

УДК 519.63

Применение разномасштабных моделей в численном исследовании течения в криволинейном канале с пористыми вставками

Балабина Т.Ю., Дерюгин Ю.Н.

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

Аннотация: В данной работе приводятся результаты численного моделирования на моделях макро и микроуровнях. В микромасштабе исследуются элементарные физические процессы через пористую вставку, протекающие в непрерывном пространстве и времени. На основании данную микромоделирования определены фильтрационные характеристики пористой вставки для макромоделей. В макромоделировании применяется укрупненная дискретизация пространства по функциональному признаку для исследования течения в криволинейном канале. Приведена оценка влияния пористой вставки на снижения неоднородностей потока проводится по макромоделей. Приведены результаты численного исследования структуры турбулентных потоков за коленом. Рассматривается задача о снижении пульсационных возмущений потока, возникающих в газодинамическом тракте за коленом с использованием пористой вставки. Расчеты течений проведены с использованием комплекса программ «ЛОГОС».

Ключевые слова: численное моделирование, пористое тело, уравнение фильтрации, модель Форхгеймера, ЛОГОС.

1. Проблематика исследуемого вопроса

Теоретическое исследование газодинамических течений в криволинейных каналах с пористыми вставками проводится при помощи основных уравнений газодинамики (уравнения непрерывности, движения и сохранения энергии [1]). Математическая модель в общей постановке достаточно сложна и не имеет точного аналитического решения, поэтому вводятся различного рода допущения и полуэмпирические зависимости. Так, моделирование течений в каналах с пористыми вставками основывается, как правило, на использовании фильтрационных эмпирических макромоделей, в которых возникающее трение при взаимодействии потока с каркасом пористого материала описывается заданием тензором проницаемости. Результаты численного моделирования структуры потока при таком подходе существенно зависят от адекватности описания пористого материала тензором проницаемости, определяемым из эксперимента. Одним из способов определения фильтрационных характеристик сред с высокой пористостью может служить прямое численное моделирование, которое подразумевает построения геометрической модели порового пространства, построение сеточной модели с учетом выделения пограничного слоя на скелете и определение фильтрационных характеристик макромоделей путем осреднения результатов численного моделирования вязкого течения в поровом пространстве на микроуровне путем решения уравнений Навье-Стокса.

2. Постановка задачи

Как показано в работе [2] течение за коленом носит существенно турбулентный характер, включающий крупные вихревые структуры и мелкомасштабные пульсации потока. Для борьбы с возникшими возмущениями потока в данной работе рассматривается открытопористая вставка (рис. 1).

Исследование проводилось поэтапно и было разделено на несколько задач.

Первой задачей являлось моделирование течения через фрагмент пористой вставки. В рамках этой задачи исследовалась структура потока в пористой вставке, по которому затем определялись параметры макромоделей. Второй задачей являлось моделирование спутного следа за пористой вставкой.

В третьей заключительной задаче проводилась оценка затухания по макромоделю газодинамических неоднородностей, возникающих от колена в канале с пористой вставкой. Для оценки влияния пористой вставки на неоднородный турбулентный поток проводится моделирование в макромасштабе с использованием математических моделей описания пористого тела на основе фильтрационных моделей, в которых применяются осредненные показатели характеристик пористого тела.

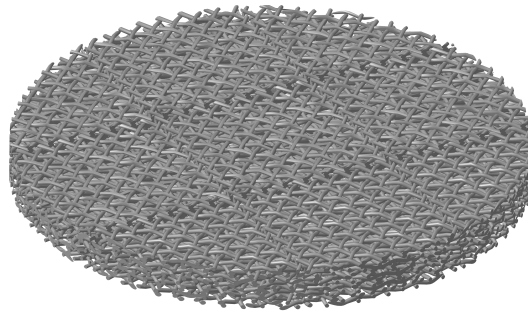


Рис. 1. Деталь из пористого материала

3. Обсуждение результатов

С целью исследования структуры потока и определения параметров для макромоделей пористой среды были проведены расчёты стационарно ламинарного течения воздуха в пористой вставке по построенной сеточной модели. Основной зависимостью, определяющей режим течения в пористой среде, является связь между осредненной скоростью потока и градиентом давления. На рис. 2 точками отмечены расчетные зависимости отношения перепада давления к толщине пористой вставки полученные в расчетах на микроуровне для различных чисел Рейнольдса. Из графика видно, что зависимость $\frac{\Delta P(u)}{\Delta l} = f(u)$ для рассматриваемой пористой вставки

на исследуемом диапазоне скоростей носит нелинейный характер. Это означает, что данный вид зависимости указывает на переходный режим течения газа в поровом пространстве. За счет явлений отрыва и струйных эффектов в переходном и турбулентных режимах течения, зависимость градиента давления от скорости приближается к квадратичной:

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

где u – скорость потока, $\tilde{A}$ и $\tilde{B}$ – размерные вязкостной и инерционный коэффициенты сопротивления пористого тела. На рис. 2 сплошной линией показана квадра-

точная зависимость (1), коэффициенты которой были найдены методом наименьших квадратов [3].

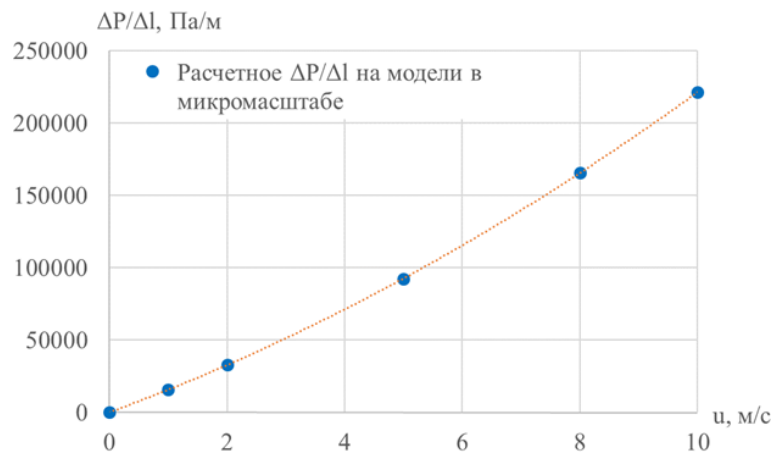


Рис. 2. Зависимость перепада давления от входной скорости потока

Использование пористой вставки создает в потоке дополнительное гидравлическое сопротивление, что может оказать существенное влияние на профиль скорости. В исследуемом диапазоне скоростей отчетливо наблюдается воздействие потока на пористую вставку. С увеличением скорости возмущения сильнее «прижимаются» к поверхности скелета пористой вставки.

Достоинство расчета на микроуровне заключается в детализации картины течения внутри конструкции. Для иллюстрации этого, на рис. 3 представлено векторное поле потока во фрагменте исследуемой пористой вставки, согласно которому видно, что исследуемая пористая вставка представляет собой развитую структуру сопряженных каналов, по которым поток проходит по пути наименьшего сопротивления, огибая проволоочки.

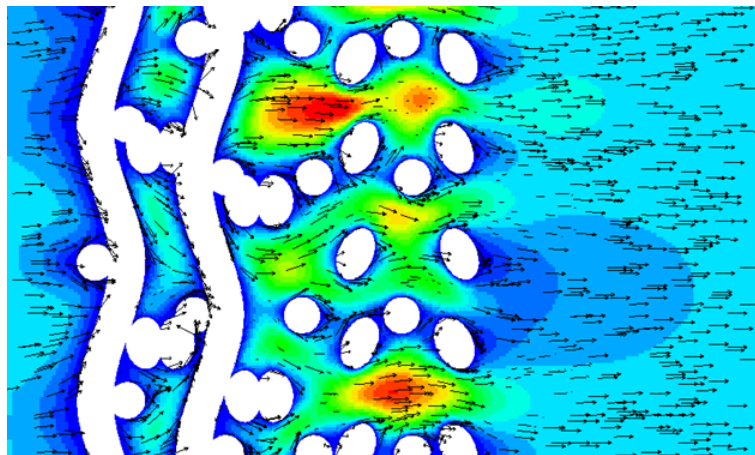


Рис. 3. Векторное поле на фрагменте пористой вставки (расчет в ЛОГОС [4] при н.у.

В проведенных численных исследованиях было рассмотрено ламинарное течение, реальное же течение как правило носит турбулентный характер. Моделирование турбулентных течений в пористых вставках на микроуровне в полномасштабной постановке в настоящее время не представляется возможным. Поэтому такое моделирование проводится по макромоделям.

Анализируемая неоднородность имеет значительный градиент скорости, который оказывает существенное влияние на однородность потока на протяжении порядка 50 характерных диаметров трубы [3]. Создавая дополнительное гидравлическое сопротивление в потоке в виде пористой вставки, можно оказать существенное влияние на профиль скорости (рис. 4). Из распределения видно, что градиент скорости существенно снижается за регионом открытопористой структуры.

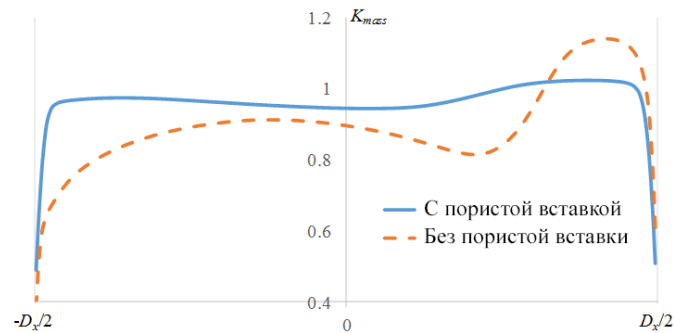


Рис. 4. График распределения отношения модуля скорости к массовой скорости по оси симметрии для расчетов с пористым регионом и без него

Литература

1. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика : учебное пособие : в 10 т. Т. VI : Гидродинамика. 3-е изд., перераб. Москва : Наука : Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. 736 с.
2. Балабина Т. Ю., Дерюгин Ю. Н., Кудряшов Е. А. Численное моделирование турбулентного течения в канале с коленом // Журнал Средневолжского математического общества. 2024. Т. 26, № 4. С. 1-18. DOI: 10.15507/2079-6900.26.202404.
3. Фихтенгольц Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. Т. I. Москва : Наука, 1969. 607 с.
4. Козелков А. С., Дерюгин Ю. Н., Зеленский Д. К. и др. Многофункциональный пакет программ ЛОГОС: физико-математические модели расчета задач аэро-, гидродинамики и тепломассопереноса. Саров : РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013. 67 с.

MSC 76D05

Application of multi-scale models in numerical flow study in a curved channel with porous body

T.Y. Balabina, Yu.N. Deryugin

FSUE RFNC – VNIIEF

Abstract: This paper presents the results of numerical modeling in macro and micro models. At the microscale, elementary physical processes through a porous insert that occur in continuous space and time are investigated. Based on this micro-modeling, the filtration characteristics of the porous insert for the macromodel were determined. Macromodeling uses an enlarged discretization of space by functional feature to study the flow in a curved channel. The effect of porous insert on reduction of flow inhomogeneities is evaluated by macromodel. Results of numerical study of structure of turbulent flows behind the elbow are given. The problem of reducing pulsation disturbances of the flow occurring in the gas-dynamic path behind the elbow using a porous insert is considered. Current calculations were based on the LOGOS software package.

Keywords: numerical modeling, porous media, filtration equation, Forchheimer model, LOGOS.

References

1. Landau L. D., Lifshitz E. M. Teoreticheskaya fizika : uchebnoe posobie : v 10 t. T. VI : Gidrodinamika [Theoretical Physics : Textbook : in 10 vols. Vol. VI : Hydrodynamics]. 3rd ed., rev. Moscow : Nauka : Gl. red. fiz.-mat. lit., 1986. 736 p. (in Russian)
2. Balabina T. Yu., Deryugin Yu. N., Kudryashov E. A. Chislennoe modelirovanie turbulentnogo techeniya v kanale s kolenom [Numerical simulation of turbulent flow in an elbow channel] // Zhurnal Srednevolzhskogo matematicheskogo obshchestva [Journal of the Middle Volga Mathematical Society]. 2024. Vol. 26, no. 4. P. 1-18. DOI: 10.15507/2079-6900.26.202404. (in Russian)
3. Fikhtengol'ts G. M. Kurs differentsial'nogo i integral'nogo ischisleniya. T. I [Course of Differential and Integral Calculus. Vol. I]. Moscow : Nauka, 1969. 607 p. (in Russian)
4. Kozelkov A. S., Deryugin Yu. N., Zelenskii D. K. et al. Mnogofunktsional'nyi paket programm LOGOS: fiziko-matematicheskie modeli rascheta zadach aero-, gidrodinamiki i teplomassoperenosa [Multifunctional LOGOS software package: physical and mathematical models for solving problems of aero-, hydrodynamics and heat-mass transfer]. Sarov : RFYaTs-VNIIEF, 2013. 67 p. (in Russian)