

УДК 532.685: 536.242

Экспериментальное исследование фильтрационных характеристик высокопористых ячеистых материалов *

С.Г. Миронов^{1,2}, В.А. Колотиллов¹, А.А. Маслов^{1,2}

¹Новосибирский государственный университет

²Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

E-mail: mironov@itam.nsc.ru

Приведены результаты измерений скорости фильтрации воздуха в высокопористых ячеистых материалах для условий больших скоростей фильтрации и пониженной плотности воздуха. Определены величины вязкостного и инерционного коэффициентов квадратичной зависимости градиента давления от скорости фильтрации в пористых материалах для различных условий течения в порах.

Ключевые слова: высокопористые ячеистые материалы, гидродинамика, влияние геометрии пористого материала и плотности газа.

Введение

Проницаемые пористые материалы широко используются в различных областях современной техники и технологии в качестве фильтров и конструкционных материалов для охлаждающих трактов теплонапряженных элементов различных аппаратов. В последнее время проницаемые пористые материалы нашли применение для управления обтеканием тел, движущихся с высокой скоростью. В частности, проницаемые пористые материалы на поверхности позволяют продлить ламинарный режим течения в пограничном слое и снизить сопротивление трения [1–3]. Экспериментальные исследования [4–7] и численное моделирование [8, 9] показали, что с помощью проницаемых пористых материалов можно снижать волновое сопротивление тел в сверхзвуковом потоке и создавать моменты аэродинамические сил. В трубных экспериментах [4] было получено значительное (до 40 %) снижение волнового сопротивления модели цилиндра с передней вставкой из высокопористого ячеистого материала (ВПЯМ), а несимметричный нагрев передней вставки из ВПЯМ в сверхзвуковом потоке [7] позволил создать поперечные аэродинамические силы при сверхзвуковом обтекании модели. Эти исследования были проведены при числе Маха $M_\infty = 4,85$ в потоке низкой плотности, когда максимальное давление на входе в пористый материал составляло $7 \cdot 10^3$ Па, а минимальное давление

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 012-08-00457 и № 015-08-00) и гранта Правительства РФ для поддержки исследований под руководством ведущих ученых (договор № 14Z50.31.0019).

на выходе из пористого материала — $\sim 2 \cdot 10^2$ Па. Перспектива дальнейших исследований в этом направлении связана с применением численного моделирования процесса обтекания и оптимизации схем управления. Имеющиеся в настоящее время данные по гидродинамическим характеристикам ВПЯМ [10–13] получены для малых скоростей фильтрации газа и атмосферных условий по давлению, что связано с практическими задачами промышленных технологий. Кроме того, данные [10–13] получены для относительно протяженных образцов ВПЯМ, которые можно рассматривать в качестве сплошной среды благодаря содержащемуся по всей их длине достаточно большому числу ячеек. В то же время в работах [4, 8, 9] было показано, что основной эффект снижения волнового сопротивления создается вставками ВПЯМ малой длины. При численном моделировании расчеты базировались на квадратичном законе фильтрации в пористом материале, который либо был един для всего объема пористой вставки [8], либо имел две различающиеся зависимости в узкой передней и протяженной задней областях пористого материала [9]. Данные о фильтрационных характеристиках пористых материалов для условий высоких скоростей течения и низких плотностей воздуха позволили бы оценить применимость квадратичных законов фильтрации для задач численного моделирования сверхзвукового обтекания тел с высокопористыми газопроницаемыми вставками.

В настоящей работе представлены результаты исследования фильтрационных характеристик ВПЯМ для условий работ [4, 8, 9], т.е. для условий высоких скоростей течения и низких плотностей воздуха.

Эксперимент

В ходе проведенных исследований получены результаты для высокопористых образцов ячеистого никеля (величина объемной пористости $\varepsilon = 0,95$) с размерами пор $d = 1$ и 3 мм. Изучены образцы пористого материала диаметром $D = 14$ мм и длиной L от 5 до 48 мм. Пространственная структура образцов соответствует структурам ВПЯМ, описанным в работах [12, 14], и показана на рис. 1. Материалы с аналогичной пространственной структурой и диаметром образцов D использовались в аэродинамических экспериментах [4, 7].

В экспериментах определялась зависимость средней скорости фильтрации воздуха U от перепада давления на образце длиной $\Delta P/L$ при одномерном течении через пористый материал, установленный в круглом канале. Экспериментальная установка представляла собой два объема ($V_1 = 0,235$ м³ и $V_2 = 0,016$ м³), соединенных перекрываемым каналом с пористым образцом. Предварительно воздух из обоих объемов откачивался вакуумным насосом до давления менее 2 Па, далее канал перекрывался быстродействующим вакуумным затвором и в больший объем напускался воздух до заданного давления. Затем затвор мгновенно открывался и давление в обоих объемах выравнивалось при перетекании воздуха через пористый материал. Изменение разницы давлений ΔP от времени t

регистрировалось дифференциальными датчиками давления ТДМ2-ИВ2 и ТДМ4-ИВ1 и через АЦП сигнал датчиков записывалось в память ПЭВМ. Скорость фильтрации $U_{\text{несж}}$ находилась из соотношения

$$\frac{d(\Delta P)}{dt} = \frac{\pi D^2 P_1 U_{\text{несж}}}{4V_2}, \quad (1)$$

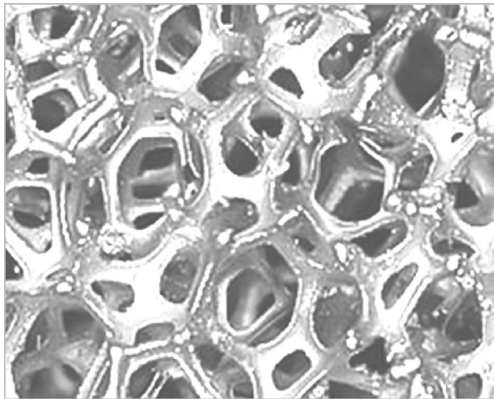


Рис. 1. Фотография структуры ячеистого материала.

здесь P_1 — среднее давление в объеме V_1 , вычисленное по значениям давлений, полученных до и после процесса выравнивания этих давлений. Из-за большой разницы в величине объемов уменьшение начального давления P_{\max} в объеме V_1 не превышало 7%. Соотношение (1) верно в предположении изотермичности процесса перетекания, которое проверялось в специальных измерениях и при пренебрежении сжимаемостью воздуха. Так как скорости фильтрации были достаточно велики, особенно для образцов малой длины, то влияние сжимаемости воздуха учитывалось как поправка к скорости фильтрации несжимаемого газа $U_{\text{несж}}$ с использованием соотношения

$$U = U_{\text{несж}} \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} \cdot \frac{U_{\text{несж}}^2}{c^2 - [(\gamma - 1)/2] \cdot U_{\text{несж}}^2} \right)^{1/\gamma - 1}. \quad (2)$$

Здесь γ — показатель адиабаты воздуха, c — скорость звука в объеме V_1 , равная скорости звука при комнатной температуре. Для вычисления производной от давления по времени в соотношении (1) использовалась аппроксимация экспериментальных зависимостей $\Delta P(t)$ полиномами 8-й степени. Конечным результатом измерений являлись зависимости $\Delta P/L(U)$ для всех образцов пористого материала и начальных давлений (плотностей) воздуха. Эксперименты проводились при температуре воздуха 295 К, начальное давление P_{\max} в большом объеме V_1 варьировалось в пределах от 10^5 до 500 Па. Вместе с величиной P_{\max} изменялась и плотность ρ потока воздуха в порах ВПЯМ в диапазоне от 1,19 до 0,0059 кг/м³.

Результаты и обсуждение

На рис. 2 приведены зависимости перепада давления $\Delta P/L$ на пористых образцах различной длины для двух диаметров пор d от скорости фильтрации U , а также от числа Рейнольдса Re_d , вычисленного по диаметру пор, для начального перепада давления $P_{\max} = 10^5$ Па. Для сравнения на графиках пунктирной кривой приведены данные, полученные по эмпирическим зависимостям для коэффициентов при вязком и инерционном

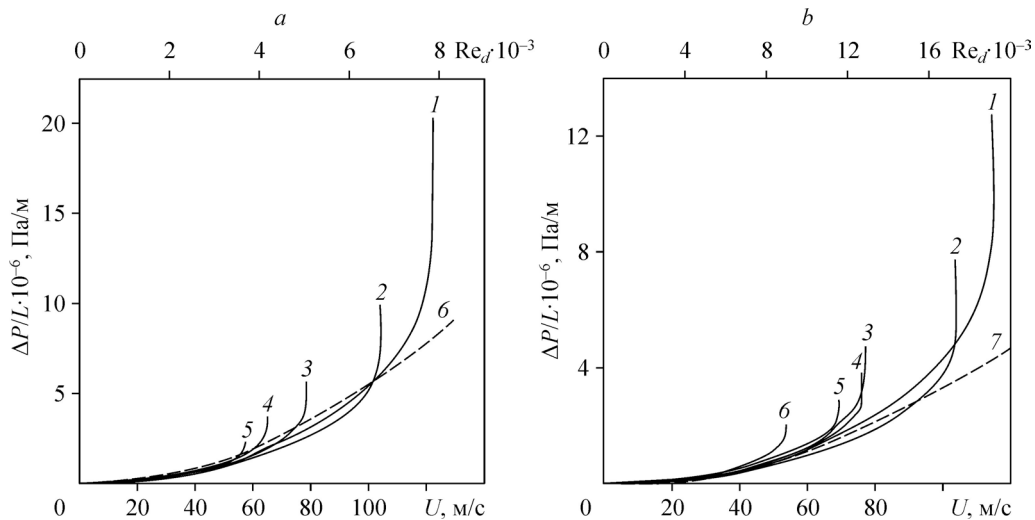


Рис. 2. Зависимости перепада давления на образцах пористого материала от скорости фильтрации воздуха.

$P_{\max} = 10^5$ Па; а — $d = 1$ мм, $L = 5$ (1), 10 (2), 18 (3), 26 (4), 42 (5) мм, данные работы [10] (6);

б — $d = 3$ мм, $L = 8$ (1), 13 (2), 21 (3), 26 (4), 34 (5), 48 (6) мм, данные работы [10] (7).

членах квадратичной зависимости Дарси–Форхгеймера из работы [10]. Графики показывают, что по достижении определенной величины, зависящей от длины образца L , скорость фильтрации U перестает увеличиваться несмотря на рост $\Delta P/L$. Скорее всего, это объясняется формированием в области выходного сечения пористого материала сверхзвукового течения, где скорость уже не зависит от общего перепада давления на образце. Измерения полного напора и статического давления в потоке воздуха за пористым образцом при перепаде давления на этом образце, составляющем более 0,529 от величины начального давления, показали, что число Маха равно величине $M = 1,35$, что соответствует расчетному числу Маха при поджатии потока пористым материалом с величиной объемной пористости $\varepsilon = 0,95$. Сверхзвуковое течение исчезает, когда перепад давления становится ниже величины 0,529 начального и течение воздуха в порах переходит на дозвуковой режим по всей длине образца.

На рис. 2 также видно, что для больших величин L все зависимости хорошо совпадают друг с другом для малых величин перепада давления и скорости фильтрации вдали от перехода к сверхзвуковому течению. Заметное отклонение наблюдается только для малых величин L . Максимальная скорость фильтрации на графиках коррелирует с абсолютной длиной образцов, а не с длиной, нормированной на диаметры пор. Учитывая 15 %-ую точность аппроксимации эмпирическими формулами [10], можно отметить хорошее описание ими кривых на рис. 2 в достаточно широком диапазоне скоростей, хотя данные [10] были получены для скоростей фильтрации менее 5 м/с. С другой стороны, использование аналогичных эмпирических формул [12] для вычисления коэффициентов квадратичной зависимости дает почти двукратное расхождение с кривыми на рис. 2 в области низких скоростей фильтрации.

Для образцов пористого материала различной длины и диаметра пор были выполнены измерения при понижении начального давления P_{\max} от атмосферного до 500 Па. На рис. 3 приведены примеры зависимости нормированного перепада давления $\Delta P/P_{\max}$ от скорости фильтрации воздуха для различных величин начального давления P_{\max} для образцов большой длины. Такое представление данных измерений позволяет наблюдать качественное изменение характера кривых. Из графиков видно, что с уменьшением начального перепада давления зависимости становятся все более линейными, а максимальная скорость фильтрации U незначительно падает.

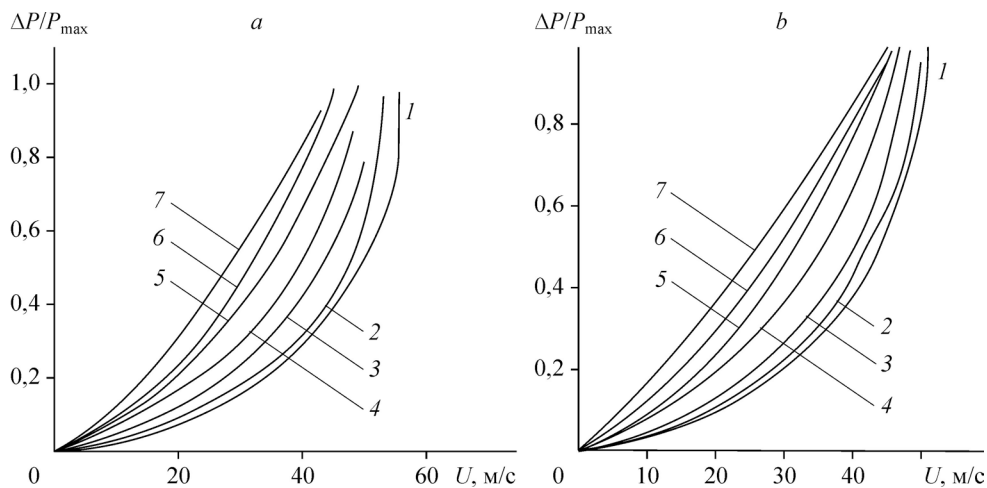


Рис. 3. Зависимости нормированного перепада давления на образцах пористого материала от скорости фильтрации воздуха при различных начальных давлениях воздуха P_{\max} .
 а — $d = 1$ мм, $L = 42$ мм: 10^5 (1), $2,5 \cdot 10^4$ (2), $6,5 \cdot 10^3$ (3), $2 \cdot 10^3$ (4), $1,5 \cdot 10^3$ (5), 10^3 (6), $5 \cdot 10^2$ (7) Па;
 б — $d = 3$ мм, $L = 48$ мм: 10^5 (1), $2,5 \cdot 10^4$ (2), $6,5 \cdot 10^3$ (3), $2 \cdot 10^3$ (4), $1,5 \cdot 10^3$ (5), 10^3 (6), $5 \cdot 10^2$ (7) Па.

С использованием экспериментальных данных были вычислены коэффициенты α и β при вязком и инерционном членах квадратичной зависимости Дарси–Форхгеймера

$$\Delta P/L = \alpha \mu U + \beta \rho U^2, \quad (3)$$

где μ и ρ соответственно динамическая вязкость и плотность воздуха. Для этого зависимости $\Delta P/L(U)$ аппроксимировались полиномом второй степени и коэффициент при линейном члене делился на величину μ , а при квадратичном члене на величину ρ , соответствующую давлению P_{\max} . Так как с помощью квадратичного полинома не удается аппроксимировать всю зависимость, то аппроксимировался только участок от нуля до некоторого значения скорости фильтрации, для которого аппроксимирующий полином имел хорошее согласование со всеми экспериментальными зависимостями.

На рис. 4 приведены примеры зависимости коэффициентов α и β от максимального числа Рейнольдса течения в порах Re_d^{\max} для длинных образцов ВПЯМ с диаметром пор 1 мм (рис. 4а, 4б) и 3 мм (рис. 4с, 4д), вычисленные для трех диапазонов скоростей фильтрации: $0 \div 20$, $0 \div 30$ и $0 \div 40$ м/с. На рис. 5 приведены примеры зависимости

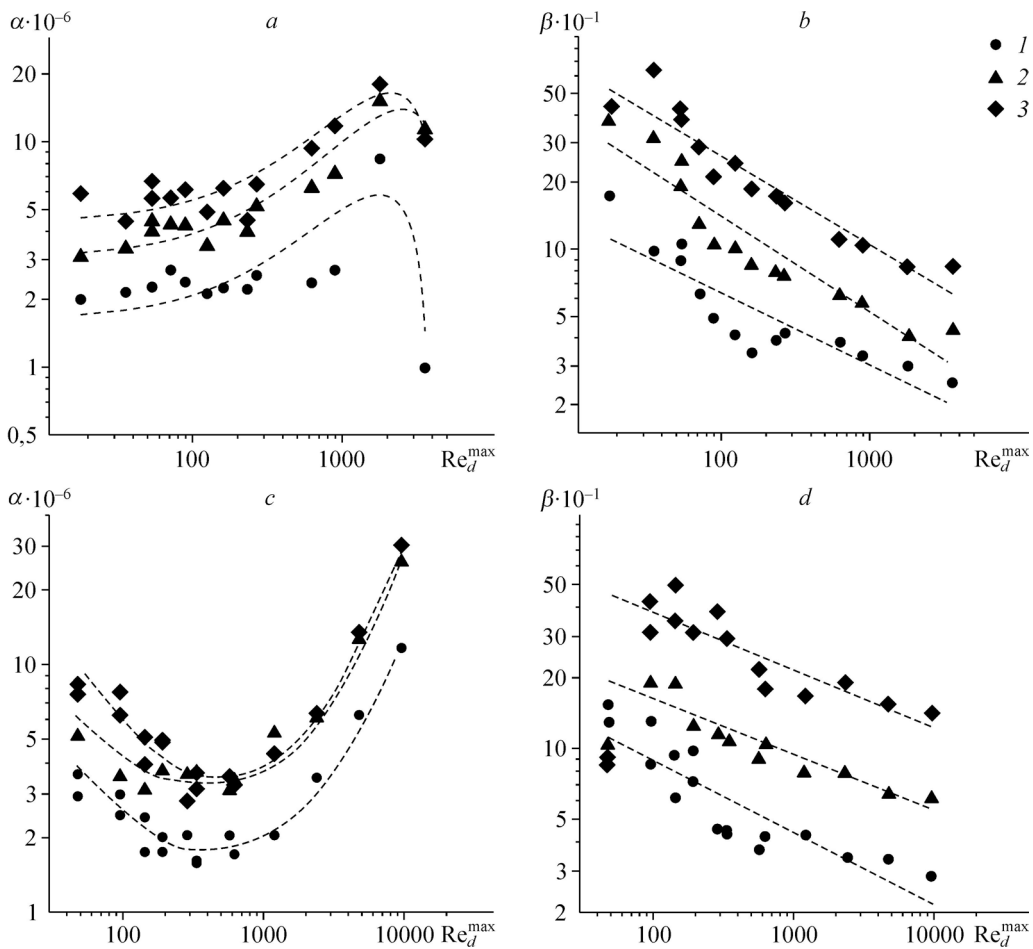


Рис. 4. Зависимости коэффициентов α (а, с) и β (b, d) от максимального числа Рейнольдса течения воздуха в порах Re_d^{\max} для трех диапазонов скорости фильтрации.

a, b — $d = 1$ мм, $L = 42$ мм; c, d — $d = 3$ мм, $L = 48$ мм; $U = 0 \div 20$ (1), $0 \div 30$ (2), $0 \div 40$ (3) м/с.

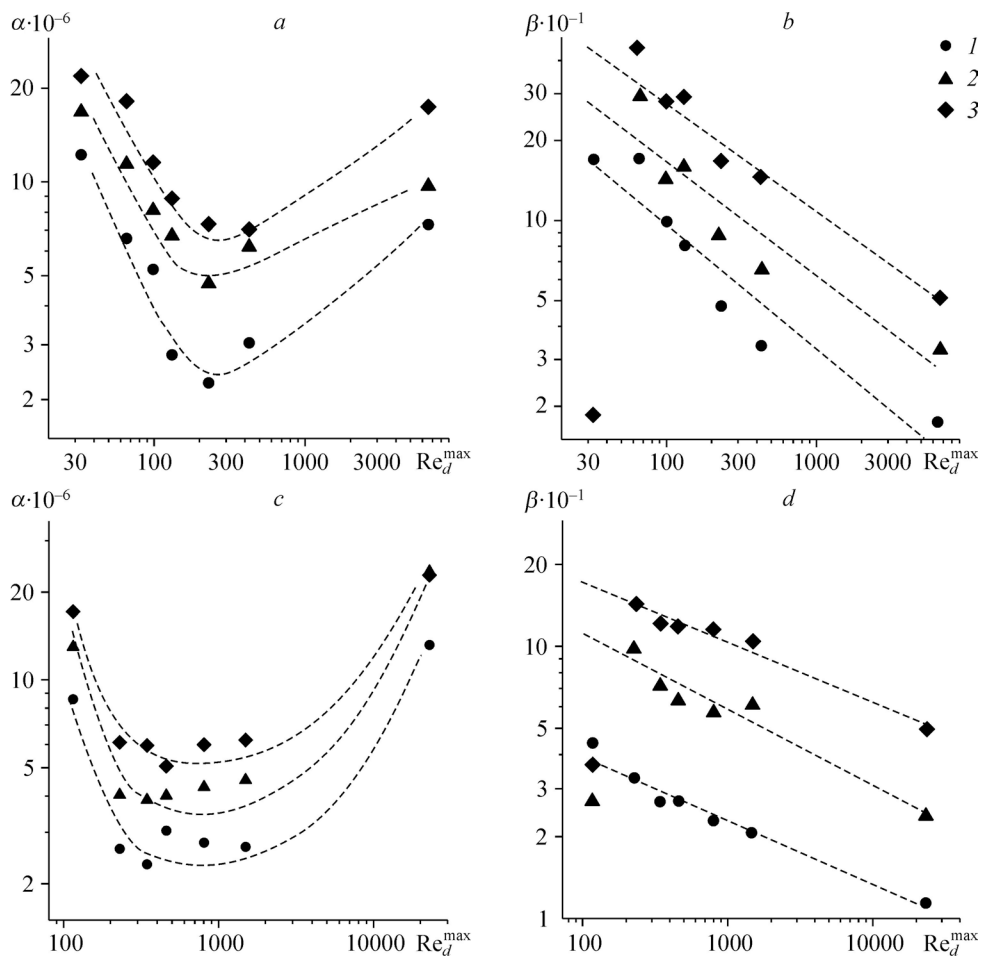


Рис. 5. Зависимости коэффициентов α (a, c) и β (b, d) от максимального числа Рейнольдса течения воздуха в порах Re_d^{\max} для трех диапазонов скорости фильтрации.

a, b — $d = 1$ мм, $L = 10$ мм; c, d — $d = 3$ мм, $L = 8$ мм; $U = 0 \div 40$ (1), $0 \div 60$ (2), $0 \div 80$ (3) м/с.

коэффициентов α и β от максимального числа Рейнольдса Re_d^{\max} для коротких образцов ВПЯМ с диаметром пор 1 мм (рис. 5a, 5b) и 3 мм (рис. 5c, 5d), вычисленные для трех диапазонов скоростей фильтрации: $0 \div 40$, $0 \div 60$ и $0 \div 80$ м/с. Во всех случаях величина Re_d^{\max} определялась по диаметру пор и скорости фильтрации при максимальном начальном перепаде давления на образце.

Из графиков на рис. 4, 5 видно, что зависимости коэффициентов α и β от числа Re_d^{\max} при вариации длины образцов и скоростного диапазона фильтрации качественно близки друг к другу. С расширением скоростного диапазона значения α и β при приближении к предельной скорости фильтрации возрастают, что связано с увеличением крутизны зависимостей $\Delta P/L(U)$ (см. рис. 2). Коэффициент при вязком члене с уменьшением максимального числа Рейнольдса падает и только для низких значений Re_d^{\max} снова несколько увеличивается.

Коэффициент β при инерционном члене с уменьшением максимального числа Рейнольдса слабо возрастает. Поведение коэффициента β хорошо описывается степенной зависимостью $\beta \approx (Re_d^{\max})^{-n}$. Существенное отклонение от нее наблюдается только

для $Re_d^{\max} \cong 30$. Показатель степени n зависит от длины образца и диаметра пор материала. Для длинных образцов $n = 0,264 \pm 0,03$ ($d = 3$ мм) и $n = 0,365 \pm 0,04$ ($d = 1$ мм), для коротких образцов $n = 0,246 \pm 0,03$ ($d = 3$ мм) и $n = 0,435 \pm 0,03$ ($d = 1$ мм). Так как показатель степени n меньше единицы, а плотность воздуха ρ линейно связана с Re_d^{\max} , то влияние квадратичного члена в выражении (3) уменьшается вместе с Re_d^{\max} , что приводит к линейризации зависимостей $\Delta P/P_{\max}(U)$ на рис. 3 при уменьшении величины начального давления P_{\max} .

На рис. 6 приведены зависимости коэффициентов α и β от числа Re_d^{\max} для различной длины образцов ВПЯМ с диаметром пор 1 и 3 мм. Видно, что величины коэффициентов α с уменьшением числа Рейнольдса для всех длин L сначала падают, а затем несколько возрастают аналогично данным, приведенным на рис. 4 и 5. Величины коэффициентов β с уменьшением числа Рейнольдса для всех длин L слабо растут одновременно с величинами показателя n , близкими к вышеприведенным, что также согласуется с рис. 4 и 5. Имеет место общая тенденция к увеличению коэффициентов при росте длины образца, в меньшей степени для α и в большей для β .

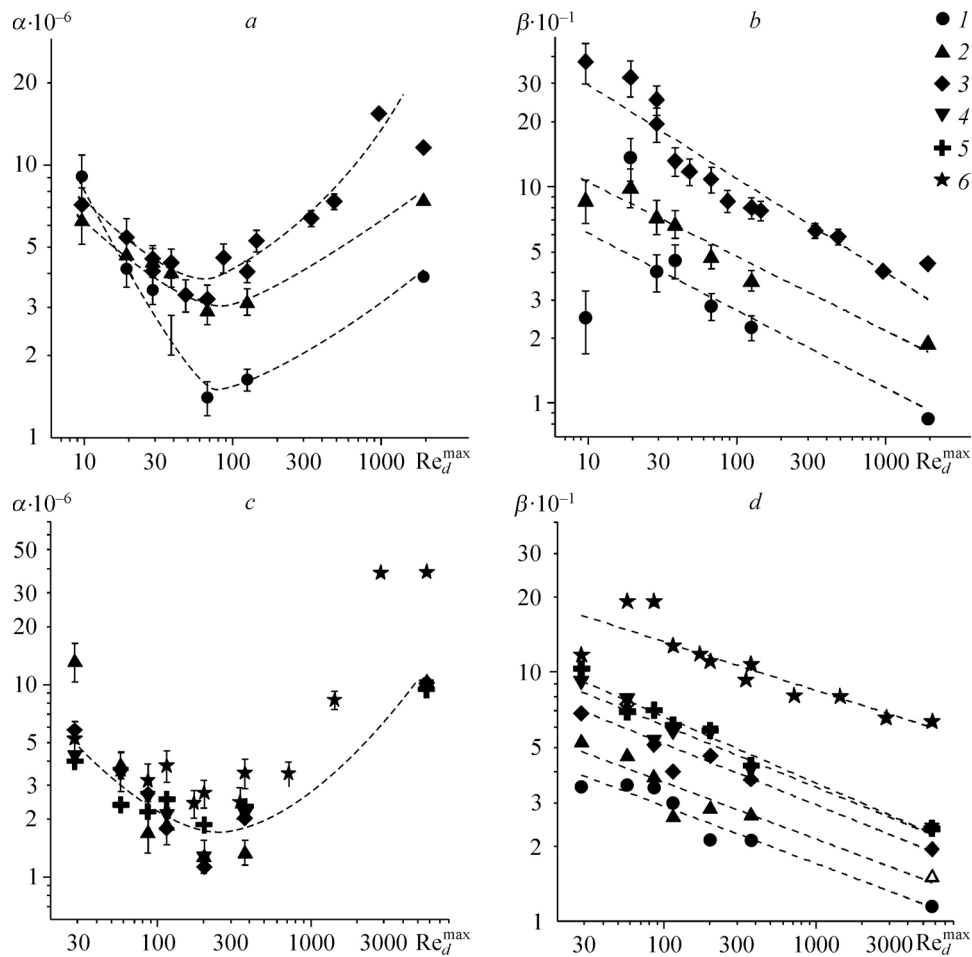


Рис. 6. Зависимости коэффициентов α (a, c) и β (b, d) от максимального числа Рейнольдса течения воздуха в порах Re_d^{\max} для образцов различной длины в диапазоне скорости фильтрации 0–30 м/с. a, b — $d = 1$ мм, $L = 10$ (1), 26 (2), 42 (3) мм; c, d — $d = 3$ мм, $L = 8$ (1), 13 (2), 21 (3), 26 (4), 34 (5), 48 (6) мм.

При уменьшении числа Рейнольдса точность определения величин коэффициентов α и β падает, как это видно на графиках рис. 6. Это связано с увеличением амплитуды шума датчика давления при уменьшении давления воздуха в эксперименте. Другим источником разброса данных является сильная зависимость точности аппроксимации экспериментальных кривых полиномом восьмого порядка от длины аппроксимируемой временной реализации, особенно в области выхода зависимости перепада давления от времени на нулевое значение.

Ниже приведены некоторые соображения для объяснения поведения коэффициентов α и β , зависящих от числа Re_d^{\max} , наблюдаемого на графиках рис. 4–6. Скорее всего, снижение коэффициента α при уменьшении числа Re_d^{\max} связано с сопровождающимся уменьшением величины $\Delta P/L$ на пористых образцах. Последующий подъем коэффициента α объясняется формированием полностью вязкого течения в порах материала при малых числах Re_d^{\max} . Рост коэффициента β при уменьшении числа Re_d^{\max} можно объяснить увеличением толщины вытеснения пограничного слоя на элементах скелета пористого материала и соответствующим увеличением аэродинамического сопротивления. Выявленное в работе поведение коэффициентов α и β при вариации числа Re_d^{\max} качественно согласуется с результатами измерений [9] для ВПЯМ с близкими параметрами по величине пористости и диаметру пор, но полученными для низких скоростей фильтрации.

Анализ данных на рис. 2–6 показывает, что в рамках квадратичного закона Дарси–Форхгеймера представляется сложным единым образом выполнить описание фильтрации воздуха в ВПЯМ, когда в объеме материала в широких пределах изменяется градиент давления, скорость течения в порах и плотность воздуха, что имеет место при двумерном сверхзвуковом обтекании пористого материала. Кроме того, полиномиальные законы фильтрации не предполагают возникновения звуковых зон в пористом материале, которые могут ограничить скорость фильтрации и нарушить непрерывную связь между скоростью фильтрации и градиентом давления в образцах. Данные о фильтрационных характеристиках исследованных в настоящей работе высокопористых материалов демонстрируют проблемы использования континуальных моделей пористых сред для целей численного моделирования сверхзвукового обтекания тел с пористыми вставками. Возможным выходом из положения является численное моделирование сверхзвукового обтекания интегрированной модели с включением скелета пористого материала в расчетную область.

Заключение

Получены данные измерений скорости фильтрации воздуха в ВПЯМ различной длины с величиной пористости $\varepsilon = 95\%$ и диаметром пор 1 и 3 мм в диапазоне перепада давления до 10^5 Па и плотности воздуха $\rho = 0,0059 \div 1,18$ кг/м³. Показано, что в пористом материале возникают зоны со звуковой скоростью течения, которые ограничивают максимальную скорость фильтрации независимо от величины перепада давления по длине образца. Величина максимальной скорости зависит только от абсолютной длины пористого образца. Для атмосферной плотности воздуха участки кривых $\Delta P/L(U)$, аппроксимируемые квадратичной зависимостью, для образцов различной длины хорошо совпадают друг с другом и с данными, полученными для аналогичных материалов при малых скоростях фильтрации. Установлено, что коэффициенты в квадратичных зависимостях, описывающих экспериментальные данные, меняются сложным образом с изменением длины образцов, плотности воздуха, диапазона аппроксимации данных по скорости.

Это создает проблему с использованием квадратичных приближений закона фильтрации ВПЯМ в задачах численного моделирования сверхзвукового обтекания тел с пористыми вставками и выдвигает на первый план метод численного моделирования обтекания скелета пористой вставки.

Список литературы

1. Chokani N., Bountin D.A., Shiblyuk A.N., Maslov A.A. Nonlinear aspects of hypersonic boundary-layer stability on a porous surface // AIAA J. 2005. Vol. 43, № 1. P. 149–155.
2. Fedorov A., Kozlov V., Shiblyuk A., Maslov A., Malmuth N. Stability of hypersonic boundary layer on porous wall with regular microstructure // AIAA J. 2006. Vol. 44, № 8. P. 1866–1871.
3. Маслов А.А., Миронов С.Г., Поплавская Т.В., Цырюльников И.С., Кириловский С.В. Воздействие звукопоглощающих материалов на интенсивность возмущений в ударном слое пластины, расположенной под углом атаки // Прикладная механика и техническая физика. 2012. Т. 53, № 2. С. 21–32.
4. Фомин В.М., Миронов С.Г., Сердюк К.М. Снижение волнового сопротивления тел в сверхзвуковом потоке пористыми материалами // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35, вып. 3. С. 39–45.
5. Фомин В.М., Запругаев В.И., Локотко А.В., Волков В.Ф. Влияние газопроницаемых участков поверхности на аэродинамические характеристики тела вращения при сверхзвуковых скоростях // Доклады РАН. 2009. Т. 427, № 5. С. 628–627.
6. Фомин В.М., Запругаев В.И., Локотко А.В., Волков В.Ф., Луцкий А.Е., Меньшов И.С., Максимов Ю.М. Аэродинамика тел вращения с газопроницаемыми участками поверхности // Прикладная механика и техническая физика. 2010. Т. 51, № 1. С. 79–88.
7. Миронов С.Г., Цырюльников И.С., Маслов А.А. Управление аэродинамическими силами с помощью газопроницаемых пористых материалов // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40, вып. 19. С. 83–88.
8. Бедарев И.А., Миронов С.Г., Сердюк К.М., Федоров А.В., Фомин В.М. Физическое и математическое моделирование сверхзвукового обтекания цилиндра с пористой вставкой // Прикладная механика и техническая физика. 2011. Т. 52, № 1. С. 13–23.
9. Kirilovskiy S.V., Mironov S.G., Poplavskaya T.V. Numerical modeling of the flow around a cylinder with a gas-permeable porous insert in front // Abstracts of Intern. Part. II. Novosibirsk: Avtograf, 2014. P. 95–96.
10. Гортышов Ю.Ф., Муравьев Г.Б., Надыров И.Н. Экспериментальное исследование течения и теплообмена в высокопористых структурах // ИФЖ. 1987. Т. 53, № 3. С. 357–361.
11. Гортышов Ю.Ф., Надыров И.Н., Ашимхин С.Р., Куневич А.П. Теплообмен при течении однофазного и вскипающего охладителя в канале с пористой вставкой // ИФЖ. 1991. Т. 60, № 2. С. 252–258.
12. Беклемышев А.М. Структурные и гидравлические свойства высокопористых ячеистых материалов на металлической основе. Пермь: Из-во ПГТУ, 1998. 225 с.
13. Кирсанов Ю.А., Назипов Р.А., Данилов В.А. Теплообмен пористого тела с однофазным потоком теплоносителя // Теплофизика высоких температур. 2011. Т. 49, № 3. С. 235–242.
14. Пористые проницаемые материалы: справ. изд. / Под. ред. С.В. Белова. М.: Металлургия, 1987. 335 с.

Статья поступила в редакцию 26 февраля 2015 г.