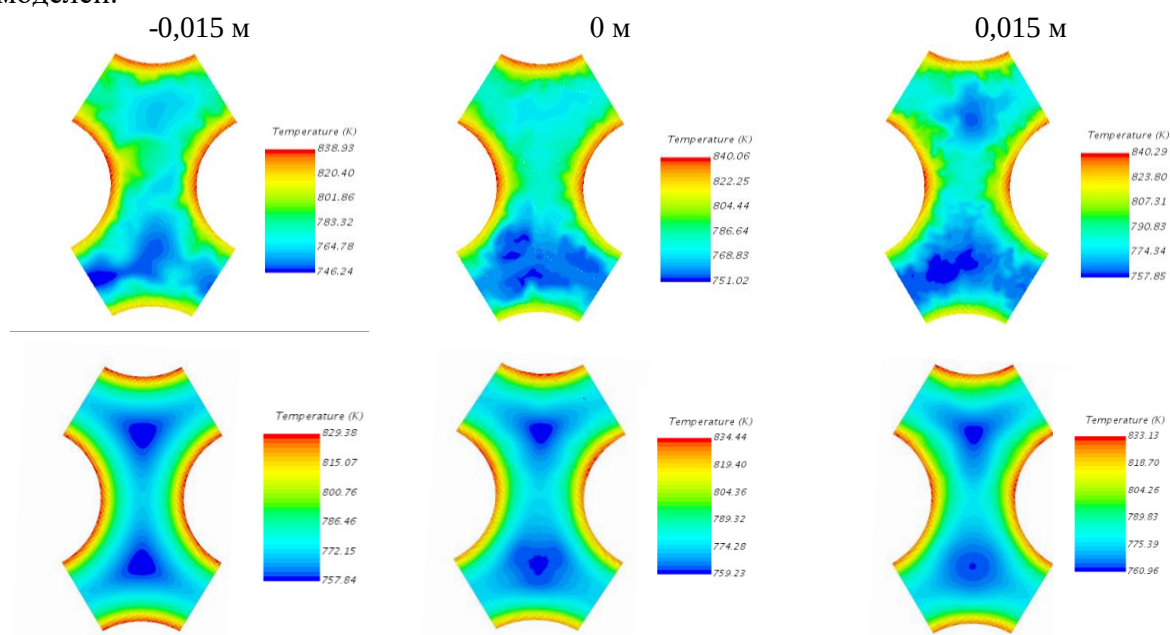


Рис. 9. Распределение мгновенной температуры в поперечном сечении с координатой z (сверху – LES; снизу – RANS).

Кинетическая энергия турбулентности в RANS приближении рассчитывается по дополнительному уравнению, отвечающему за ее перенос, и алгоритмам, включенным в модель турбулентности k-ε.

Для LES метода значения кинетической энергии турбулентности вычисляются по следующему соотношению:

$$k = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 (u_i')^2 \quad (8)$$

$$u_i' = u_i - \bar{u}_i, \quad i = 1..3$$

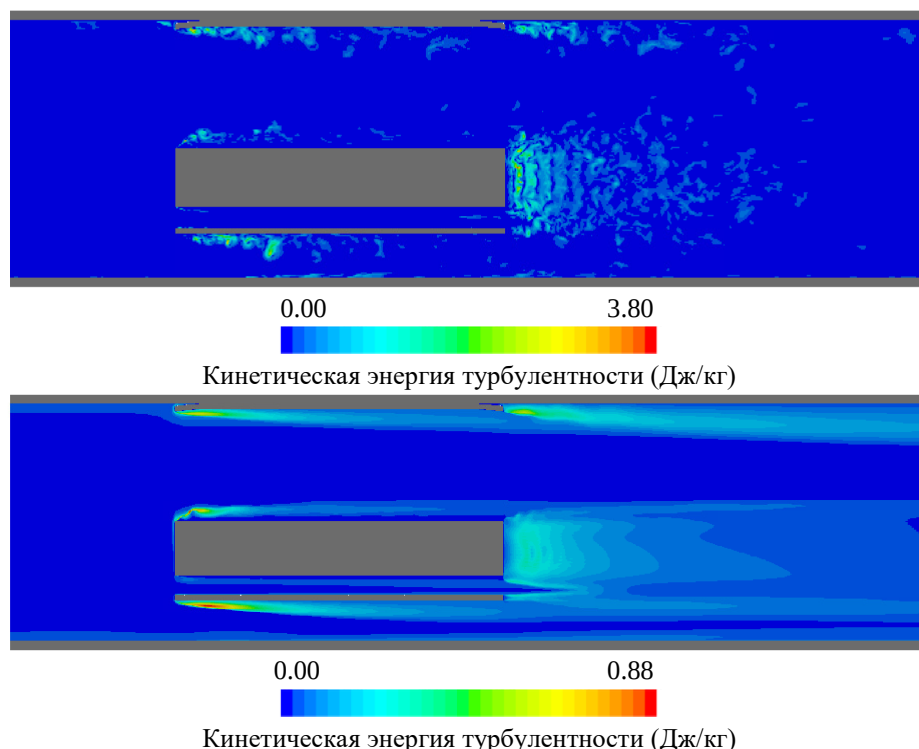


Рис. 10. Распределение кинетической энергии турбулентности в продольном сечении (сверху – LES; снизу – RANS)

Как видно из приведенных выше изображений, наибольшее различие кинетической энергии турбулентности в LES и RANS приближениях наблюдается в области за дистанционирующей решеткой, где находятся крупномасштабные вихревые отрывные структуры. Осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса не разрешают данную область, поэтому их применение для подобного рода течений дает невысокую локальную точность и удовлетворительное совпадение с вихреразрешающими методиками [6].

На рисунке 11 приведен энергетический спектр турбулентных пульсаций скорости в точке за дистанционирующей решеткой на оси симметрии. Инерционный интервал спектра имеет наклон близкий к Колмогоровскому закону $-5/3$, что свидетельствует о полном разрешении крупных вихрей и реализации каскадного переноса энергии турбулентности.

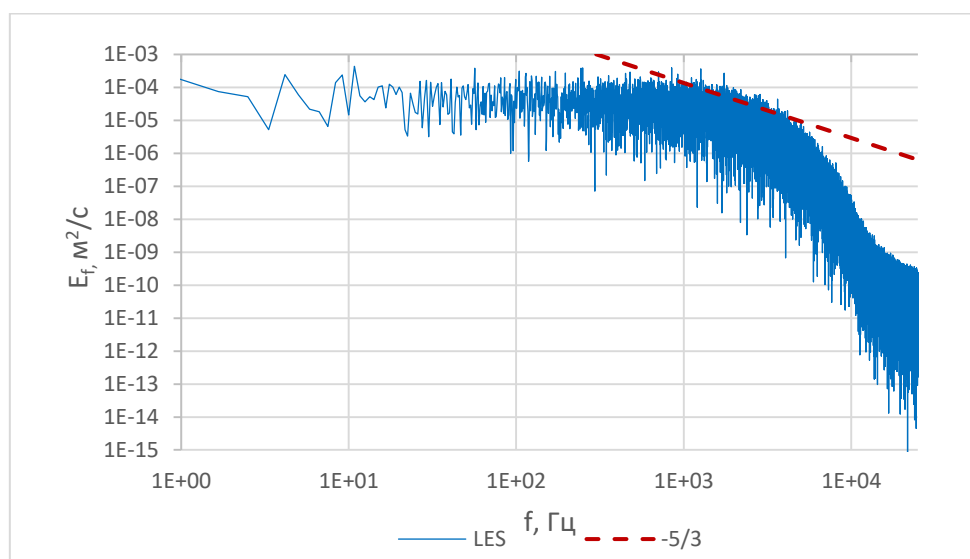


Рис. 11. Энергетический спектр турбулентных пульсаций скорости

С использованием Q-критерия можно идентифицировать множественные вихревые структуры по векторному полю скоростей. На рисунке 12 показаны поверхности постоянного уровня Q-критерия, раскрашенные значением вектора скорости, для центрального региона в месте расположения дистанционирующей решетки.

$$Q = \frac{1}{2}(\Omega_{ij}\Omega_{ij} - S_{ij}S_{ij})$$

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)$$
(9)

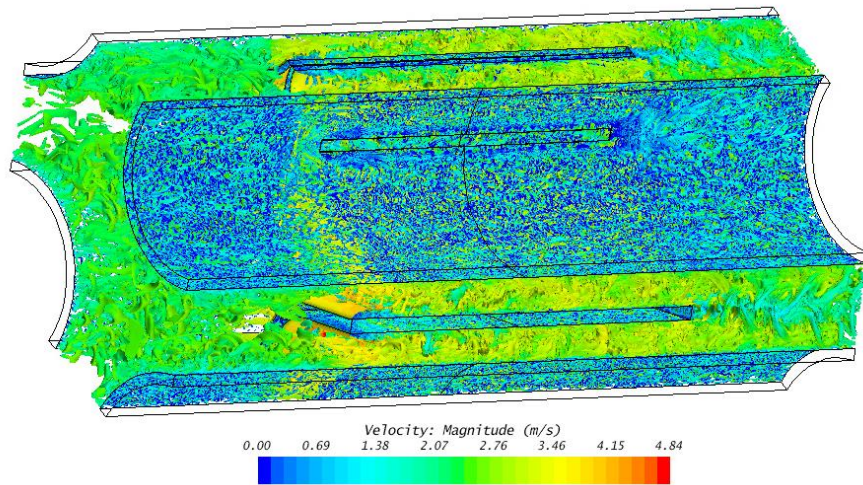


Рис. 12. Q-критерий вектора скорости (модель LES)

Заключение

В данной работе были представлены результаты LES-моделирования турбулентного течения свинцового жидкометаллического теплоносителя в регулярной ячейке ТВС для числа Рейнольдса порядка 149 тысяч. Продемонстрировано хорошее согласие с эмпирическими формулами по интегральным характеристикам течения: погрешность 6,2% по гидродинамике, 3,9% по теплообмену. Приведено распределение локальных параметров по длине расчетной области для RANS и LES приближений, которые демонстрируют, что в области расположения дистанционирующей решетки и за ней (область крупномасштабных отрывных вихревых структур) осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса дают похожие результаты по гидродинамике, при этом завышая параметры по теплообмену, значение моделируемой кинетической энергии турбулентности занижены в 4 раза по сравнению с LES методом. Стоит отметить, что в настоящей работе также была учтена модель термического сопротивления слоя оксидной пленки в местах контакта свинцового теплоносителя и твердотельных элементов (фрагменты ТВЭЛов и ДР), что гарантирует более точное определение локальных характеристик. Построен энергетический спектр турбулентных пульсаций скорости в области расположения ДР, иллюстрирующий наклон инерционного интервала близкий к Колмогоровскому закону $-5/3$, что указывает на состоятельность данного LES расчета.

Список литературы

1. Габараев Б.А. Атомная энергетика XXI века: учеб. пособие / Габараев Б.А., Свиридов В.Г., Смирнов Ю.Б., Черепнин Ю.С., Издательство МЭИ, 2021.
2. Menter F.R. Best Practice: Scale-Resolving Simulations in ANSYS CFD / ANSYS Germany GmbH, 2012, 70 p.
3. Sergeenko K.M., Afremov D.A., Fomichev D.V., Yurmanov E.V., Varseev E.A. Development of a model for the protective oxide film formation on the HLHC reactor primary circuit surfaces and its integration into CFD codes / Innovative designs and technologies of nuclear power. 4 International scientific and technical conference 2016, 2 p.
4. Методические указания и рекомендации по теплогидравлическому расчету активных зон быстрых реакторов. РТМ 1604.008-88. ФЭИ. 1988.
5. Кириллов П.Л. и др. Справочник по теплогидравлическим расчетам в атомной энергетике. Том 1 / Под ред. П.Л. Кириллова. М.: ИздАТ, 2010. 776 с.
6. Гарбарук А.В., Стрелец М.Х., Шур М.Л. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений. Учебное пособие / Санкт-Петербург: Издательство Политехнического университета, 2012.