

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ ВОЗДУХА В ВЫСОКОПОРИСТЫХ ЯЧЕИСТЫХ МАТЕРИАЛАХ. ВЛИЯНИЕ НАГРЕВА МАТЕРИАЛА

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

*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
630090, Новосибирск, Россия
Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, Россия*

Проницаемые пористые материалы нашли широкое применение в различных областях современной техники и технологии в качестве фильтров и конструкционных материалов для охлаждения трактов теплонапряженных элементов различных аппаратов. В последнее время проницаемые пористые материалы нашли применение для управления обтеканием тел, движущихся с высокой скоростью в потоке низкой плотности [1-5]. Эксперимент [1] показал, что с помощью высокопористых ячеистых материалов (ВПЯМ) можно существенно снизить волновое сопротивление затупленных тел в сверхзвуковом потоке низкой плотности. Кроме того, в работах [4, 5] было показано, что несимметричный нагрев передней высокопористой вставки позволяет создать поперечные аэродинамические силы при сверхзвуковом обтекании модели. Дальнейшее развитие исследований в этом направлении связано с использованием численного моделирования.

Для численного моделирования сверхзвукового обтекания тел с высокопористыми газопроницаемыми вставками и оптимизации на его основе эффекта воздействия необходимо задание модели пористой среды. Имеющиеся в настоящее время экспериментальные исследования по гидродинамическим и теплообменным характеристикам ВПЯМ выполнены для малых скоростей фильтрации и для атмосферных условий по давлению, что связано с практическими задачами промышленных технологий. Результаты этих исследований, как правило, представлены в виде эмпирических квадратичных зависимостей Дарси-Форхгеймера, что подразумевает континуальную модель пористой среды. В работе [6] было выполнено численное моделирование сверхзвукового обтекания цилиндра с передней высокопористой вставкой на основе квадратичного закона фильтрации. Однако это потребовало включения дополнительных экспериментальных данных по аэродинамическому сопротивлению переднего торца вставки. В работе [7] эта проблема была успешно преодолена путем разделения пористой вставки на две области (узкую переднюю и протяженную заднюю) с различными эмпирическими квадратичными зависимостями. Было получено хорошее совпадение с экспериментальными данными (рис. 1) и показано, что квадратичный член в зависимости Дарси-Форхгеймера играет основную роль в формировании поля течения.

Для получения данных о влиянии плотности воздуха, длины образцов ВПЯМ и диаметра пор был выполнен цикл измерений величины скорости фильтрации при одномерном течении воздуха через ВПЯМ в широком диапазоне чисел Рейнольдса течения воздуха в порах, перепадов давления на образце и длины образцов, в том числе и для условий трубных экспериментов [1, 4]. В качестве образцов ВПЯМ использован ячеистый никель с величиной пористости 95 % и средним диаметром пор 1 и 3 мм, который использовался в экспериментах [1, 4]. На основе экспериментальных данных были вычислены коэффициенты квадратичного закона фильтрации Дарси-Форхгеймера, которые показали их сильную и немонотонную зависимость от числа Рейнольдса, длины образцов ВПЯМ и достаточно слабую зависимость от диаметра пор [8]. Более того, в рамках квадратичной зависимости не удастся описать экспериментальные данные во всей области скоростей фильтрации. Эти результаты ставят под вопрос рациональность использования

континуальных моделей пористой среды при моделировании сверхзвукового обтекания тел с ВПЯМ и выдвигают необходимость перехода на численное моделирование обтекания тел с газопроницаемыми вставками, но с прямым включением модели скелета ВПЯМ в расчетную область. Этот подход уже доказал свою эффективность при численном моделировании развития возмущений в гиперзвуковом ударном слое на пластине с пористыми вставками [9].

В этой связи в данной работе было проведено численное моделирование сверхзвукового обтекания цилиндра с передней пористой вставкой представленной модельным скелетом для условий экспериментов [1, 4]. Скелет моделировался системой концентрических колец последовательно расположенных друг за другом. Радиусы колец подбирались таким образом, чтобы формировался шахматный порядок в радиальном и продольном направлениях с небольшим их смещением для предотвращения прямого течения воздуха без взаимодействия с кольцами. Толщина колец выбиралась из условия равенства величины пористости модельного и реального скелета. Численное моделирование показало хорошее совпадение расчетной и экспериментальной зависимостей относительного коэффициента сопротивления от относительной длины пористой вставки (рис. 1).

Экспериментальные исследования одномерного течения воздуха через высокопористый ячеистый никель показали, что нагрев ВПЯМ приводит к снижению скорости фильтрации (рис. 2), что объясняет результаты полученные в [4, 5]. При этом величина эффекта снижения скорости фильтрации сильно зависит от числа Рейнольдса течения воздуха в порах – с уменьшением числа Рейнольдса эффект воздействия нагрева возрастает. В рамках вышеупомянутого подхода с моделированием скелета ВПЯМ были рассчитаны фильтрационные зависимости для ВПЯМ большой длины, которые хорошо совпали с экспериментальными данными (рис. 2) и дали надежду на успешное моделирование сверхзвукового обтекания тел со вставками из ВПЯМ при наличии нагрева материала вставок и разработку новых методов управления обтеканием сверхзвуковых летательных аппаратов.

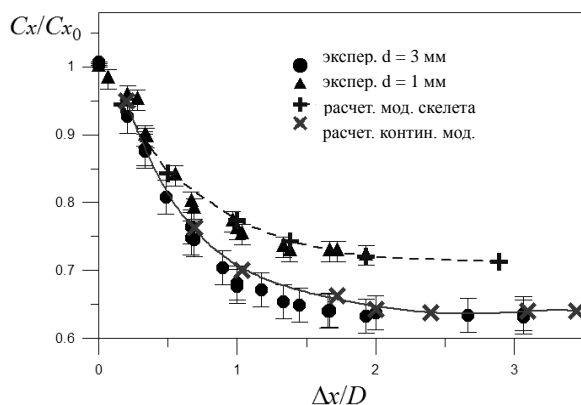


Рис. 1. Сопоставление экспериментальных и расчетных зависимостей относительного коэффициента сопротивления от относительной длины передней пористой вставки из ВПЯМ.

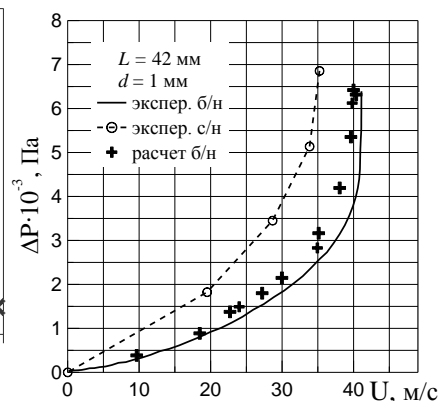


Рис. 2. Расчетные и экспериментальные зависимости перепада давления на образце ВПЯМ от скорости фильтрации без нагрева и с нагревом материала.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 015-08-03867) и гранта Правительства РФ для поддержки исследований под руководством ведущих ученых (Договор № 14.Z50.31.0019).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **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.
2. **Фомин В.М., Запрягаев 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.
3. **Фомин В.М., Запрягаев 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.
4. **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.
5. **Миронов С.Г., Цырюльников И.С., Маслов А.А.** Способ управления обтеканием сверхзвукового летательного аппарата // Патент на изобретение № 2559193 от 13.07.2015 г.
6. **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.
7. **Миронов С.Г., Маслов А.А., Поплавская Т.В., Кириловский С.В.** Моделирование течения в газопроницаемых пористых материалах в приложении к сверхзвуковой аэродинамике // ПМТФ. 2015. Т. 56, № 6. С. 15-21.
8. **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.
9. **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.