

Прямое численное моделирование турбулентного теплообмена в пучке стержней

К.М. Сергеев, А.Ю. Чулюнин (НИИ механики МГУ)

km.sergeenko@gmail.com

Моделирование турбулентных течений и процессов теплообмена является одной из распространенных задач при конструировании различных изделий. В серийных расчетах широко используются упрощенные модели турбулентности, основанные на осредненных по Рейнольдсу уравнениях Навье-Стокса (RANS-модели турбулентности), а для замыкания этих моделей вводится дополнительная эмпирическая информация. При этом, указанные модели часто требуют верификации и настройки введенных эмпирических параметров под конкретный класс исследуемых задач [1]. Настройка параметров моделей может быть проведена по результатам физического эксперимента или результатам численного моделирования на основе уже апробированных математических моделей. Для моделирования турбулентных течений таким апробированным алгоритмом расчета может служить прямое численное моделирование [2].

Настоящее исследование проводилось в рамках работ по оценке функциональных возможностей программного обеспечения *Simcenter STAR-CCM+* [3], широко применяемого в решении задач теплогидравлики пучка стержней [4–7].

Система *Simcenter STAR-CCM+* от *Siemens Digital Industries Software* представляет собой комплексный пакет программ решения стационарных и нестационарных задач механики подвижных жидких и газовых сред с учетом химической кинетики, нелинейной теплопроводности (включая сопряженный теплообмен), механики деформируемого твердого тела на основе реологических свойств материалов, электрохимии, электромагнетизма, акустики. Система предлагает функционал для точных и эффективных расчетов – с единым интегрированным интерфейсом пользователя и автоматизированными рабочими процессами, – что обеспечивает простой способ для проведения анализа и решения сложных практических задач. Применяя *STAR-CCM+* на всех этапах проектирования, можно с высокой точностью прогнозировать характеристики изделия, сокращать расходы на его натурные испытания.

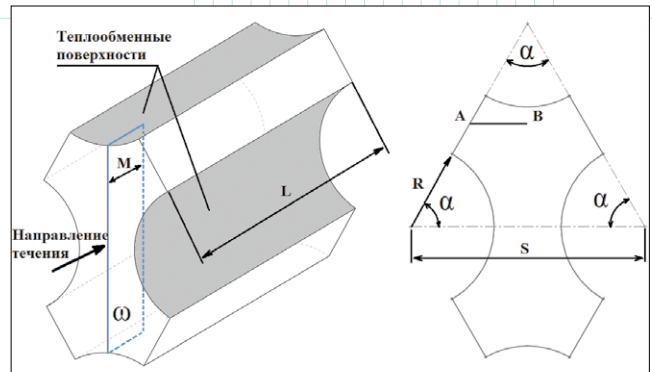


Рис. 1. Геометрия расчетной области

Постановка задачи

В предлагаемой вниманию читателей статье исследуются процессы турбулентного теплообмена при продольном обтекании пучка тепловыделяющих стержней (рис. 1, табл. 1). Рассматривается диапазон малых чисел Рейнольдса (2500, 5000 и 10000) и широкий диапазон чисел Прандтля (0.0043, 0.0154, 0.0324, 0.71 и 7.0).

Теплоноситель представляется ньютоновской несжимаемой жидкостью с постоянными свойствами, течение которого описывается системой уравнений:

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0$$

$$\partial \mathbf{U} / \partial t + \mathbf{U} \cdot \nabla \mathbf{U} = -\nabla P + (1/Re)\Delta \mathbf{U}$$

$$\partial T_i / \partial t + \mathbf{U} \cdot \nabla T_i = (1/Pr_i Re)\Delta T_i$$

где \mathbf{U} – вектор скорости; P – давление; T_i – температура теплоносителя “ i ”; Pr_i – число Прандтля теплоносителя “ i ”; $Re = U_b D / \nu$ – число Рейнольдса (D – гидравлический диаметр; ν – кинематическая вязкость; U_b – средняя скорость).

Гидравлический диаметр в настоящей работе определялся соотношением:

$$D = 2R \left[\frac{2\sqrt{3}}{\pi} \left(\frac{S}{2R} \right)^2 - 1 \right]$$

Табл. 1. Геометрические характеристики расчетной области

Параметр	α	$S/2R$	R	$L (Re = 2500)$	$L (Re = 5000)$	$L (Re = 10000)$
Значение	60°	1.4	0.431	50	20	20

На теплообменных поверхностях задавалось условие прилипания и постоянство теплового потока:

$$\mathbf{U} = 0$$

$$\partial T_i / \partial \vec{n} = -1$$

На остальных границах расчетной области задавались периодические граничные условия. По направлению течения поддерживалось постоянство средней скорости и температуры, соответствующее значению 1.

Расчетная сетка

Расчеты проводились на структурированных сетках (рис. 2), которые были построены с помощью сеточного генератора STAR-CCM+. Толщина пристеночных ячеек соответствовала условию $y^+ < 1$. Суммарное количество расчетных ячеек для трех исследуемых задач (числа Рейнольдса 2500, 5000 и 10000) составило: 9.5, 11.0 и 31.5 млн. соответственно.

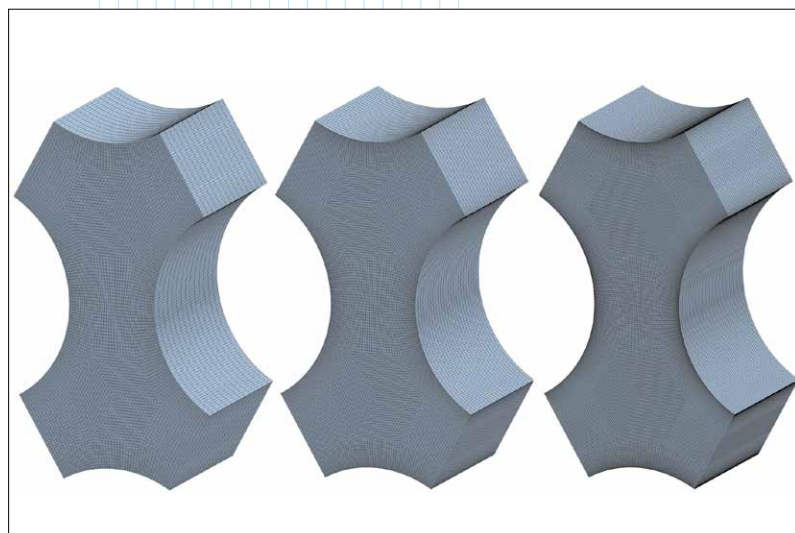


Рис. 2. Фрагменты расчетных сеток для трех чисел Рейнольдса, слева направо: 2500, 5000, 10000

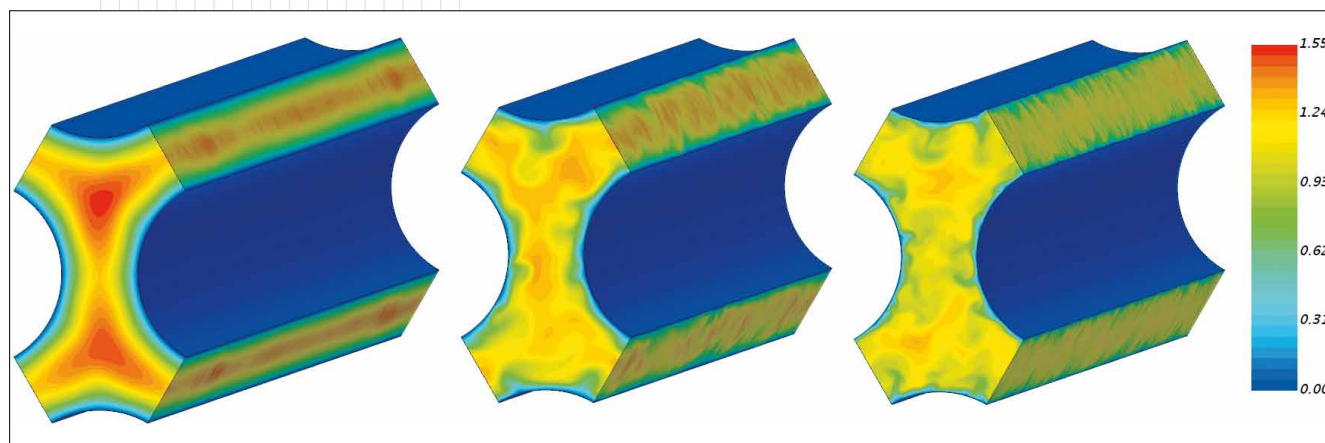


Рис. 3. Распределение мгновенного поля модуля скорости для трех чисел Рейнольдса, слева направо: 2500, 5000, 10000

Результаты расчета

В результате проведенных расчетов получены поля скорости и температуры на исследуемом режиме течения. Для нижней границы выбранного диапазона чисел Рейнольдса характерно возникновение перемежающегося режима течения, который, в частности, затруднительно воспроизвести в расчетах по RANS-моделям. Данный режим наблюдается на левой части рис. 3, на котором представлено распределение мгновенного поля модуля скорости для трех исследуемых чисел Рейнольдса. Возникновение перемежающегося режима течения потребовало увеличения расчетной области вдоль направления течения (табл. 1).

На рис. 4 приведены мгновенные поля модуля скорости и соответствующие поля температуры на поверхности ω (рис. 1) для исследуемых чисел Рейнольдса и Прандтля. Параметр M (рис. 1), определяющий длину поверхности ω , соответствует значению 3.

Из рис. 4 видно, что увеличение числа Прандтля и Рейнольдса соответствует большему количеству температурных неоднородностей. При этом, имеет место сходство полей скорости и температуры при $Pr = 0.71$.

В практических приложениях, одним из основных вопросов является определение напорно-расходной характеристики (коэффициент трения) и характеристики теплоотдачи (число Нуссельта). Коэффициент трения и число Нуссельта в настоящей работе определялись соотношениями:

$$FF = \frac{\Delta P}{L} \frac{D}{0.5 \rho U_b^2}$$

$$Nu = \frac{q_w}{\langle T \rangle_w - T_b} \frac{D}{\lambda}$$

где ΔP – потери давления; ρ – плотность; q_w – значение теплового потока на теплообменной поверхности; $T(w)$ – средняя температура на теплообменной поверхности; T_b – среднесмешанная температура теплоносителя; λ – теплопроводность.

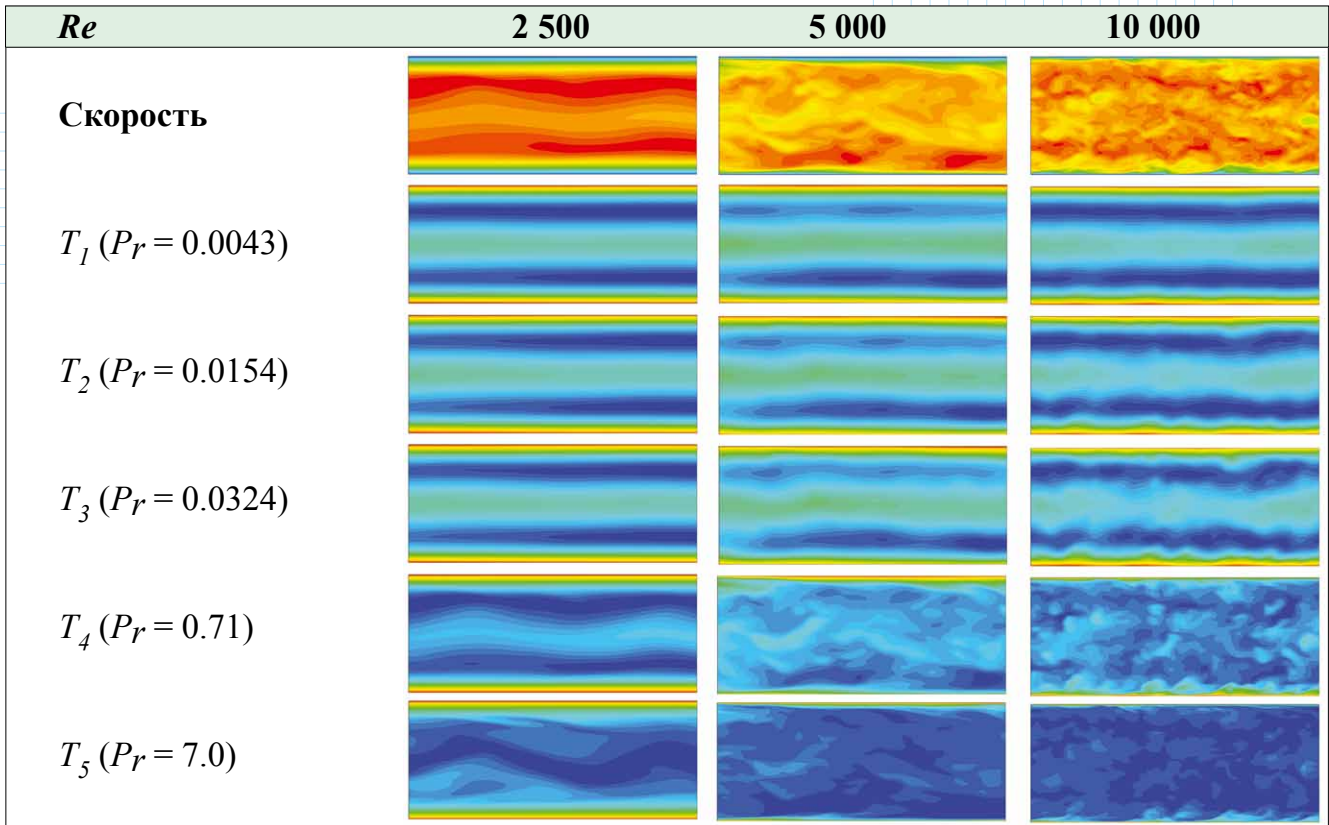


Рис. 4. Мгновенные поля модуля скорости температуры

Табл. 2. Расчетные значения коэффициентов трения и чисел Нуссельта

Re	FF	Nu				
		Pr ₁ =0.0043	Pr ₂ =0.0154	Pr ₃ =0.0324	Pr ₄ =0.71	Pr ₅ =7.0
2 500	0.0492	12.5	12.5	12.6	13.1	18.0
5 000	0.0399	13.2	13.2	13.4	21.3	42.9
10 000	0.0342	13.6	13.8	14.5	36.5	88.1

Расчетные значения коэффициентов трения и чисел Нуссельта представлены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что для теплоносителей с числами Прандтля $\ll 1$ при четырехкратном увеличении числа Рейнольдса, наблюдается незначительное (порядка 10%) увеличение числа Нуссельта. При аналогичном увеличении числа Рейнольдса для теплоносителя с числом Прандтля 7.0 наблюдается пятикратное увеличение числа Нуссельта. Данное обстоятельство связано с большим вкладом температуропроводности в перенос тепла для теплоносителей с малыми числами Прандтля.

Полученные значения чисел Нуссельта могут быть аппроксимированы соотношением:

$$Nu = -3.55 + 0.081 \cdot Pr^{(-0.88+0.164 \cdot Re^{0.157})} \cdot Re^{(0.21+0.47 \cdot Pr^{0.114})} \pm 11\%$$

Представленная зависимость применима в диапазоне рассматриваемых чисел Рейнольдса 2500÷10000, чисел Прандтля 0.0043÷7.0 и для шага стержней $S/2R = 1.4$.

Сопоставление с результатами экспериментальных исследований

Результаты численного моделирования сопоставлялись с данными экспериментальных исследований по распределению среднего значения и интенсивности пульсаций продольной компоненты скорости на линии А-В, показанной на рис. 1, [8] (рис. 5), а также по значению коэффициента трения и теплоотдачи [9] (табл. 3). Сопоставление выявило, что результаты численного моделирования удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными, а отклонение не превышает 10%.

Табл. 3. Сопоставление расчетных и экспериментальных интегральных характеристик течения, $Pr = 0.0324$ [9]

	Re	FF	Nu
Расчет	10 000	0.0342	14.51
Эксперимент	10 200	0.031	14

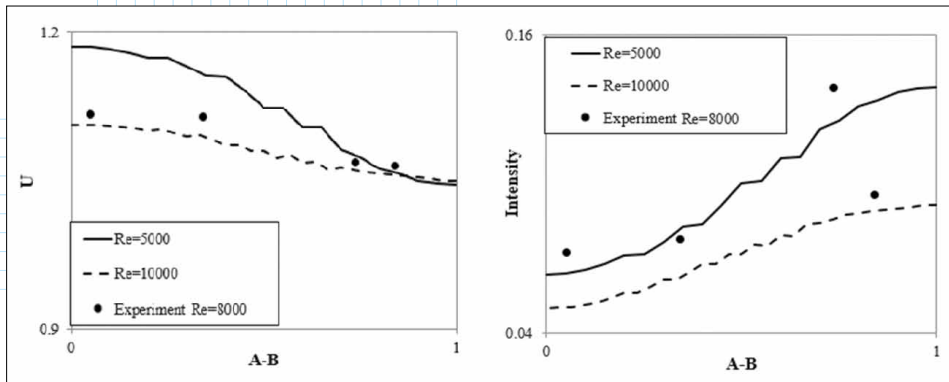


Рис. 5. Сопоставление расчетных данных с результатами экспериментальных исследований [8]. Слева представлено среднее значение продольной компоненты скорости, справа – интенсивность пульсаций продольной компоненты скорости

Заключение

Авторами было проведено прямое численное моделирование турбулентных течений и теплообмена различных теплоносителей при продольном обтекании пучка стержней. Установлено, что существенное влияние на температурное поле и соответствующие характеристики теплоотдачи оказывает число Прандтля. На нижней границе рассмотренного диапазона чисел Рейнольдса выявлено возникновение перемежающегося режима течения.

Для рассмотренного диапазона параметров авторами предложена обобщенная зависимость числа Нуссельта от чисел Рейнольдса и Прандтля. Достоверность полученных результатов расчетов подтверждается результатами сопоставления с экспериментальными исследованиями.

Таким образом, полученные результаты могут являться опорными для верификации расчетных

исследований по RANS-моделям турбулентности.

Благодарности

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова и вычислительных ресурсов ОВК НИЦ “Курчатовский институт” (<http://computing.nrcki.ru>), при поддержке РФФ, проект 18-71-10075.

ООО “Саровский Инженерный Центр” (www.saec.ru)

предоставило возможность выполнения работ в рамках тестовой эксплуатации программного обеспечения Simcenter STAR-CCM+.

ООО “Саровский Инженерный Центр” в технопарке “Саров” активно участвует в развитии компьютерных технологий мирового уровня и на практике решает широкий круг прикладных задач прочности, гидрогазодинамики и теплопереноса. Специалисты компании обладают многолетним опытом плодотворного сотрудничества с российскими и зарубежными предприятиями, накопленным в результате успешной реализации множества проектов, выполненных для предприятий авиадвигателестроения, авиационно-космического комплекса, атомной энергетики, автомобиле- и судостроения, машиностроения, нефтегазовой промышленности, гражданского строительства и других наукоемких отраслей промышленности.

Литература

1. Shams A., Roelofs F., Baglietto E., Lardeau S., Kenjeres S. *Assessment and calibration of an algebraic turbulent heat flux model for low-Prandtl fluids* // International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, vol. 79, pp. 589–601.
2. H. Kawamura, Abe H., Matsuo Y. *DNS of turbulent heat transfer in channel flow with respect to Reynolds and Prandtl number effects* // International Journal of Heat and Fluid Flow, 1999, vol. 20, pp. 196–207.
3. STAR-CCM+ v14.02 // Siemens PLM Software, 2019.
4. Bakanov V.V., Zhitnik A.K., Motlokhov V.N., Ognev S.P., Romanov V.I., Ryabov A.A., Tarasov V.A., Tareev S.A., Fomin V.P., Weber D.P., Taiwo T.A., Yang W.S. *TDMCC Monte-Carlo package coupled with STAR-CD thermal-hydraulic codes* // Transactions of American Nuclear Society, 2004, vol. 91.
5. Popov M., Michailukov K., Ryabov A., Mendonca F., Tzanos C. *Large Eddy Simulation of turbulent channel flow with heat transfer at low Reynolds and Mach numbers* // Turbulence, Heat and Mass Transfer 5, Begell House, 2006.
6. Базаров Ю.Б., Богуненко Ю.Д., Бондаренко Г.А., Вишневецкий Е.Д., Кунин А.В., Логвинов А.И., Мешков Е.Е., Попов М.С., Рябов А.А., Никитин И.Н., Семенов Ю.К., Стародубцев В.А., Стаценко В.П., Tzanos С.Р., Dzozdo М.В. *Турбулентное течение через связку 5×5 стержней: сравнение RANS расчетов с LDA измерениями* // Вопросы атомной науки и техники. Серия теоретическая и прикладная физика, 2010, вып. 1–2, с. 48–59.
7. Tzanos С.Р., Popov М., Mendonca F. *Large Eddy Simulation of turbulence in rode cluster* // Nuclear Technology 2011, vol. 173, pp. 239–250.
8. Kashinsky O.N., Kulikov D.V., Lobanov P.D., Pribaturin N.A., Svetonosov A.I. *Distribution of liquid velocity in the experimental model of a fuel assembly with a spacer grid* // Thermophysics and Aeromechanics, 2018, vol. 25, no. 2, pp. 219–223.
9. Pacio J., Litfin K., Batta A., Viellieber M., Class A., Doolaard H., Roelofs F., Manservisi S., Menghini F., Böttcher M. *Heat transfer to liquid metals in a hexagonal rod bundle with grid spacers: Experimental and simulation results* // Nuclear Engineering and Design, 2015, vol. 290, pp. 27–39.