УДК 532.542.1

ПРЯМОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРИФЕРИЙНОЙ И ВНУТРЕННЕЙ КОНФИГУРАЦИЙ МОДЕЛЬНОЙ СБОРКИ ТВЭЛОВ

© 2023 **В. А. Иващенко**[1,2a], **П. Д. Лобанов**[1], **Н. И. Яворский**[1], **М. П. Токарев**[1,2], **Р. И. Мулляджанов**[1,2]

[1] *Институт теплофизики СО РАН,*
просп. Акад. Лаврентьева, 1, г. Новосибирск 630090, Россия
[2] *Новосибирский государственный университет,*
ул. Пирогова, 1, г. Новосибирск 630090, Россия

E-mail: ivashchenko@itp.nsc.ru

Поступила в редакцию 18.08.2022 г.; после доработки 18.08.2022 г.;
принята к публикации 29.09.2022 г.

В связи с активным развитием атомной энергетики в мире и в России все большее внимание уделяется вопросам энергоэффективности и безопасности ядерных реакторов. Несмотря на тот факт, что большинство работающих на сегодняшний день реакторов уже очень хорошо изучены, ряд гидродинамических вопросов, связанных с течением теплоносителя вдоль тепловыделяющих элементов, все ещё остаются открытыми. В частности, в данной работе рассматривается эквивалентность течения в периферийной и внутренних областях тепловыделяющей сборки.

Ключевые слова: прямое численное моделирование, гидродинамика, тепловыделяющая сборка.

DOI: 10.33048/SIBJIM.2023.26.207

ВВЕДЕНИЕ

Атомная энергия на сегодняшний день играет важную роль в производстве электроэнергии по всему миру, при этом по оценкам Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) мировые мощности атомной энергетики могут увеличиться вдвое к 2050 году [1]. В России, по данным концерна «Росэнергоатома», в 2022 году доля атомной энергии составляет около 20% от всей вырабатываемой электроэнергии в стране. В то же время абсолютное большинство ядерных реакторов в мире является гетерогенными. Это означает, что ядерное горючее в них конструктивно отделяется от теплоносителя и находится в так называемых тепловыделяющих элементах (ТВЭЛах). Каждый такой элемент состоит из сердечника, в котором находится делящееся вещество, и оболочки.

ТВЭЛы собираются в тепловыделяющую сборку (ТВС), представляющую собой пучок стержней, которая помещается в активной зоне реактора. Производительность реактора зависит от достижения равномерного распределения температуры теплоносителя внутри ТВС. Важное значение в равномерном распределении температуры теплоносителя играет турбулентная структура течения, формирующегося при обтекании пучков ТВЭлов, в частности в межтвэльных каналах. Исследованию течения в межтвэльном канале посвящено множество работ, из которых известно, что на межканальный обмен значительное влияние оказывают

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 22-19-00587). Разработка вычислительного кода выполнена в рамках госзадания Институт теплофизики СО РАН.

вихревые структуры, формирующиеся при обтекании пучка ТВЭЛов [2]. Пространственные и временные масштабы данных вихревых структур находятся в зависимости от плотности упаковки ТВС, определяющей ширину межтвэльного зазора. Внутри ТВС выделяют две формы межтвэльного канала, относящиеся к внутренним и периферийным ячейкам (см. рис. 1). Внутренние ячейки образуются между рядом стоящими ТВЭЛами. Периферийные образуются между рядом ТВЭЛов и плоской стенкой чехла ТВС. В связи с простотой проведения экспериментов большинство исследований структуры турбулентного течения проведено в периферийных ячейках. Однако различие в геометрии межтвэльных каналов внутренней и периферийной ячейки может сказываться на структуре турбулентного потока. Таким образом, для ряда задач при исследовании тепломассообмена необходимы обоснования использования данных, полученных в периферийных ячейках, для верификации результатов внутренних ячеек. В данной работе при помощи метода прямого численного моделирования (DNS, от англ. Direct Numerical Simulation) проводится исследование влияния формы геометрии межтвэльных каналов, имитирующей внутреннюю и периферийную ячейку ТВС, на структуру турбулентного потока.

Стоит отметить, что с помощью DNS уже исследовались внутренние конфигурации подобных модельных сборок для различных чисел Рейнольдса [3], но в данной работе упор делается именно на сравнении течения с периферийной областью.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На рис. 1 показаны геометрические модели для расчёта двух типов ТВЭЛов: шести внутренних и трёх периферийных. Диаметр и шаг расположения ТВЭЛов в обоих случаях одинаковые.

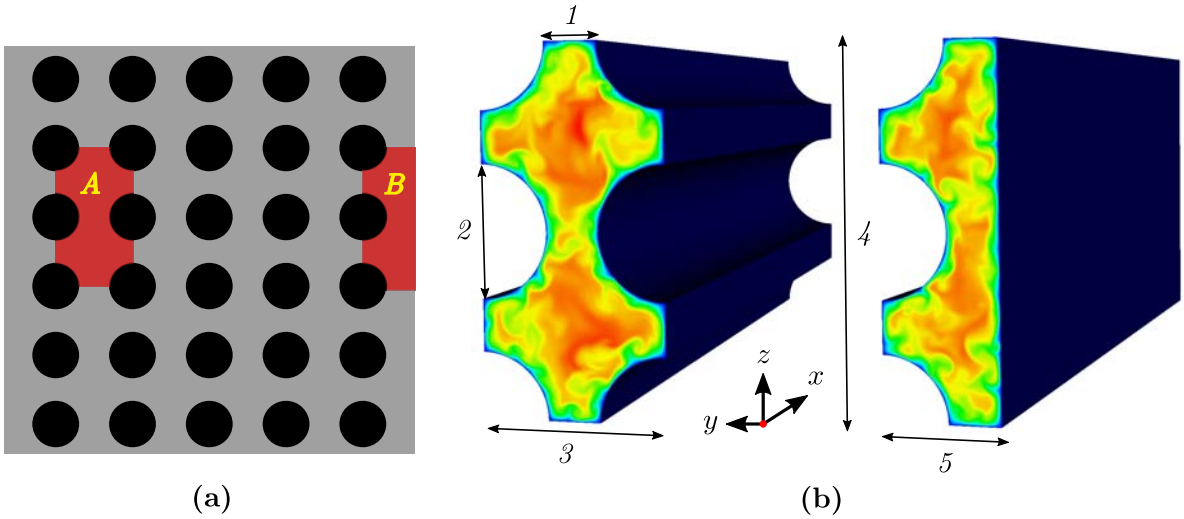

Рис. 1. Модель тепловыделяющей сборки:
(a) чёрным цветом показаны ТВЭЛы, серым – теплоноситель;
область типа A — внутренняя, типа B — периферийная;
(b) геометрические размеры двух рассматриваемых типов сборок:
слева внутренней: *1* — 4 мм, *2* — диаметр 10 мм, *3* — 14 мм,
справа периферийной: *4* — 28 мм, *5* — 9 мм

В дальнейшем условимся обозначать продольное, горизонтальное и вертикальное направления как (x, y, z), соответственно. ТВЭЛы представляют собой цилиндры радиуса 5 мм с вертикальным и горизонтальным зазорами по 4 мм между собой. Размер в продольном направлении составляет 140 мм, так что продольные когерентные вихревые структуры целиком умещаются в рассматриваемой области. В дальнейшем все результаты приводятся в безразмерном

виде, где координаты нормированы на высоту модели ($H = 28$ мм), а скорость на среднерасходную скорость U_b.

1.1. Основные уравнения

В задаче рассматривается течение жидкости при фиксированном числе Рейнольдса $\mathrm{Re} = 13000$, построенном по гидравлическому диаметру и среднерасходной скорости. Динамика течения полностью описывается уравнениями Навье — Стокса в несжимаемой постановке:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\mathrm{Re}} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}, \tag{1}$$

где u_i — i-я компонента вектора скорости ($i = 1, 2, 3$), x_j — j-я координата, $\tau_{ij} = \dfrac{u_i}{x_j} + \dfrac{u_j}{x_i}$ обозначает тензор вязких напряжений. Все величины обезразмерены на характерные значения, $\mathrm{Re} = U_b D_h / \nu$ обозначает число Рейнольдса, построенное по среднерасходной скорости и гидравлическому диаметру.

Используется два типа граничных условий: стенка и периодическое направление. На стенках используется условие прилипания для поля скорости ($u_i = 0$), а также отсутствие поперечного градиента давления ($\dfrac{dp}{dn} = 0$). В продольном направлении используются периодические граничные условия для моделирования достаточно длинной ТВС.

1.2. Вычислительный код и методы дискретизации

Для численного решения уравнений (1) используется открытый вычислительный код Nek5000, разработанный Полом Фишером и др. [4]. Валидация численных алгоритмов была проведена нами ранее на примере различных задач гидродинамики [5–7]. В его основе лежит метод спектральных элементов (SEM, от англ. Spectral Element Method), по принципу работы схожий с широко известным методом конечных объёмов, но в котором решение и данные представлены в виде разложения по многочленам N-го порядка в каждом из E деформируемых гексагональных элементов [8]. Обычно N варьируется от 8 до 16, так как при использовании меньшего значения N не используются преимущества SEM, а большие значения использовать дорого с вычислительной точки зрения. В данной работе $N = 10$. SEM отличается малой величиной численной дисперсии и диссипации, что является важным при расчёте эволюции гидродинамических неустойчивостей, а также высоких числах Рейнольдса. Спектральная точность означает экспоненциальное уменьшение ошибки с ростом количества вычислительных узлов. Дискретизация по времени происходит при помощи формулы «дифференцирования назад» третьего порядка точности. В рамках пространственной дискретизации в каждом из E элементов переменные задачи раскладываются по базису ψ_i, состоящему из интерполяционных полиномов Лагранжа: $\psi_i(x) = \prod\limits_{j \neq i} \dfrac{x - \xi_j}{\xi_i - \xi_j}$, где ξ_i — точки, являющиеся корнями уравнения $(1 - \xi^2) \dfrac{d}{d\xi} P_N(\xi) = 0$, в котором P_N — полиномы Лежандра порядка N. Иными словами, ξ_i определяют положение точек сетки внутри спектрального элемента. Более подробно алгоритмы дискретизации и решения уравнений в коде Nek5000 ранее были описаны в [9]. Вычислительная сетка состоит из порядка 40 млн. узлов для внутренней и 18 млн. узлов для периферийной конфигураций (см. рис. 2). Дополнительно была проверена сеточная сходимость для уверенности в достоверности получаемых данных. Также была произведена оценка отношения наименьшего размера вихрей (колмогоровского масштаба) $\eta_k = (\nu^3/\epsilon)^{1/4}$ к шагу сетки Δ; здесь ν — кинематическая вязкость, ϵ — скорость диссипации. Минимальный шаг сетки оказался сопоставим с колмогоровским масштабом $\Delta_{\min} \approx \eta_k$, а максимальный шаг сетки превысил его всего лишь в три раза $\Delta_{\min} \approx 3\eta_k$, что является хорошим показателем качества вычислительной сетки.

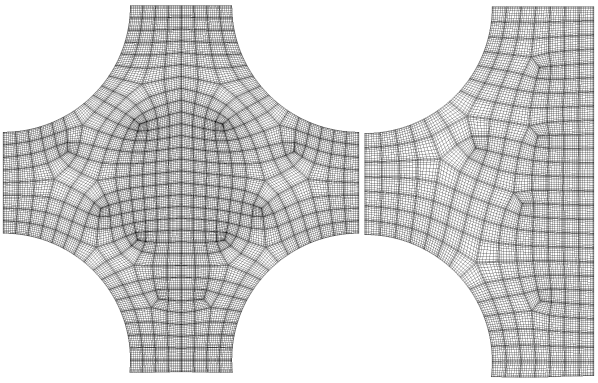

Рис. 2. Пример вычислительной сетки для поперечного сечения верхней половины геометрии

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 3 показано сравнение спектров турбулентной кинетической энергии продольной компоненты скорости $E_x(fH/U_b)$ в центральных точках обоих конфигураций (отмечены на рисунке). Турбулентная кинетическая энергия получается с помощью процедуры быстрого преобразования Фурье (FFT, от англ. Fast Fourier Transform): $E_x = \left|FFT\left(u_x'\right)^2\right|$, где $u_x' = u_x - \overline{u_x}$ — мгновенные пульсации продольной скорости, а $\overline{u_x}$ — осреднённое по времени поле продольной скорости. В качестве аргумента используется безразмерная частота fH/U_b.

Стоит отметить, что в спектрах присутствуют несколько пиков, соответствующих выделенным частотам. Наличие выделенных частот в потоке соответствует поперечным колебаниям скорости в зазоре, которые связаны с развитием вихревых структур. Несмотря на то, что в обоих случаях наблюдаются близкие безразмерные частоты, в спектрах уровень кинетической турбулентной энергии выше в случае периферийной конфигурации. При этом на рис. 3 пунктирными линиями также показаны горизонтальное и вертикальное сечения, в которых проводилось сравнение профилей средней продольной скорости и ненулевых компонент тензора напряжений Рейнольдса, показанное на рис. 4.

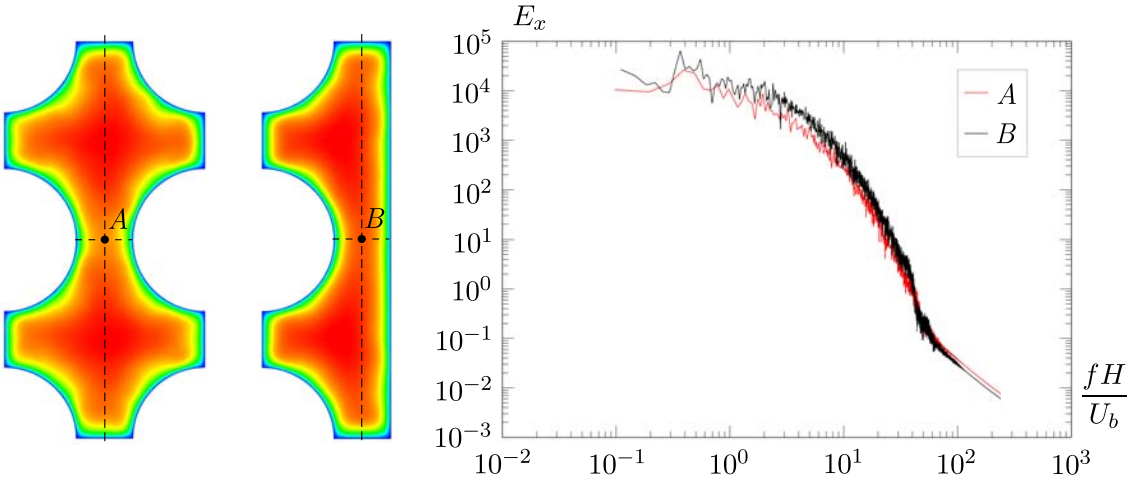

Рис. 3. Спектры турбулентной кинетической энергии для двух конфигураций. Пунктирными линиями показаны сечения, в которых сравниваются средние профили скорости и пульсаций на рис. 4

На рис. 4(a) и 4(b) приведён профиль продольной скорости вдоль горизонтального и вертикального сечений соответственно. Горизонтальная координата нормирована на ширину меж-

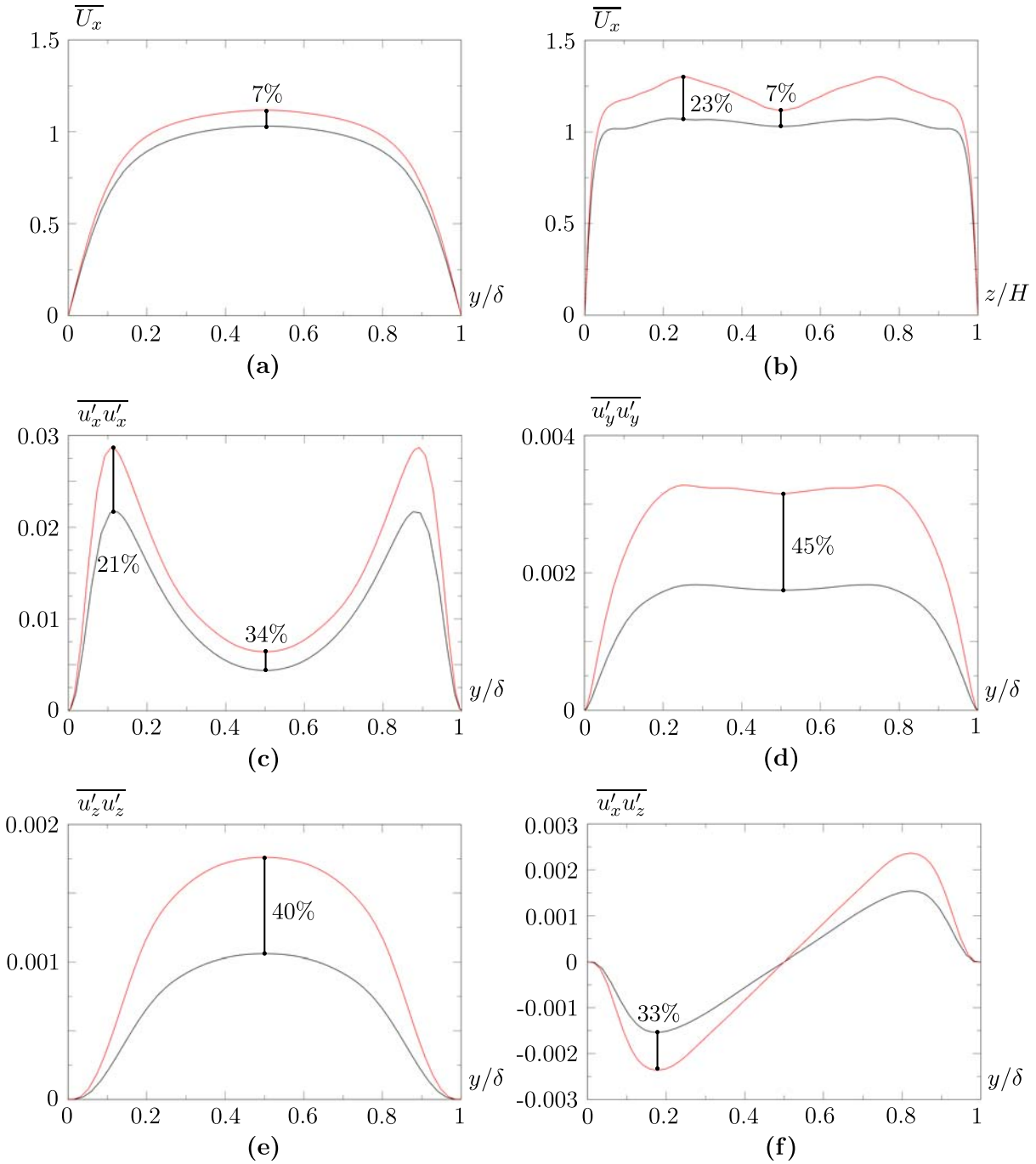

Рис. 4. Профили ненулевых компонент тензора напряжений Рейнольдса и средней продольной скорости для двух рассмотренных конфигураций. Красным цветом показаны результаты для внутренней сборки, чёрным — для периферийной. Горизонтальная ось соответствует расстоянию y/H вдоль пунктирной линии, показанной на рис. 3

твэльного пространства $\delta = 4$ мм, вертикальная — на высоту модели $H = 28$ мм. В межтвэльном пространстве наблюдается неплохое совпадение результатов (с точностью до 7%), хотя в точках $z/H = 0.25$ и $z/H = 0.75$ наблюдается наибольшее различие в графиках из-за наличия плоской стенки в периферийной конфигурации и, как следствие, изменения структу-

ры вторичных течений. На рис. 4(c)–4(f), несмотря на довольно высокое отклонение профилей друг от друга, наблюдается качественное совпадение профилей для обеих конфигураций. При этом стоит отметить, что наибольшие отклонения наблюдаются для наименее интенсивных компонент тензора напряжений Рейнольдса, которые вносят наименьший вклад в общую турбулентную кинетическую энергию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено прямое численное моделирование двух модельных областей сборок ТВЭЛов: внутренней и периферийной. Выявлено, что профили средней скорости, а также компонент тензора напряжений Рейнольдса имеют качественные сходства для обеих конфигураций. Наибольшие отклонения наблюдаются в наименее интенсивных компонентах тензора напряжений Рейнольдса, вследствие чего на спектре турбулентной кинетической энергии явных различий выявлено не было, что даёт возможность предполагать о незначительном влиянии плоской стенки на процессы переноса энергии в межтвэльном пространстве. При этом основные отличия между конфигурациями вызваны изменением структуры вторичных течений (для внутренней области они намного интенсивнее), что и приводит к изменению пульсационных характеристик. Таким образом, можно установить, что экспериментальные результаты при исследовании периферийной области сборки ТВЭЛов качественно отражают картину турбулентного течения и для внутренней части сборки, однако влияние найденных различий в профилях компонент тензора напряжений Рейнольдса на процессы теплопереноса требует дальнейшего детального изучения.

Авторы благодарны Институту теплофизики СО РАН и Новосибирскому государственному университету за предоставление вычислительных ресурсов суперкомпьютера «Каскад».

ЛИТЕРАТУРА

1. *IAEA* Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050. Internat. Atomic Energy Agency, 2021.
2. *Meyer L.* From discovery to recognition of periodic large scale vortices in rod bundles as source of natural mixing between subchannels — A review // Nuclear Engrg. Design. 2010. V. 240. P. 1575–1588.
3. *Shams A., Kwiatkowski T.* Towards the direct numerical simulation of a closely-spaced bare rod bundle // Ann. Nuclear Energy. 2018. V. 121. P. 146–161.
4. *Nek5000 web page* https://nek5000.mcs.anl.gov/
5. *Ivashchenko V.A., Palkin E.V., Ryzhenkov V.O., Mullyadzhanov R.I.* POD-analysis of the near field of a turbulent circular jet when mixing gases of different densities // Thermophysics and Aeromechanics. 2021. V. 28, N 1. P. 55–64.
6. *Bobrov M., Hrebtov M., Ivashchenko V., Mullyadzhanov R., Seredkin A., Tokarev M., Zaripov D., Dulin V., Markovich D.* Pressure evaluation from Lagrangian particle tracking data using a grid-free least-squares method // Measurement Sci. Technology. 2021. V. 32, N 8. Article 084014.
7. *Zaripov D., Ivashchenko V., Mullyadzhanov R., Li R., Mikheev N., Kähler C. J.* On a mechanism of near-wall reverse flow formation in a turbulent duct flow // J. Fluid Mech. 2021. V. 923. Article A20.
8. *Patera A. T.* A spectral element method for fluid dynamics: laminar flow in a channel expansion // J. Comput. Phys. 1984. V. 54, N 3. P. 468–488.
9. *Hesthaven J. S., Gottlieb S., Gottlieb D.* Spectral Methods for Time-Dependent Problems. V. 21. Cambridge: Univ. Press, 2007.

SIBERIAN JOURNAL OF INDUSTRIAL MATHEMATICS

UDC 532.542.1

DIRECT NUMERICAL SIMULATION OF THE PERIPHERAL AND THE INTERNAL CONFIGURATION OF THE MODEL FUEL ASSEMBLY

© 2023 **V. A. Ivashchenko[1a], P. D. Lobanov[1], N. I. Yavorsky[1], M. P. Tokarev[1,2], R. I. Mullyadzhanov[1,2]**

[1]*Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, pr. Akad. Lavrentyeva 1, Novosibirsk 630090, Russia,*
[2]*Novosibirsk State University, ul. Pirogova 1, Novosibirsk 630090, Russia*

E-mail: ivashchenko@itp.nsc.ru

Received 18.08.2022, revised 18.08.2022, accepted 29.09.2022

Abstract. Due to the active development of nuclear energy in the world and in Russia, more and more attention is paid to the issues of energy efficiency and safety of nuclear reactors. Despite the fact that most of the reactors operating today have already been well studied, some hydrodynamic questions related to the flow of the moderator along the fuel elements still remain open. In particular, this paper considers the equivalence of flow in the peripheral and internal regions of the fuel assembly.

Keywords: direct numerical simulation, fuel assembly.

DOI: 10.33048/SIBJIM.2023.26.207

REFERENCES

1. IAEA Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050. Internat. Atomic Energy Agency, 2021.
2. Meyer L. From discovery to recognition of periodic large scale vortices in rod bundles as source of natural mixing between subchannels — A review. *Nuclear Engrg. Design.*, 2010, Vol. 240, pp. 1575–1588.
3. Shams A., Kwiatkowski T. Towards the direct numerical simulation of a closely-spaced bare rod bundle. *Ann. Nuclear Energy*, 2018, Vol. 121, pp. 146–161.
4. Nek5000 web page https://nek5000.mcs.anl.gov/
5. Ivashchenko V.A., Palkin E.V., Ryzhenkov V.O., Mullyadzhanov R.I. POD-analysis of the near field of a turbulent circular jet when mixing gases of different densities. *Thermophys. Aeromech.*, 2021, Vol. 28, No. 1, pp. 55–64.
6. Bobrov M., Hrebtov M., Ivashchenko V., Mullyadzhanov R., Seredkin A., Tokarev M., Zaripov D., Dulin V., Markovich D. Pressure evaluation from Lagrangian particle tracking data using a grid-free least-squares method. *Measurement Sci. Technology*, 2021, Vol. 32, No. 8, article 084014.
7. Zaripov D., Ivashchenko V., Mullyadzhanov R., Li R., Mikheev N., Kähler C. J. On a mechanism of near-wall reverse flow formation in a turbulent duct flow. *J. Fluid Mech.*, 2021, Vol. 923, article A20.
8. Patera A. T. A spectral element method for fluid dynamics: laminar flow in a channel expansion. *J. Comput. Phys.*, 1984, Vol. 54, No. 3, pp. 468–488.
9. Hesthaven J. S., Gottlieb S., Gottlieb D. Spectral Methods for Time-Dependent Problems. Vol. 21. Cambridge: Univ. Press, 2007.

English translation is published in Journal of Applied and Industrial Mathematics, 2023, Vol. 17, No. 2.