

С. Г. Миронов, Т. В. Поплавская, С. В. Кириловский

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН
ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия*

*Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия*

mironov@itam.nsc.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ВОЗДУХА В ВЫСОКОПОРИСТЫХ ЯЧЕИСТЫХ МАТЕРИАЛАХ ПРИ НАЛИЧИИ НАГРЕВА *

Выполнены измерения скорости фильтрации воздуха через высокопористые ячеистые материалы при наличии нагрева пористого материала. Разработана новая методика измерений, и получены данные по зависимости скорости фильтрации от температуры прошедшего через пористый материал воздуха для различных размеров пор в широком диапазоне чисел Рейнольдса течения воздуха в порах. Экспериментальные данные сопоставлены с результатами численного моделирования течения воздуха в пористых образцах на основе дискретной (скелетной) модели ячеисто-пористого материала.

Ключевые слова: высокопористые ячеистые материалы, течение воздуха, влияние нагревания материала, эксперимент, численное моделирование

Введение

Газопроницаемые пористые материалы широко применяются в различных областях современной техники и технологии в качестве фильтров и конструкционных материалов для охлаждающих трактов теплонапряженных элементов различных аппаратов. В последнее время пористые материалы нашли применение в управлении сверхзвуковым обтеканием тел. Пористые покрытия на поверхности позволяют продлить ламинарный режим течения в гиперзвуковом пограничном слое и снизить сопротивление трения [1–3]. В работах [4–7] была экспериментально показана возможность управления аэродинамическими силами тел в сверх-

звуковом потоке с помощью высокопористых газопроницаемых материалов. В частности, показано, что для модели цилиндра с передней вставкой из высокопористого ячеистого материала возможно снижение аэродинамического сопротивления в сверхзвуковом потоке до 40 % [4], а несимметричный нагрев передней вставки позволяет создать в сверхзвуковом потоке поперечные аэродинамические силы [7]. Перспектива дальнейшего развития этого направления сверхзвуковой аэродинамики связана с управлением гидравлическим сопротивлением течению воздуха в порах (скоростью фильтрации) с помощью нагревания пористого материала и совершенствованием методов численного моделирования высоко-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 015-08-03867).

скоростного обтекания тел со вставками из газопроницаемых пористых материалов. Имеющиеся в настоящее время экспериментальные и расчетные данные по гидродинамическим и теплообменным свойствам пористых материалов (см., например, [8–11]) получены только для малых (менее 10 м/с) скоростей фильтрации и атмосферных условий по давлению, отсутствуют данные о влиянии нагрева пористого материала на гидродинамические характеристики пористых материалов. С другой стороны, для целей сверхзвуковой аэродинамики необходимо знание гидродинамических и теплообменных свойств газопроницаемых пористых материалов при высоких скоростях и низких значениях плотности течения воздуха в порах, что соответствует условиям движения летательных аппаратов в верхних слоях атмосферы. Эти данные могут быть получены в измерениях фильтрационных зависимостей пористого материала в широком диапазоне скоростей фильтрации при низких давлениях воздуха в порах, как это было сделано в [12] в отсутствие нагрева пористого образца. По этим данным были подобраны коэффициенты нелинейного закона фильтрации Дарси – Форхгеймера, который задает квадратичную зависимость градиента давления в пористом материале от скорости фильтрации, для использования континуальной модели пористой среды в численном моделировании внешнего обтекания тел с передними пористыми вставками [13].

Однако численные исследования [13; 14] выявили трудности использования традиционного континуального подхода при моделировании сверхзвукового обтекания тел с высокопористыми газопроницаемыми пористыми вставками из-за существенного изменения параметров течения по длине пористого материала, что не позволяет применять единые по всей длине коэффициенты континуальной модели. Требуется деление пористой зоны на области с разными фильтрационными свойствами и получение коэффициентов фильтрационной зависимости в каждой области с использованием дополнительных экспериментальных данных. Это стимулировало разработку для сверхзвуковых течений дискретной (скелетной) модели высокопористых ячеистых материалов [15], не требующей априорного знания фильтрационных свойств материала. Более

того, данные о влиянии нагрева пористого материала на его фильтрационные характеристики для больших скоростей (более 10 м/с) отсутствуют.

В данной работе представлены результаты исследования фильтрационных характеристик высокопористых ячеистых материалов в условиях пониженного давления воздуха и при нагревании пористого образца. Экспериментальные данные сопоставлены с результатами численного моделирования течения воздуха в ячеисто-пористом материале в рамках дискретной модели пористой среды.

Экспериментальное оборудование и методика измерений

Представленные в данной работе результаты получены для образцов ячеистого никеля с пористостью 95 % и размерами пор $d = 1, 2, 3$ и 4 мм. Этот материал использовался в трубных экспериментах [4; 7], пространственная структура его описана в справочнике [15]. Исследованы образцы диаметром $D = 14$ мм и длиной $L = 40$ и 42 мм. В экспериментах определялось изменение скорости фильтрации воздуха по сравнению со скоростью его фильтрации без нагревания материала при вариации плотности воздуха перед образцом в диапазоне $0,005 \div 0,5$ кг/м³.

Для проведения измерений был создан стенд (рис. 1), который включал два объема, соединенных круглым каналом из нетеплопроводного материала с пористым образцом 1 внутри. Большой объем низкого давления 2 ($0,235$ м³) непрерывно откачивался высокопроизводительным вакуумным насосом, а через открытый соединительный канал с пористым образцом откачивался и меньший объем 3 ($0,016$ м³). Давление воздуха в объеме 2 при измерениях практически не менялось и составляло $\cong 13$ Па, что делает давление перед пористым образцом равным перепаду давления на образце. В объем 3 , через регулируемое отверстие 4 , непрерывно поступал воздух из атмосферы, поддерживая заданное давление перед пористой вставкой без нагрева. Так как исследования проводились при давлениях в объеме 3 менее половины атмосферного, то течение на выходе из отверстия 4 всегда было сверхзвуковым, что обеспечивало постоянство расхода воздуха, поступающего в объем 3 , вне зависимости от изменения дав-

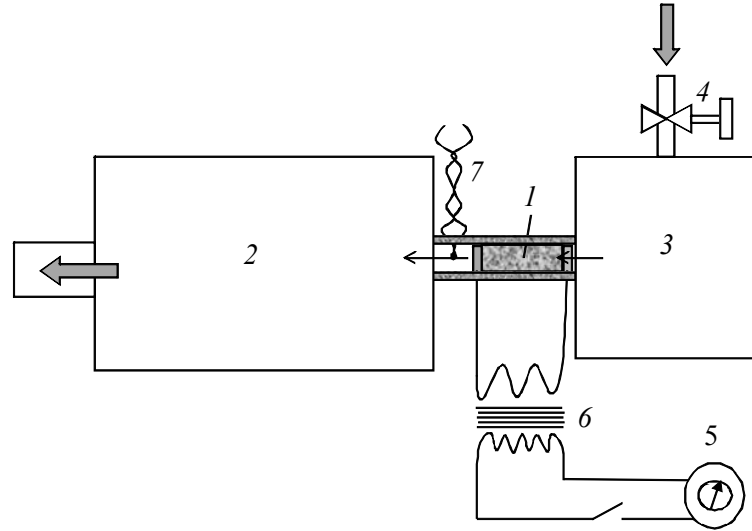


Рис. 1. Схема измерений: 1 – образец пористого материала; 2 и 3 – буферные объемы; 4 – регулируемое отверстие; 5 – регулятор напряжения; 6 – понижающий трансформатор; 7 – термопара

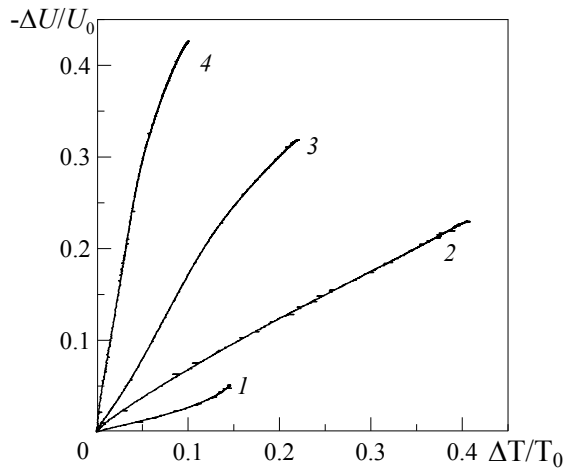


Рис. 2. Зависимость относительной величины падения скорости фильтрации от относительного увеличения температуры прошедшего через образец ($d = 3$ мм, $L = 40$ мм) воздуха: 1 – $Re_d^0 = 1285$; 2 – $Re_d^0 = 390$; 3 – $Re_d^0 = 232$; 4 – $Re_d^0 = 134$

ления в этом объеме. Давление в объемах 2 и 3 регистрировалось датчиками ТДМ2-ИВ2 и ТДМ4-ИВ1. Нагрев пористого материала осуществлялся пропусканием через него электрического тока с помощью регулятора напряжения 5 и понижающего трансформатора 6. Температура пористого материала не измерялась. Измерялась температура прошедшего через образец 1 воздуха с помощью медьконстантановой термопары 7, рас-

положенной ниже по потоку на оси канала непосредственно за пористым образцом. Температура прошедшего через материал воздуха является индикатором теплообмена с пористым материалом и показателем степени нагрева материала. В экспериментах регистрировался сигнал термопары и датчиков давления с помощью многоканального АЦП.

Если при нагревании пористого материала изменяется скорость фильтрации воздуха, то при постоянстве расхода воздуха должно происходить изменение давления в объеме 3 перед пористым образцом, которое описывается соотношением

$$-\frac{\Delta U}{U_0} = \frac{\frac{\Delta P}{P_0}}{1 + \frac{\Delta P}{P_0}}$$

Здесь U_0 и P_0 – соответственно скорость фильтрации воздуха и давление в объеме 3 без нагревания материала, ΔU и ΔP – величины изменения скорости фильтрации воздуха и давления в объеме 3 при нагревании пористого образца. Это соотношение выполняется в случае равенства температуры воздуха в атмосфере и в объеме 3, из-за достаточно большой величины объема 3 и относительно малой величины расхода втекающего воздуха, когда происходит быстрое перемешивание газа и выравнивание его температуры с температурой стенки

объема. Далее, используя данные измерений температуры воздуха, прошедшего через пористый материал 1 , и давления в объеме 3 , можно связать изменение скорости фильтрации ΔU с изменением температуры воздуха ΔT и определить влияние нагрева пористого материала на скорость фильтрации U . На рис. 2 для примера приведены зависимости относительного изменения скорости фильтрации воздуха от относительного изменения температуры воздуха, прошедшего через образец ячеисто-пористого материала для нескольких значений числа Рейнольдса Re_d^0 , вычисленного по диаметру пор, скорости фильтрации без нагревания образца и величине динамической вязкости воздуха при определенном давлении в объеме 3 . На графике видно близкое к линейному возрастание относительной величины падения скорости фильтрации $-\Delta U/U_0$ от относительной величины роста температуры воздуха $\Delta T/T_0$ и увеличение наклона зависимостей с уменьшением числа Re_d^0 .

Численное моделирование

Экспериментальные исследования сопровождались численным моделированием течения воздуха в круглом канале без нагревания и при нагревании ячеисто-пористого образца. Расчетная область представляет собой круглый канал длиной 480 мм, диаметром 14 мм с газопроницаемой вставкой посередине длиной $L = 42$ мм (рис. 3, *а*). Проекция расчетной области на плоскость представляет собой прямоугольник, нижняя сторона которого совпадает с осью симметрии канала (рис. 3, *б*). Решается осесимметричная задача течения воздуха в цилиндрическом канале с газопроницаемой вставкой из высокопористого ячеистого материала внутри канала. На левой входной границе задаются температура входящего газа и значение перепада давления, соответствующего эксперименту, в задаче без нагрева пористой вставки или значение массового расхода, соответствующего определенному пере-

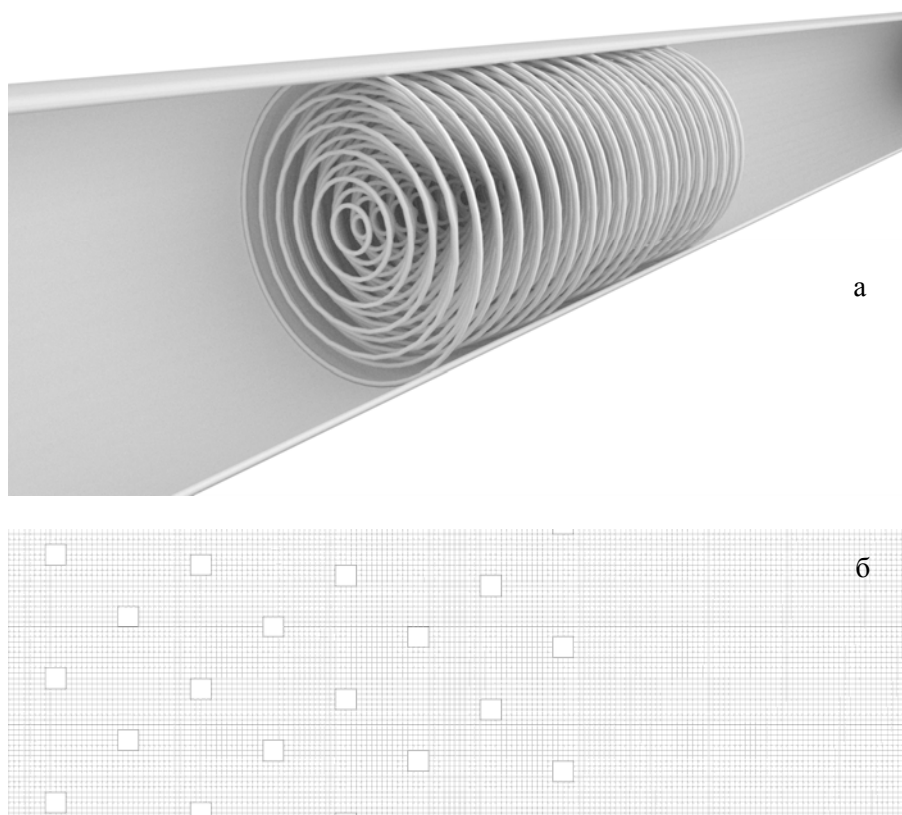


Рис. 3. Конфигурация расчетной области для задачи течения воздуха в круглом канале с газопроницаемой вставкой из высокопористого ячеистого материала (*а*) и фрагмент расчетной сетки внутри и вне пористой зоны (*б*)

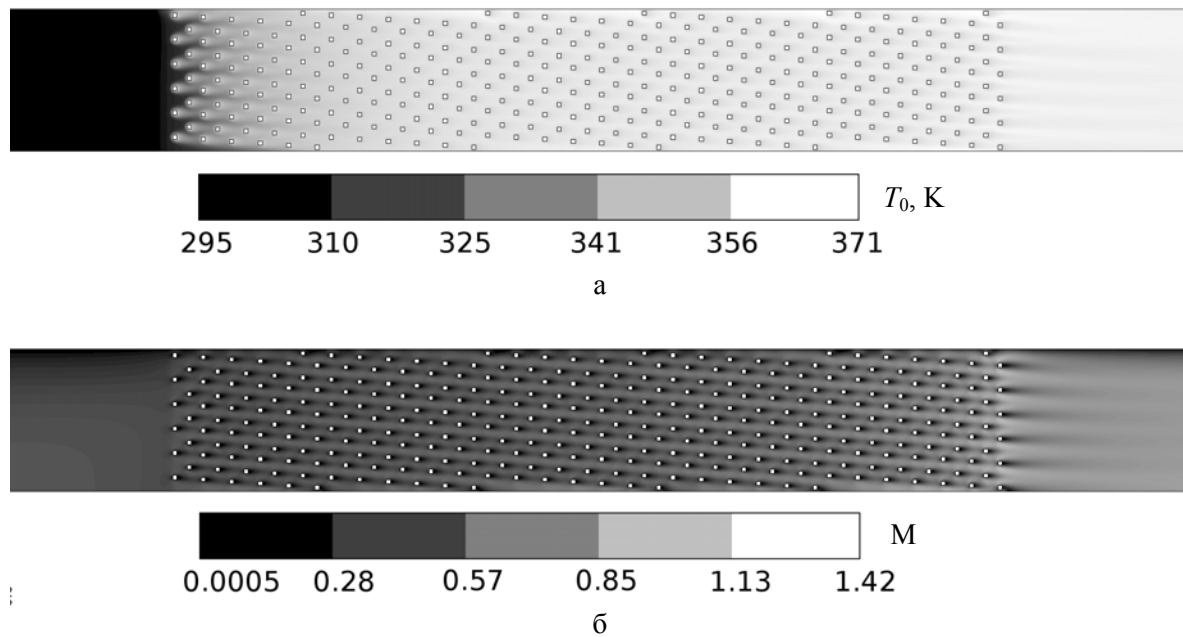


Рис. 4. Расчетные поля температуры (а) и числа Маха (б) течения воздуха в круглом канале через модель скелета ячеисто-пористого никеля
 $d = 1$ мм, $L = 42$ мм, $Re_d^0 = 164$, $T_w = 345$ К

паду давления, в задаче с нагревом. На правой выходной границе задается давление, равное нулю. На стенках канала задаются условия прилипания и постоянства температуры. В случае расчетов с нагревом пористой вставки на поверхности элементов каркаса и поверхности канала в области вставки задавалась температура T_w , равная максимальной температуре нагрева воздуха в эксперименте. Дискретная модель ячеисто-пористого материала реализована в виде каркаса из квадратных элементов, закрученных вокруг продольной оси образца, что создает набор кольцевых структур с равным шагом по величине диаметра (см. рис. 3, а). Расстояние между элементами каркаса в радиальном и осевом направлениях равнялось диаметру пор, а объем, занимаемый каркасом, подбирался из расчета соответствия величине пористости материала 95%. Кольцевые элементы разного диаметра располагались в шахматном порядке с постепенным поперечным смещением относительно продольной оси (см. продольное осевое сечение модели скелета на рис. 3, б). Такое расположение обеспечивает взаимодействие воздушного потока со всеми элементами модели скелета, как это было в эксперименте, и ни одна из струек тока не

может пройти через пористый образец без взаимодействия с элементами скелета.

В образцах из высокопористого ячеистого материала (например, вспененного никеля [16]) воздух в среднем движется только в продольном и радиальном направлениях, поскольку в азимутальном направлении движение воздуха маловероятно из-за хаотичного расположения перегородок пор и отсутствия азимутального перепада давления в образце. Это подтверждают численные исследования [11] с использованием трехмерной структуры скелета ячеисто-пористого образца в виде массива сфер с перекрытиями. В [11] показана линейная зависимость распределения давления вдоль направления потока, что говорит об отсутствии влияния трехмерности элементов каркаса пористого материала на средние характеристики. Основными определяющими параметрами трехмерной модели [11] были диаметр сферы (ячейки) и отношение расстояния между центрами сфер к диаметру сферы (коэффициент пористости).

Отсутствие движения воздуха в азимутальном направлении и доминирование двух определяющих параметров способствовало выбору упрощенной осесимметричной модели скелета высокопористого ячеистого

материала из набора кольцевых структур с равным шагом по величине диаметра пор. Основной целью при конструировании такого модельного скелета являлось получение средних характеристик потока, соответствующих эксперименту, при минимуме допущений на геометрию скелета.

Численное моделирование течения в круглом канале с модельной вставкой производилось с помощью пакета ANSYS Fluent для экспериментальных условий обтекания. Решалась система двумерных стационарных уравнений Навье – Стокса с добавлением $k-\omega$ SST модели турбулентности и с помощью density-based решателя. В расчетах используется неявная схема 2-го порядка точности по времени и неявная схема 2-го порядка точности по пространству с Roe-FDS методом расщепления конвективных потоков. Расчетная область покрывалась равномерной прямоугольной расчетной сеткой как внутри пористой зоны, так и вне пористой вставки. Общее число ячеек в задаче составляло 1 240 000. Измельчение расчетной сетки в два раза по обоим направлениям показало изменение средней скорости фильтрации менее чем на 2 %. При расчетах использовалось до 10 процессоров Информационно-вычислительного центра НГУ.

В результате решения задачи были получены все газодинамические величины потока – как вне вставки, так и внутри модели пористого материала.

Результаты

На рис. 4 приведено продольное сечение расчетной области от оси канала до его стенки с пористым образцом и нанесенными на него расчетными изолиниями поля температуры воздуха и числа Маха. Виден постепенный рост температуры торможения воздуха по мере его движения от переднего к заднему торцу газопроницаемой пористой вставки (см. рис. 4, а) и тепловое поле, создаваемое каждым элементом каркаса пористой вставки. На рис. 4, б можно видеть увеличение числа Маха потока воздуха при его движении вдоль пористого образца, которое достигает единицы в последнем сечении пористой вставки. Это сечение играет роль системы сопел, из которых воздух истекает в область низкого давления. При этом скорость среднего течения воздуха (скорость

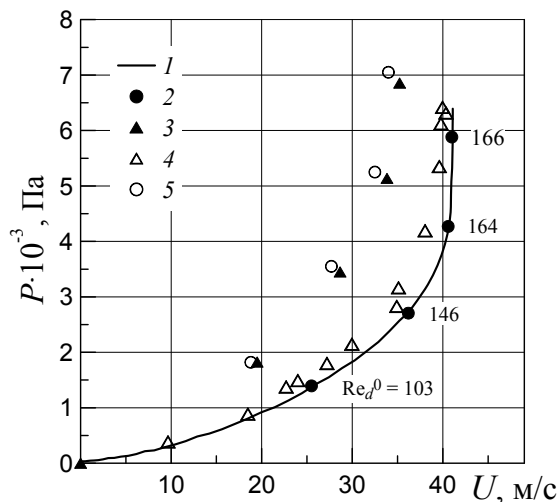


Рис. 5. Зависимость давления перед пористым образцом P от скорости фильтрации воздуха U : 1 – эксперимент без нагревания; 2 – точки на кривой 1, выбранные для определения влияния нагрева; 3 – эксперимент с нагреванием образца; 4 – расчет без нагревания $T_w = 295$ К; 5 – расчет с нагреванием образца $T_w = 345$ К ($d = 1$ мм; $L = 42$ мм)

фильтрации) остается значительно меньше скорости звука (рис. 5).

На рис. 5 приведены экспериментальные и расчетные зависимости величины перепада давления на пористом образце от скорости фильтрации воздуха для не нагретого и нагретого пористого материала. Увеличение температуры прошедшего через вставку воздуха составляло 50° . Сплошная кривая была получена в экспериментах на фильтрационном стенде из работы [12] для не нагретого материала, на которой были выбраны четыре точки. Для условий течения в этих точках на стенде (см. рис. 1) изучалось влияние нагревания материала пористой вставки на зависимость $\Delta P(U)$. Данные расчета средней скорости фильтрации получались осреднением по площади канала вдоль всей его длины. На рис. 5 видно, что при нагревании скорость фильтрации уменьшается, а перепад давления сдвигается в сторону больших значений, что соответствует росту гидродинамического сопротивления течению воздуха в порах при нагревании. Видно также, что величина смещения по ΔP и U увеличивается с уменьшением величины Re_d^0 . Совпадение экспериментальных и расчетных данных говорит о правильном выборе геометрической структуры модельного скелета пористой вставки.

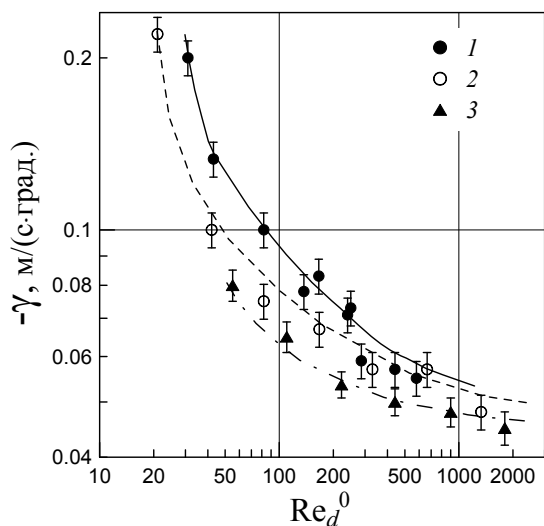


Рис. 6. Зависимость коэффициента пропорциональности γ между изменением температуры воздуха ΔT , прошедшего сквозь нагреваемые пористые образцы, и изменением скорости фильтрации ΔU : 1 – диаметр пор $d = 1$ мм; 2 – $d = 3$ мм; 3 – $d = 4$ мм ($L = 40$ мм)

На рис. 6 приведены обобщенные данные по влиянию нагревания пористого материала на скорость фильтрации для образцов ячеисто-пористого никеля одинаковой длины, но с различными диаметрами пор. Данные представлены в виде зависимости коэффициента пропорциональности γ между абсолютным изменением скорости фильтрации ΔU и абсолютным изменением температуры ΔT прошедшего через пористый материал воздуха в диапазоне величин Re_d^0 от 20 до 2000. Здесь коэффициент γ вычислялся на линейных участках зависимостей $\Delta U(\Delta T)$. Видно, что коэффициент пропорциональности быстро растет с уменьшением величины Re_d^0 , но падает с ростом диаметра пор. Последнее, скорее всего, связано с относительным уменьшением влияния вязкости в каналах пор на расход воздуха с ростом диаметра пор.

Заключение

Создан фильтрационный стенд, разработана методика измерений и получены данные о влиянии нагревания образцов высокопористого ячеистого никеля с величиной пористости 95 % и диаметром пор $d = 1, 2, 3$ и 4 мм на величину скорости фильтрации в диапазоне чисел Рейнольдса $Re_d^0 = 20 \div 2000$.

Совпадение данных измерений с результатами численного моделирования показало, что упрощенная дискретная модель скелета газопроницаемой пористой вставки, составленная из набора кольцевых структур, адекватно описывает свойства высокопористых ячеистых материалов типа вспененного никеля для умеренных (до 40 м/с) скоростей фильтрации.

Впервые для высокопористых ячеистых материалов показано, что при их нагревании скорость фильтрации воздуха уменьшается. Для фиксированной температуры нагрева воздуха в пористом материале величина падения скорости фильтрации растет с уменьшением числа Рейнольдса Re_d^0 течения воздуха в порах и уменьшается с ростом диаметра пор d .

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 Journal. 2005. Vol. 43, issue 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 Journal. 2006. Vol. 44, issue 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 // ПМТФ. 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 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 // Докл. 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 // ПМТФ. 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 ЖТФ. 2014. Т. 40, вып. 19. С. 83–88.

8. 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.

9. 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.

10. Кирсанов Ю. А., Назипов Р. А., Данилов В. А. Теплообмен пористого тела с однофазным потоком теплоносителя // ТВТ. 2011. Т. 49, № 3. С. 235–242.

11. Митричев И. И., Кольцова Э. М., Женса А. В. Компьютерное моделирование газодинамической обстановки внутри каналов высокопористого ячеистого материала // Фундаментальные исследования. Технические науки. 2012. № 11. С. 440–446.

12. Миронов С. Г., Колотилов В. А., Маслов А. А. Экспериментальное исследование фильтрационных характеристик высокопористых материалов // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22, № 5. С. 599–607.

13. Миронов С. Г., Маслов А. А., Поплавская Т. В., Кирилловский С. В. Моделирование сверхзвукового обтекания цилиндра с газопроницаемой пористой вставкой // ПМТФ. 2015. Т. 56, № 4. С. 12–22.

14. 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 // ПМТФ. 2011. Т. 52, № 1. С. 13–23.

15. Poplavskaya T. V., Kirilovskiy S. V., Mironov S. G. Supersonic flow around a cylinder with front gas-permeable insert which modeled by skeleton of porous material // AIP Conf. Proc. 2016. Vol. 1770. No. 030067.

16. Пористые проницаемые материалы: Справочное изд. / Под ред. С. В. Белова. М.: Металлургия, 1987.

Список обозначений

d – диаметр пор, мм

D – диаметр пористого образца, мм

L – длина пористого образца, мм

P – давление перед пористым образцом (в объеме \mathcal{V}), Па

ΔP – изменение давления перед пористым образцом (в объеме \mathcal{V}), Па

U – скорость фильтрации воздуха, м/с

ΔU – изменение скорости фильтрации воздуха, м/с

T – температура воздуха, прошедшего через пористый материал, или поверхности канала и пористого материала, град.

ΔT – изменение температуры воздуха, прошедшего через пористый материал, град.

γ – коэффициент пропорциональности между изменением скорости фильтрации и изменением температуры воздуха, м/(с·град.)

Re_d – число Рейнольдса, вычисленное по средней скорости фильтрации и диаметру пор

Индексы

0 – параметры без нагревания пористого материала

w – параметры на поверхности пористого материала и стенках канала

S. G. Mironov, T. V. Poplavskaya, S. V. Kirilovskiy

*Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS
4/1 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

*Novosibirsk State University
2 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

ironov@itam.nsc.ru

INVESTIGATION OF THE AIR FLOW IN HEATED HIGHLY POROUS CELLULAR MATERIALS

Measurements of air filtration rate through the highly porous cellular materials in the presence of heating a porous material were carried out. A new measurement technique was developed and data of the dependence of the filtration rate of the temperature of air passing through the porous material were obtained with different pore size and in wide range Reynolds number. The experimental data were compared with the results of numerical modeling of the airflow in the porous samples, based on skeletal model of the cellular-porous material.

Keywords: highly porous cellular materials, airflows, effect of heating of materials, experiment, numerical simulation.