

УДК 62–405.8+532.5+519.711

И.И. Митричев, А.С. Шаймарданов, А.В. Женса, Э.М. Кольцова

Российский Химико-Технологический Университет им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ РЕЖИМОВ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА СКВОЗЬ СЛОЙ ВЫСОКОПОРИСТОГО ЯЧЕИСТОГО МАТЕРИАЛА

The purpose of the work was to define the boundaries of existence of different flow regimes, the calculation and subsequent analysis of changes in the characteristics of turbulent flow, depending on the flow rate. The correlation between the hydrodynamic resistance of different pore size samples and the mean flow velocity was obtained. The critical Reynolds number for γ - Al_2O_3 -foam samples was calculated.

Целью работы являлось определение границ существования различных режимов течения газового потока, а также расчет и последующий анализ изменения характеристик турбулентного течения в зависимости от скорости потока. Построена зависимость гидродинамического сопротивления крупноячейкового и мелкоячейкового образцов ВПЯМ от линейной скорости потока. Определено критическое значение числа Рейнольдса, при котором начинается переход от ламинарного режима течения к турбулентному.

Для расчёта характеристик турбулентного течения газа сквозь слой высокопористого ячейкового материала построена модель участка ВПЯМ (см. рис. 1), состоящая из 170 репрезентативных ячеек, уложенных в 4 слоя. Ячейка модели, соответствующая ячейке (поре) реального образца ВПЯМ, представляет собой сферу с 12 отсечёнными шаровыми сегментами.

Для моделирования движения вязкой среды численно решались осредненные по Рейнольдсу трехмерные уравнения Навье-Стокса. Для замыкания модели и определения рейнольдсовских напряжений использовалась стандартная k - ϵ модель турбулентности:

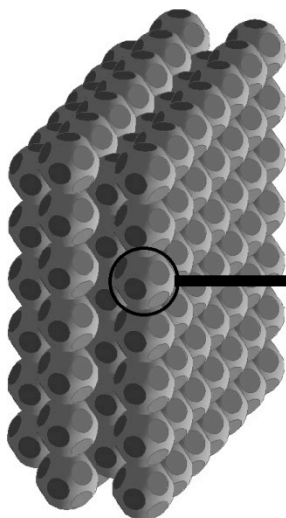


Рис. 1. Геометрическая модель: участок ВПЯМ и ячейка ВПЯМ

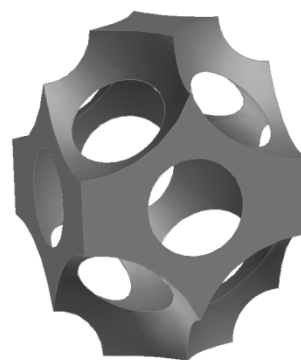


Рис. 2. Элементарный объём, обеспечивающий укладку пространства

– уравнение для кинетической энергии турбулентности k :

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k, \quad (1)$$

где G_k – производство кинетической энергии турбулентности из-за градиентов скоростей; G_b – производство кинетической энергии турбулентности из-за плавучести; Y_M – член, учитывающий дилатацию диссипации энергии при сверхзвуковых течениях; μ_t – турбулентная вязкость, $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$.

– уравнение для диссипации кинетической энергии турбулентного движения ε :

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon. \quad (2)$$

По результатам численного эксперимента (длина слоя $L = 70$ мм, пористость $\Pi = 0,9$) построена зависимость (см. рис. 3) гидравлического сопротивления крупноячеистого (диаметр ячеек $d_y = 2,109$ мм) и мелкоячеистого ($d_y = 1$ мм) ВПЯМ от скорости газа (воздуха). Полученные зависимости согласуются с данными эксперимента [1].

Установлено, что данная зависимость может быть описана во всём диапазоне скоростей двучленным уравнением вида $\Delta P(u) = Au^2 + Bu$, где $A = 150,11$, $B = -38,026$ для крупноячеистого образца и $A = 287,17$, $B = -129,07$ – для мелкоячеистого; начальный линейный участок, соответствующий ламинарному режиму течения, незначителен.

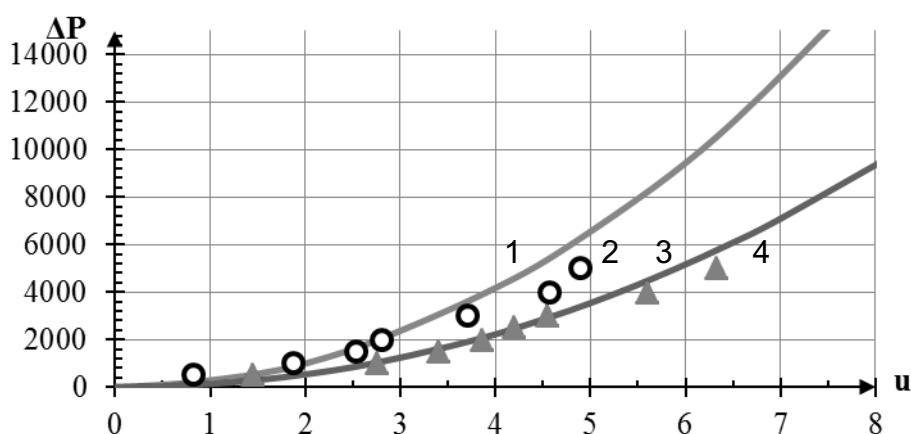


Рис. 3. Зависимость перепада давления на слое крупноячеистого ВПЯМ от скорости воздуха, $d_y = 2,109$ мм, длина слоя $L = 70$ мм, пористость $\Pi = 0,9$:
 1 – расчет по модели, мелкоячеистый ВПЯМ ($d_y = 1$ мм),
 2 – экспериментальные данные [1], мелкоячеистый ВПЯМ ($d_y = 1$ мм),
 3 – расчет по модели, крупноячеистый ВПЯМ ($d_y = 2,109$ мм),
 4 – экспериментальные данные [1], крупноячеистый ВПЯМ ($d_y = 2,109$ мм)

Построена зависимость коэффициента гидравлического трения от числа Рейнольдса Re . Величину Re для ячейки определяли из выражения:

$$Re = \frac{u_{\text{я}} d_{\text{я}} \rho}{\mu}, \quad (3)$$

где ρ – плотность газовой среды; $u_{\text{я}}$ – средняя скорость газа в центральном сечении ячейки; $d_{\text{я}}$ – диаметр ячейки; μ – динамическая вязкость газа;

Коэффициент гидравлического трения λ можно вычислить из формулы Дарси-Вейсбаха:

$$\lambda = \frac{2d_{\text{я}} \Delta P}{\rho u_{\text{я}}^2 L}, \quad (4)$$

где L – длина моделируемого образца ВПЯМ (здесь 70 мм).

По зависимости коэффициента гидравлического трения от числа Рейнольдса, построенной в логарифмических координатах (см. рис. 4), определено критическое значение числа Рейнольдса, при котором начинается переход от ламинарного течения к турбулентному (наблюдается отклонение от прямолинейной зависимости в логарифмических координатах). Для крупноячейчатого ВПЯМ значение $Re_{\text{кр}}$, приблизительно равно 20. При этом скорость газа составляла 0,108 м/с, что хорошо согласуется с экспериментальными данными [2]. При $Re_{\text{кр}}$ средняя скорость в ячейках модели равнялась 0,143 м/с. Об инвариантности $\lambda(Re)$ (окончание переходного режима течения, развитая турбулентность) для крупноячейчатого ВПЯМ можно говорить, начиная с $Re_m > 350$. При этом скорость газа в потоке $u > 1,62$ м/с.

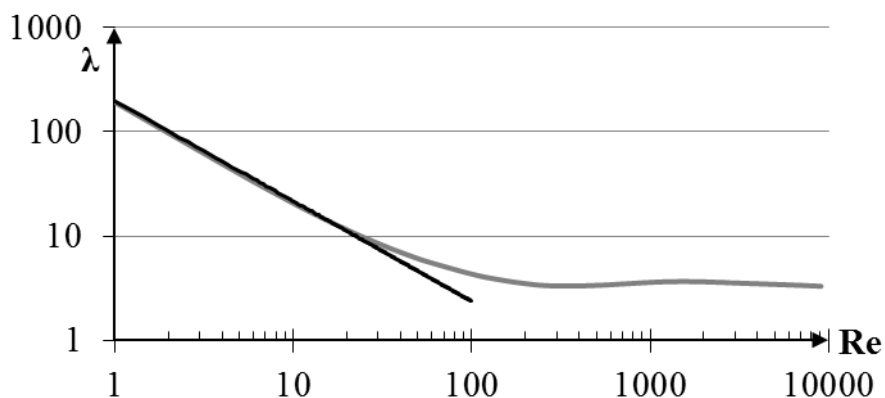


Рис. 4. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса

Для мелкоячейчатого образца $Re_{\text{кр}} \approx 8,5$. При этом скорость газа составляла $u = 0,105$ м/с. Развитое турбулентное течение начиналось с $Re_m > 240$, при этом скорость газа в потоке $u > 2,76$ м/с. Значение скорости в ячейке при этом принимало значение 0,13 м/с.

Сравнивая переходные значения критерия Рейнольдса с аналогичными значениями для крупноячейчатых образцов, легко заметить, что турбулентность возникает и устанавливается при более низких значениях критерия Рейнольдса для мелкоячейчатых образцов. Турбулентность зарождается

при близких значениях средних скоростей газа в ячейке, для мелкочаеистого ВПЯМ это значение чуть ниже. Развитое турбулентное течение устанавливается в мелкочаеистом ВПЯМ при больших скоростях (при уменьшении гидравлического диаметра более чем в 2 раза, значение критерия Рейнольдса Re_m уменьшилось менее, чем на треть, следовательно скорость в ячейке значительно выше).

Так как структура ВПЯМ представляет собой многократные расширения (поры) и сужения (отверстия между порами), можно произвести сравнение полученных значений с близким к высокопористой структуре классом каналов – щелями переменного сечения диффузор-конфузорного типа, а также другими пористыми средами. В опытах Н.Г. Ломизе, приведённых в [3], среднее значение $Re_{кр.}$, при котором начинался переход к турбулентному течению для пористых сред (грунтов) составляло $Re_{кр} = 0,2$, для щелей диффузор-конфузорного профиля $Re_{кр} = 0,2 - 240$. Там же отмечено, что в отличие от прямолинейных щелей и гладких труб, где начало переходного режима сопряжено с резким всплеском на графике зависимости $\lambda = f(Re)$, для шероховатых трещин и щелей отклонение этой зависимости, построенной в логарифмических координатах, «...от линейного закона начинается очень плавно». Для каналов диффузор-конфузорной геометрии развитое турбулентное течение устанавливалось при Re от 300 до 2000. Таким образом, данные [3] совпадают с полученными нами и подтверждают наши результаты.

Получены зависимости характерных размеров наиболее крупных и наиболее мелких турбулентных вихрей от скорости газа в потоке. Для крупноячеистого ВПЯМ эти зависимости имеют вид кривых с максимумом. Наибольший размер вихрей (0,77 мм) наблюдается при скоростях порядка 2 м/с, с дальнейшим ростом скорости его значение уменьшается. Масштабы мелких вихрей изменяются значительно медленней масштабов крупных вихрей, при скорости в 6 м/с достигают максимального значения и, далее, начинают медленно уменьшаться. Уменьшение размера вихрей при увеличении скорости связано с пространственными и временными ограничениями. Для мелкочаеистого ВПЯМ размер наиболее крупных турбулентных структур с ростом скорости изменяется гораздо медленнее, и выходит на стационар (значение 0,28 мм) при скорости потока снаружи ВПЯМ, равной 4 м/с. Колмогоровский масштаб длины (размеры мелких вихрей) также с ростом скорости изменяется гораздо медленнее.

Установлено, что наибольшее время жизни мелких вихрей соответствует скоростям порядка 0,1 – 0,2 м/с для крупноячеистого образца и 1,53 – 1,6 м/с для мелкочаеистого, то есть переходному режиму течения в слое ВПЯМ. С увеличением скорости движения газа дальнейшее развитие турбулентности происходит в направлении уменьшения времени жизни мелких вихрей, и процесс диссипации кинетической энергии в тепловую энергию происходит быстрее.

Интенсивность турбулентности, характеризующая вклад пульсационной составляющей вектора скорости, для крупноячеистого образца до значений скорости воздуха в 9 м/с стремится к постоянной величине в 54 %. Затем интенсивность турбулентности начинает плавно снижаться. Это свя-

зано с тем, что пульсационная составляющая скорости начинает расти медленнее, чем средняя, из-за пространственных ограничений. Для мелкоячеистого ВПЯМ интенсивность турбулентности в рассматриваемом диапазоне скоростей с увеличением скорости стремилась к максимальному значению в 57,5 %.

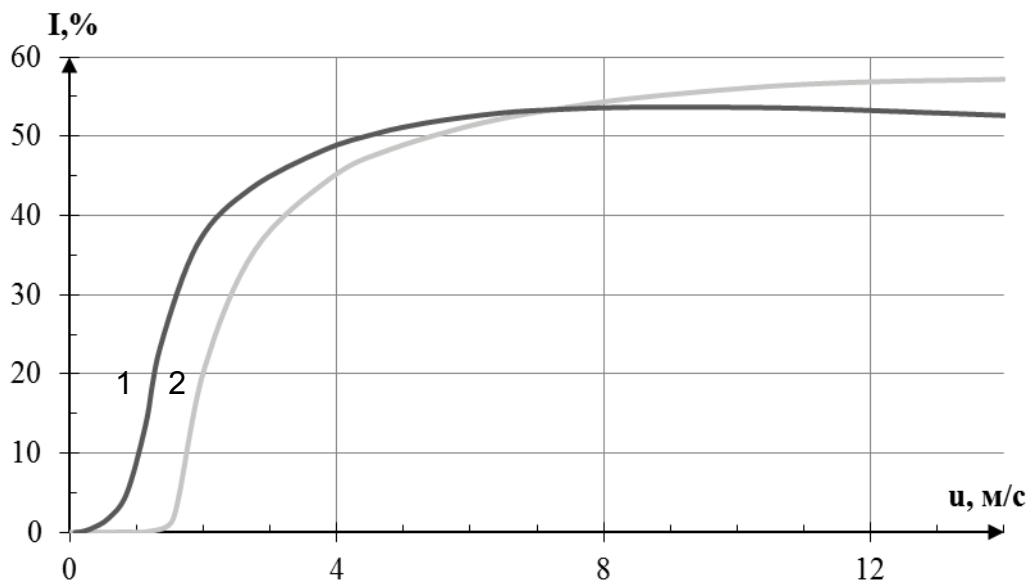


Рис. 5. Зависимость интенсивности турбулентности от скорости газового потока: 1 – крупноячеистый ВПЯМ ($d_{\text{я}} = 2,109$ мм), 2 – мелкоячеистый ВПЯМ ($d_{\text{я}} = 1$ мм)

Работа поддержана гос. контрактом Министерства образования и науки РФ (П 961) и грантом РФФИ (11-08-00979-а).

Библиографические ссылки

1. Тищенко С.В. Гидравлическое сопротивление шликерного ВПЯМ / С.В. Тищенко, А.И. Козлов, В.Н. Грунский, А.В. Беспалов. – Химическая промышленность сегодня, 2005, № 2. – С. 42–51.

2. Макаров А.А. Очистка газовых выбросов от аэрозолей агрессивных, токсичных и радиоактивных соединений высокопористой керамикой [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.galvanicworld.com/articles/articles_178.html (дата обращения 26.12.2011).

3. Требин Г.Ф. Фильтрация жидкостей и газов в пористых средах. М.: Гостоптехиздат, 1959. – 161 с.