

УДК 517.91

Применение открытопористых структур как ламиниризатора потока в канале. Численная оценка влияния конструкции на однородность течения

Балабина Т.Ю., Дерюгин Ю.Н.

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский
научно-исследовательский институт экспериментальной физики

Аннотация: В работе приводятся результаты численного исследования влияния открытопористой структуры (ОПС) на ламинирзацию потока в канале. Для моделирования ОПС использовалась модель Форхгеймера-Бринкмана, в которой вязкостной и инерционный коэффициенты были получены путем сквозного расчета этой структуры. Распределение параметров в потоке было получено из результатов моделирования поворота канала. Количественным критерием влияния ОПС на однородность потока является уровень завихренности. Расчеты течений выполнены в стационарной постановке по комплексу «ЛОГОС» с использованием параллельных вычислений на суперкомпьютере. Из анализа полученных результатов сделан вывод о том, что с применением ОПС уровень завихренности существенно снижается и непосредственно влияет на профиль скорости вниз по потоку

Ключевые слова: открытопористая структура, модель Форхгеймера-Бринкмана, завихренность.

1. Проблематика исследуемого вопроса

Рассматривая проблему выравнивания профиля скорости потока, следует учитывать, что каждый источник генерации возмущений порождает определенный вид неоднородности. В рамках данной работы рассмотрен профиль скорости за поворотным участком канала на угол 90° (колесо). Результаты моделирования такого источника возмущения представлены в [1]. Для оценки ламинирзации потока рассмотрены результаты расчетов, которые максимально близко соответствуют экспериментальным данным [2]. Поскольку анализируемое течение является сугубо турбулентным, в качестве оценочных параметров рассматривается осредненный показатель модуля завихренности [3,4]. Оценка уровня завихренности, которая рассчитывалась в прямолинейном канале за поворотом в поперечных сечениях с периодичностью одного диаметра трубы показывает, что порожденное поле завихренности исследуемым конструкционным изменением сохраняется на расстоянии 20 калибров. В качестве одного из возможных способов выравнивания профиля скорости потока могут быть использованы вставки конструктивных элементов из открытопористых материалов. Наибольший интерес представляют материалы с высокой пористостью ввиду их малого веса и небольшого гидравлического сопротивления [5]. Математическая модель в общей постановке достаточно сложна и не имеет точного аналитического решения. Численное моделирование для описания характеристик течения является сложной и дорогостоящей процедурой. Для решения задачи вводятся различного рода допущения и полуэмпирические зависимости для коэффициентов переноса, ис-

пользуемые в математической модели. Для определения указанных коэффициентов необходим прямой эксперимент, дающий информацию о гидравлическом сопротивлении при движении среды в пористых структурах. В рамках работы [6] был проведен численный эксперимент, в котором была получена зависимость отношения градиента давления к толщине открытопористой структуры (ОПС) от скорости потока. Точками на графике отмечены данные, которые были получены в ходе прямого численного моделирования. Из графика видно, что зависимость $\frac{\Delta P}{\Delta l} = f(u)$ на исследуемом образце нелинейна (что означает отклонение от ламинарного режима). Толщина исследуемого образца равна 1.68 мм. Полученная зависимость в исследуемом диапазоне (скорость потока 0-10 м/с) аппроксимируется квадратичной зависимостью, что соответствует модели Форхгеймера-Бринкмана:

$$\frac{\Delta P(u)}{\Delta l} = \tilde{A}u + \tilde{B}u^2, \quad (1)$$

где u – скорость потока, \tilde{A} и \tilde{B} – вязкостной и инерционный коэффициенты, найденные с помощью метода наименьших квадратов (МНК): $\tilde{A} = 14965$, $\tilde{B} = 717.71$. Полученные коэффициенты используются для описания пористого региона.

2. Обсуждение результатов

Для проведения численного моделирования использовалась цилиндрическая труба с блочно-структурированной сеткой с учетом призматического слоя, масштаб ячейки составляет 0.85 мм, количество ячеек ~ 7106 . Численный расчет проводился в модуле «Аэро-Гидро» комплекса «ЛОГОС» [7] методом моделирования турбулентных течений на основе двухпараметрической модели турбулентности Ментера (SST) в стационарном режиме (рис. 1). Анализируемая неоднородность имеет значительный градиент скорости, который оказывает существенное влияние на однородность потока на протяжении порядка 50 характерных диаметров трубы [1]. Создавая дополнительное гидравлическое сопротивление в потоке в виде ОПС, можно оказать существенное влияние на профиль скорости. Из представленного на рис. 1а распределения отношения модуля скорости к массовой (K_{mass}) в продольном сечении канала видно, что градиент скорости существенно снижается за регионом открытопористой структуры.

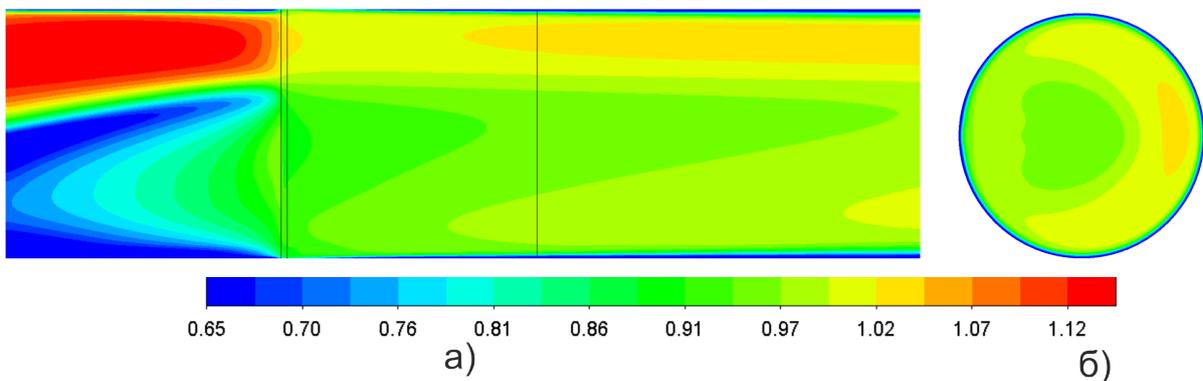


Рис. 1. Распределение отношения модуля скорости к массовой скорости: а) в продольном сечении канала; б) в поперечном сечении канала.

На расстоянии одного характерного диаметра трубы, представленного на рис. 16, диапазон изменения K_{mass} составляет от 0.89 до 1.02, что существенно ниже чем диапазон изменения K_{mass} для модели без пористого региона. Сравнительный анализ относительно оси симметрии K_{mass} для моделей с пористым регионом и без него представлен на рис. 2.

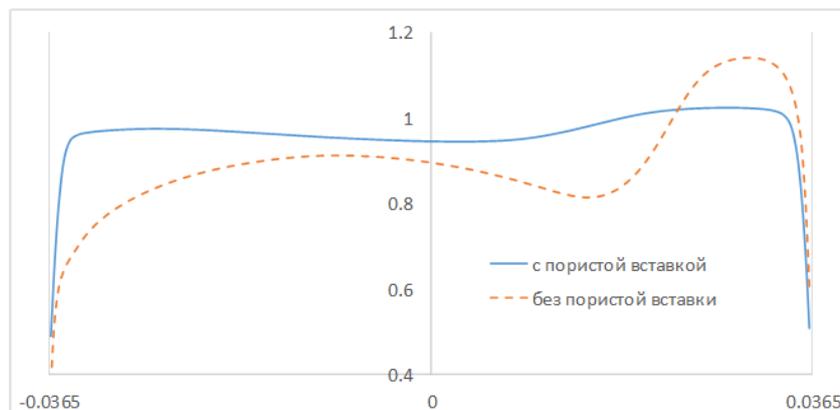


Рис. 2. График распределения отношения модуля скорости к массовой скорости по оси симметрии для расчетов с пористым регионом и без него.

В моделировании трехмерного турбулентного течения на основе модели турбулентности используется тензорно-инвариантные величины завихренности и деформации, которые являются составляющими тензора градиента скорости. Для задач расчета внутренних течений предпочтительно использовать тензор завихренности, поскольку такой параметр наглядно показывает характер турбулентного потока [3].

Как уже отмечалось выше, порожденное поле завихренности для исследуемого профиля скорости сохраняется на расстоянии 20 калибров, но с применением открытопористой структуры наблюдается резкий спад уровня завихренности до значений аналогичных цилиндрической трубы с однородным профилем скорости.

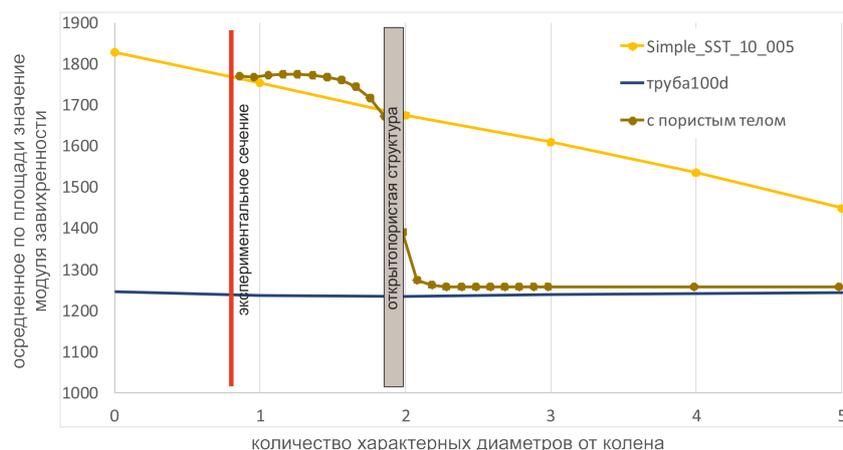


Рис. 3. График распределения уровня завихренности вниз по потоку для расчетов трубы с неоднородным профилем скорости на входе с учетом ОПС и без нее, а также цилиндрической трубы с однородным потоком.

Литература

1. Балабина Т.Ю., Дерюгин Ю.Н., Кудряшов Е.А. Некоторые результаты расчетов турбулентных течений в криволинейных каналах с использованием выхреразрешающего подхода В тезисах докладов X Международной научной молодежной школы-семинара «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» имени Е.В. Воскресенского (Саранск, 14-18 июля 2022). Саранск.: СВМО, 2022.
2. Аношкин Ю.И., Добров А.А., Кузьма М.М. Разработка и обоснование экспериментального стенда ФТ-18 для исследования процессов смешения в моделях различной геометрии // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2019. № 2 (125). С. 94-104.–DOI 10.46960/1816-210X2019 2 94
3. Волков К.Н., Емельянов В.Н. Визуализация данных физического и математического моделирования в газовой динамике // Под ред. Волкова К.Н., Емельянова В.Н. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2017. 338 с.
4. Юдов Ю.В. Численное моделирование теплогидравлических процессов в циркуляционных контурах реакторных установок с водяным теплоносителем: дисс. докт. физ.-мат. наук: 01.04.14 // Юдов Юрий Васильевич; науч. Рук. Ю.А. Мигров; НИТИ. – Сосновый Бор, С. 2021–277.
5. Попов И.А. Гидродинамика и теплообмен в пористых теплообменных элементах и аппаратах. Интенсификация теплообмена: монография // под общ. ред. Ю.Ф. Гортышова. Казань: Центр инновационных технологий, 2007. 240 с.
6. Балабина Т.Ю. К вопросу о методах построения расчетных моделей пористых структур, применяемых в ядерных и изотопных установках, и оценке их неоднородности // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2021. № 4. С. 43-52. DOI: 10.46960/1816-210X 2021 4 43
7. Козелков А.С., Дерюгин Ю.Н., Зеленский Д.К., Полищук С.Н., Лашкин С.В., Жучков Р.Н., Глазунов В.А., Яцевич С.В., Курулин В.В. Многофункциональный пакет программ ЛОГОС: физико-математические модели расчета задач аэро-, гидродинамики и тепломассопереноса. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013. 67 с.

MSC 65B25

The use of open-porous structures as a flow laminarizer in the channel. Numerical evaluation of the influence of the design on the uniformity of the flow

T.Yu. Balabina, Yu.N. Deryugin

FSUE RFNC – VNIIEF

Abstract: The paper presents the results of a numerical study of the effect of the open-pored structure (OPS) on the laminarization of the flow in the channel. The Forchheimer-Brinkman model was used to model OPS, in which the viscosity and inertia coefficients were obtained by end-to-end calculation of this structure. The distribution of parameters in the flow was obtained from the results of modeling the rotation of the channel. The quantitative criterion for the influence of OPS on the uniformity of the flow is the level of vorticity. The calculations of the flows were performed in a stationary setting according to the multifunctional software package LOGOS on a parallel supercomputer. From the analysis of the results obtained, it is concluded that with the use of OPS, the level of vorticity is significantly reduced and directly affects the velocity profile downstream.

Keywords: porous media, Forchheimer-Brinkman model, vorticity.

References

1. Balabina T.Y., Deryugin Yu.N., Kudryashov E.A. Some results of turbulent flows calculations in curved channels using a vortex-resolving approach. Mathematical modeling, numerical methods and complexes of programs [Electronic resource]: Collection of materials of the X International Scientific Youth School-Seminar named after E.V.Voskresenskoe (Saransk, July 14-18, 2022)/editor: V.F. Tishkin (ed.) [et al.]. Saransk: SVMO, 2022. 3. P. 24-26
2. Anoshkin Yu.I., Dobrov A.A., Kuzma M.M. Development and justification of the FT-18 experimental stand for the study of mixing processes in models of various geometries, Proceeding of the R.E. Alekseev NSTU, 2019, No.2 (125), 3. P. 94-104. DOI 10.46960/1816-210X2019 2 94
3. Volkov K.N., Emelyanov V.N. Modeling of large vortices in calculations of turbulent flows, M, FIZMATLIT, 2008.
4. Yudov Yu.V. Numerical modeling of thermohydraulic processes in the circulation circuits of reactor installations with a water coolant: diss. Doctor of Physical and Mathematical Sciences: 01.04.14 /Yuri Vasilyevich Yudov: Yu.A.Migrov, scientific director: THREDS. - Sosnovy Bor, 2021. 277 p.
5. Popov I.A. Hydrodynamics and heat transfer in porous heat exchange elements and apparatuses. Intensification of heat exchange: a monograph / under the general editorship of Yu.F.Gortyshov. - Kazan: Center of Innovative Technologies, 2007. 240 p.

6. Balabina T.Yu. On the question of methods for constructing computational models of porous structures used in nuclear and isotope installations and assessing their heterogeneity. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2021. No.4. P. 43-52. DOI: 10.46960/1816-210X 2021 4 43
7. Kozelkov A.S., Deryugin Yu.N., Zelensky D.K., Polischuk S.N., Lashkin S.V., Zhuchkov R.N., Glazunov V.A., Yatsevich S.V., Kurulin V.V. Multifunctional software package LOGOS: physico-mathematical models for calculating problems of aerohydrodynamics and mass transfer, Sarov, RFNC-VNIIEF, 2013. 67 p.