

УДК 533.697+532.546

СТРУКТУРА ТЕЧЕНИЯ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ СВЕРХЗВУКОВОЙ СТРУИ С ПОРИСТОЙ ПРЕГРАДОЙ

В. И. Запрягаев, И. Н. Кавун, А. В. Солотчин

Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия
E-mails: zapr@itam.nsc.ru, i_k@list.ru, solotchin@itam.nsc.ru

Представлены результаты исследования натекания сверхзвуковой недорасширенной воздушной струи на пористую металлическую преграду конечной толщины, передняя плоскость которой перпендикулярна оси струи, а боковая поверхность непроницаема для газового потока. Для определения влияния пористости на газодинамические характеристики взаимодействия струи с препятствием рассмотрен также случай непористой преграды того же диаметра.

Ключевые слова: сверхзвуковая недорасширенная струя, пористая преграда, проницаемость, низконапорное дозвуковое течение.

Введение. При моделировании процесса взаимодействия струй с пористыми телами обычно рассматриваются уравнения фильтрации, основанные на обобщении закона Дарси [1]. Однако в ряде случаев наблюдаются отклонения от закона Дарси, в частности при течении газа в пористых телах [2]. Известен ряд работ, в которых теоретически и экспериментально исследовалось взаимодействие газовых струй с пористыми телами [3–7]. Течения этого типа используются для охлаждения газовых потоков в плазмотронах и камерах сгорания двигателей, при производстве фильтров для очистки жидкого горючего и сжатых газов от твердых примесей.

В работе [8] показано, что натекание сверхзвуковой нерасчетной струи на пористую преграду может приводить к возникновению течения с пульсациями. Обычно при натекании струи на сплошную непроницаемую преграду звуковое давление вокруг струи больше звукового давления в свободной струе. Однако замена сплошной преграды на пористую может приводить к уменьшению амплитуды акустических пульсаций в ближнем поле струи до уровня, меньшего, чем в свободной струе. Например, при натекании сверхзвуковой недорасширенной струи с параметрами $M_a = 1,72$ (M_a — число Маха на срезе сопла) и $n = 3,82$ ($n = p_a/p_h$ — отношение статического давления на срезе сопла p_a к давлению в окружающей струю газе p_h) на пористую преграду звуковое давление в ближнем акустическом поле уменьшается приблизительно в 3,6 раза по сравнению со случаем натекания струи на сплошную преграду (коэффициент пористости материала данной преграды $\gamma = 0,92$, коэффициент проницаемости $\alpha \sim 10^{-8} \text{ м}^2$, инерциальный параметр $\beta \sim 10^2 \text{ м}^{-1}$, материал пористой преграды — сплав алюминия и никеля, имеющий ячеистую структуру). Причина такого уменьшения звукового давления заключается в изменении структуры течения вблизи преграды, поэтому необходимо выявить различия характера обтекания сплошной и пористой преград.

Для описания несжимаемого течения в пористых средах обычно используется уравнение Дарси [3, 4]

$$\nabla p = K_1 \mu \mathbf{v}_{vol}. \quad (1)$$

Здесь ∇p — градиент давления, под действием которого газ движется внутри поры; μ — динамическая вязкость газа; v_{vol} — приведенная скорость газа; K_1 — коэффициент вязкостного сопротивления пористой среды. Приведенная скорость v_{vol} (рассчитывается по объемному расходу газа сквозь пористое тело) связана со скоростью в порах v соотношением

$$\mathbf{v}_{vol} = \gamma \mathbf{v},$$

где γ — коэффициент пористости, определяемый как отношение объема, занятого газом, к общему объему:

$$\gamma = \Omega_f / \Omega,$$

$\Omega = \Omega_f + \Omega_s$ — объем, занятый пористым телом; Ω_f — объем, занятый газом в пористом теле; Ω_s — объем, занятый материалом пор в пористом теле. В формуле (1) перепад давления вдоль порового канала линейно зависит от скорости потока.

В случае течения сжимаемого газового потока в пористом теле используется нелинейное представление закона Дарси в виде уравнения Форхгеймера [2]

$$\nabla p = - \left(K_1 \mu \mathbf{v}_{vol} + K_2 \frac{\rho |\mathbf{v}_{vol}| \mathbf{v}_{vol}}{2} \right), \quad (2)$$

где K_2 — коэффициент инерциального сопротивления пористой среды; ρ — плотность газа; зависимость перепада давления вдоль порового канала от скорости потока является квадратичной.

Целью данной работы является определение стационарной газодинамической структуры течения внутри преграды и в окружающем ее пространстве. Для этого выбран режим течения с малым уровнем пульсаций потока, позволяющий провести сравнение расчетных данных об ударно-волновой структуре течения при взаимодействии сверхзвуковой струи с пористой преградой в стационарном приближении с результатами экспериментов.

Методика проведения исследования. Эксперименты проведены в аэродинамической трубе Т-326 Института теоретической и прикладной механики СО РАН (рис. 1, а). Использовалось коническое сопло с диаметром выходного сечения $d_a = 15$ мм и полууглом раствора конической сверхзвуковой части сопла $\varphi = 4^\circ$. Число Маха в выходном сечении $M_a = 1,72$, степень нерасчетности истечения струи $n = 2,1$. Рабочий газ — воздух с температурой торможения $T_0 \approx 283$ К, число Рейнольдса, рассчитанное по параметрам выходного сечения сопла, равно $Re = 4 \cdot 10^5$.

Пористая преграда, имеющая форму диска диаметром $d_p = 100$ мм и толщиной $\Delta l_p = 20$ мм, вставлялась в металлическую обойму (рис. 1, б). Материал пористой преграды — сплав никеля, хрома, алюминия и железа, имеющий ячеистую структуру (рис. 1, в). Расстояние от среза сопла до преграды составляло $l = 30,6$ мм (наветренная поверхность преграды расположена в сечении $x/R_a = 4,08$, где x — осевая координата; R_a — радиус выходного сечения сопла).

Коэффициенты гидравлического сопротивления в пористом материале преграды были определены экспериментально. Эксперимент показал, что на различных участках пористого материала значения коэффициентов имеют существенный разброс (приблизительно на порядок). Осредненные коэффициенты сопротивления составляли $K_1 = 1,6 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-2}$, $K_2 = 4,9 \cdot 10^3 \text{ м}^{-1}$. Коэффициент пористости $\gamma = 0,56$ также был определен в эксперименте.

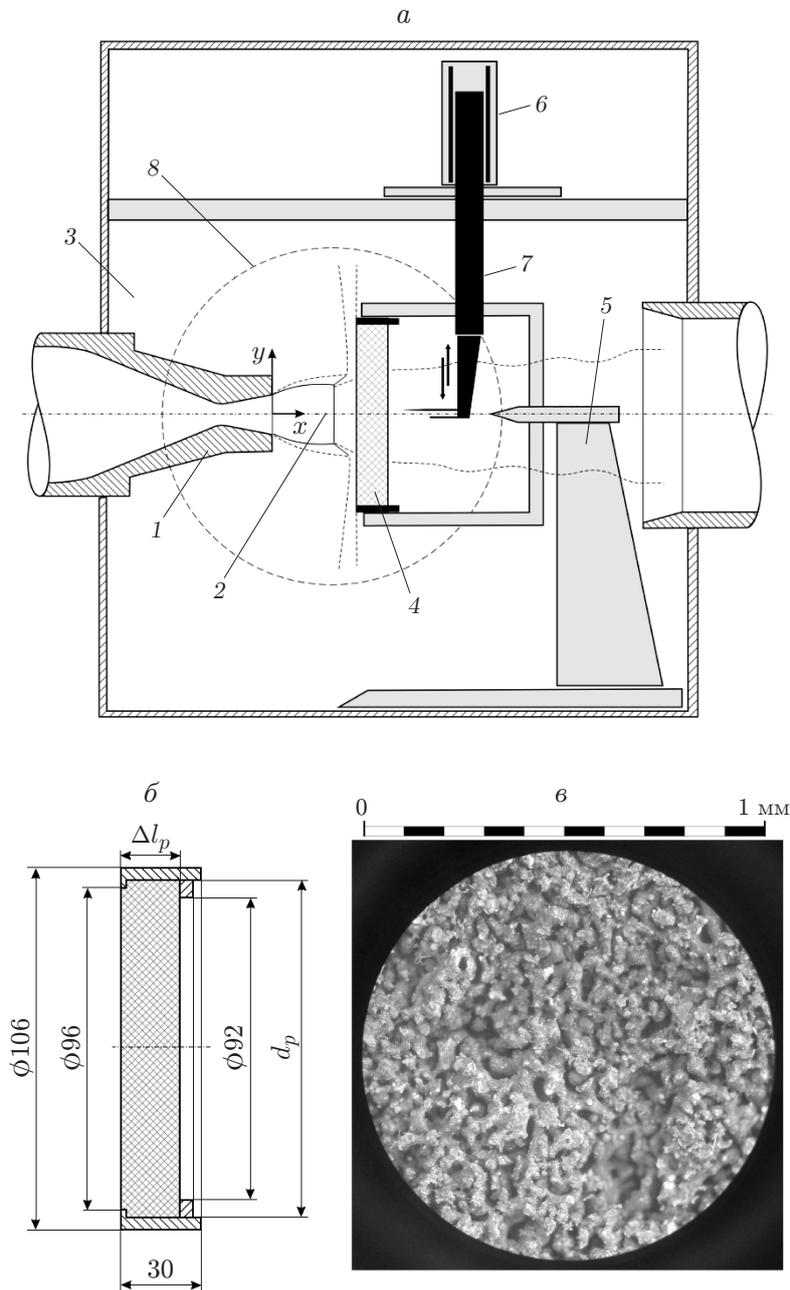


Рис. 1. Взаимодействие сверхзвуковой недорасширенной струи ($M_a = 1,72, n = 2,1$) с пористой преградой:

a — схема эксперимента, *б* — схема пористой преграды, *в* — структура пористого материала; 1 — сопло, 2 — сверхзвуковая недорасширенная струя, 3 — камера Эйфеля, 4 — пористая преграда, 5 — механизм крепления преграды, 6 — трехпозиционный координатник, 7 — пилон для крепления пневмонасадков полного и статического давлений, 8 — смотровое окно

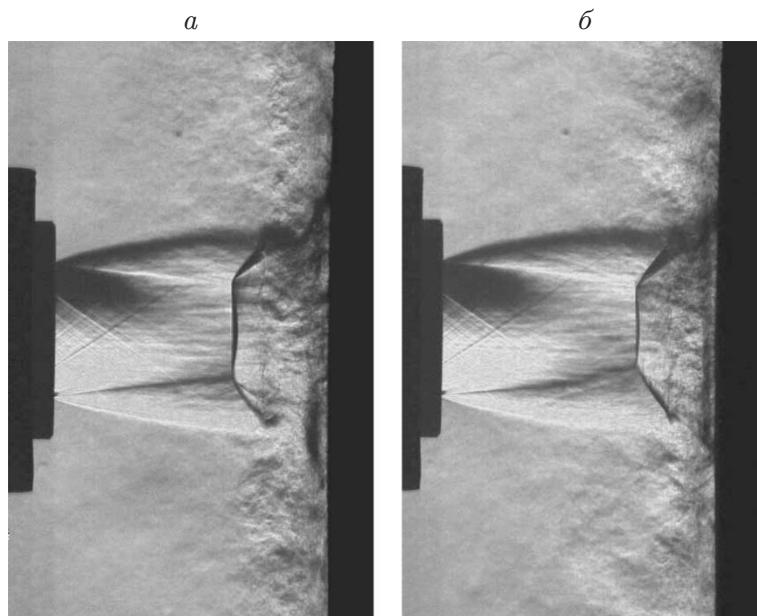


Рис. 2. Сверхзвуковая недорасширенная струя, взаимодействующая с пористой преградой: *a* — минимальное расстояние между диском Маха и срезом сопла, *б* — максимальное расстояние

На рис. 2 представлены фотографии сверхзвуковой недорасширенной струи, истекающей из конического сопла и взаимодействующей с пористой преградой. Время экспозиции кадров составляло 20 мкс. Амплитуда колебаний диска Маха вдоль оси струи равна $0,15d_a$. Малый уровень пульсаций позволяет пренебречь их влиянием при анализе структуры течения.

В ходе экспериментов проведены измерения полного и статического давления потока за преградой.

Численный расчет выполнен с использованием пакета Fluent. Геометрические и газодинамические параметры расчета соответствовали эксперименту. Для области вне преграды решались трехмерные уравнения Рейнольдса с использованием SST ($k-\omega$)-модели турбулентности. Течение внутри пористой преграды считалось ламинарным и моделировалось с помощью уравнений Навье — Стокса с включенным в них соотношением (2). Рабочее тело представляло собой идеальный газ, описываемый уравнением Менделеева — Клапейрона. Динамическая вязкость газа рассчитывалась по формуле Сазерленда. Неоднородность распределения характеристик реального пористого материала по пространству преграды в расчете не учитывалась. Распределение числа Маха внутри пористой преграды рассчитывалось по приведенной скорости v_{vol} .

Решение строилось в нестационарной постановке методом установления. Был выбран шаг по времени 1 мс, позволяющий при анализе решения пренебречь пульсационными характеристиками потока.

Результаты исследования. На рис. 3, *a, б* приведены расчетные распределения относительного давления на наветренной поверхности пористой и сплошной преград, а также в поперечном сечении, расположенном на расстоянии от выходной плоскости пористой преграды, равном 15 мм, или на расстоянии от среза сопла $x/d_a = 4,27$ (p_w — давление на поверхности преграды; p_{Pt} — давление Пито; p_e — давление в окружающей среде). Диаметр преград в несколько раз больше диаметра выходного сечения сопла ($d_p/d_a = 6,67$), что позволяло считать преграды неограниченными. При таком соотношении диаметров на поверхности преград формировалась кольцевая пристенная струя, растекающаяся от центра в радиальном направлении. Начальная стадия течения пристенной струи соот-

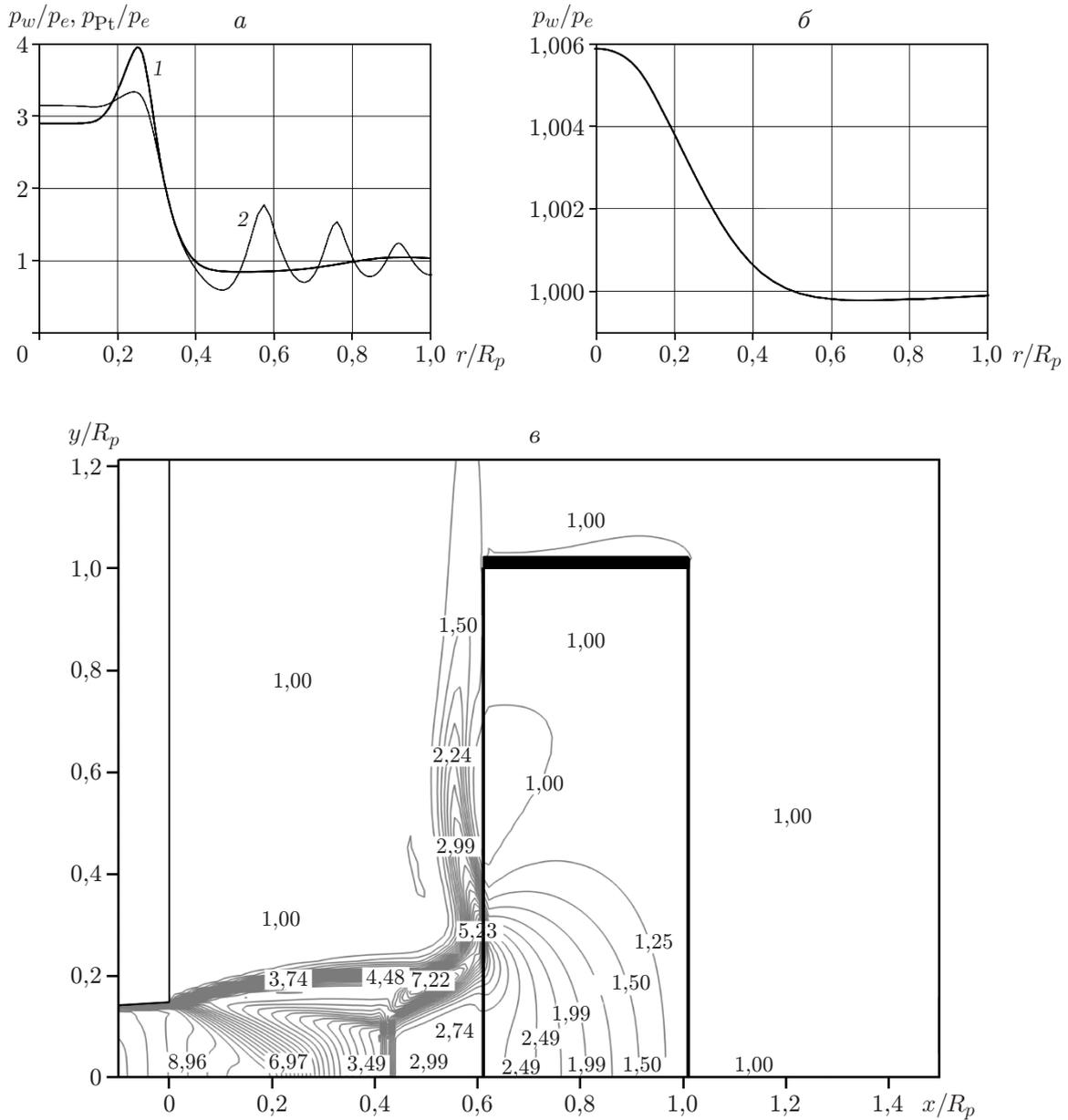


Рис. 3. Распределения давления, измеряемого трубкой Пито, на поверхности пористой преграды (а) и за ней (б), а также изолинии давления Пито в случае натекания струи на преграду (в):

1 — давление на наветренной поверхности сплошной непроницаемой преграды, 2 — давление Пито на наветренной поверхности пористой преграды

ветствовала повороту потока на угол, равный 90° , при этом диск Маха находился на относительном радиальном расстоянии от центра преграды, равном $r/R_p \approx 0,225$ (r — радиальная координата; R_p — радиус преграды).

Течение в области взаимодействия недорасширенной струи со сплошной преградой представляло собой сложную газодинамическую структуру с дозвуковыми и сверхзвуковыми скоростями. Перед преградой формировался прямой (центральный) скачок уплотнения, за которым скорость потока была дозвуковой, затем под действием отрицательного градиента давления на поверхности преграды происходил разгон потока до сверхзвуковой скорости [9]. Сверхзвуковое течение в растекающемся по преграде потоке, как и в свободной струе, представляло собой периодическую ударно-волновую структуру (см. рис. 3, а).

При взаимодействии струи с пористой преградой картина течения отличается от соответствующей картины в случае сплошной преграды. Давление на поверхности как пористой, так и сплошной преграды принимает максимальное значение в области поворота потока на угол, равный 90° , т. е. в области формирования пристенной кольцевой струи. Однако вследствие фильтрации части газа через поры давление в пристенной струе уменьшается до значения, приближенно равного значению давления в затопленном пространстве. На рис. 3, б показано поле давления в поровом пространстве преграды при воздействии на ее поверхность натекающей струи. Вследствие влияния отрицательного градиента давления происходят фильтрация газа через пористую преграду и образование низконапорного осесимметричного потока радиусом $r/R_p \approx 0,5$ (см. рис. 3, б). Из рис. 3 следует, что влияние отрицательного градиента давления распространяется на центральную область пористого тела. На периферийном участке пористой преграды устанавливается постоянное давление, приближенно равное давлению в окружающем пространстве.

Зависимостью, определяющей установившийся режим течения газа в поровом пространстве, принято считать связь между градиентом давления и скоростью движения газа в пористой преграде. На рис. 4 приведены результаты численного моделирования распределения числа Маха на наветренной поверхности пористой преграды, за ней и внутри преграды. Точками показано полученное в эксперименте распределение числа Маха в низконапорном потоке за пористой преградой в сечении $x/d_a = 4,27$. Наблюдаемое на рис. 4, б различие экспериментальных и расчетных данных может быть вызвано неоднородностью распределения коэффициентов гидравлического сопротивления в различных областях реальной преграды и пульсирующим характером взаимодействия струи с преградой.

На поверхности приосевой области пористой преграды движение потока замедляется ($M = 0,03 \div 0,06$), а в точке поворота струи на угол, равный 90° , радиальная скорость увеличивается ($M \approx 0,78$). На рис. 4, в показаны распределение числа Маха и линии тока течения в поровом пространстве преграды. Вследствие газовой проницаемости материала преграды внутри нее происходит растекание потока. Течение газа в пористой преграде и за ней представлено в виде распределения линий тока. Выделяются две области течения газового потока в пористой преграде: область фильтрации газа через преграду и область течения газа на периферийном участке преграды. Газ, проходя через центральный скачок уплотнения, втекает в пористое тело через поверхность преграды радиусом $r/R_p \approx 0,28$.

На рис. 4, б представлено распределение числа Маха в низконапорном потоке за преградой, статическое давление в котором приближенно равно давлению окружающей среды. На передней плоскости пористой преграды в области растекания кольцевой струи $r/R_p = 0,4 \div 0,6$ устанавливается статическое давление, меньшее давления окружающей среды и давления на периферийном участке преграды (рис. 5). Максимальная разность давлений между указанными плоскостями $\Delta p_w \approx 0,15 p_e$. Вследствие влияния этой разности давлений в поровом пространстве преграды формируется возвратное течение, часть газа выходит на наветренную поверхность преграды в растекающийся по ней поток.

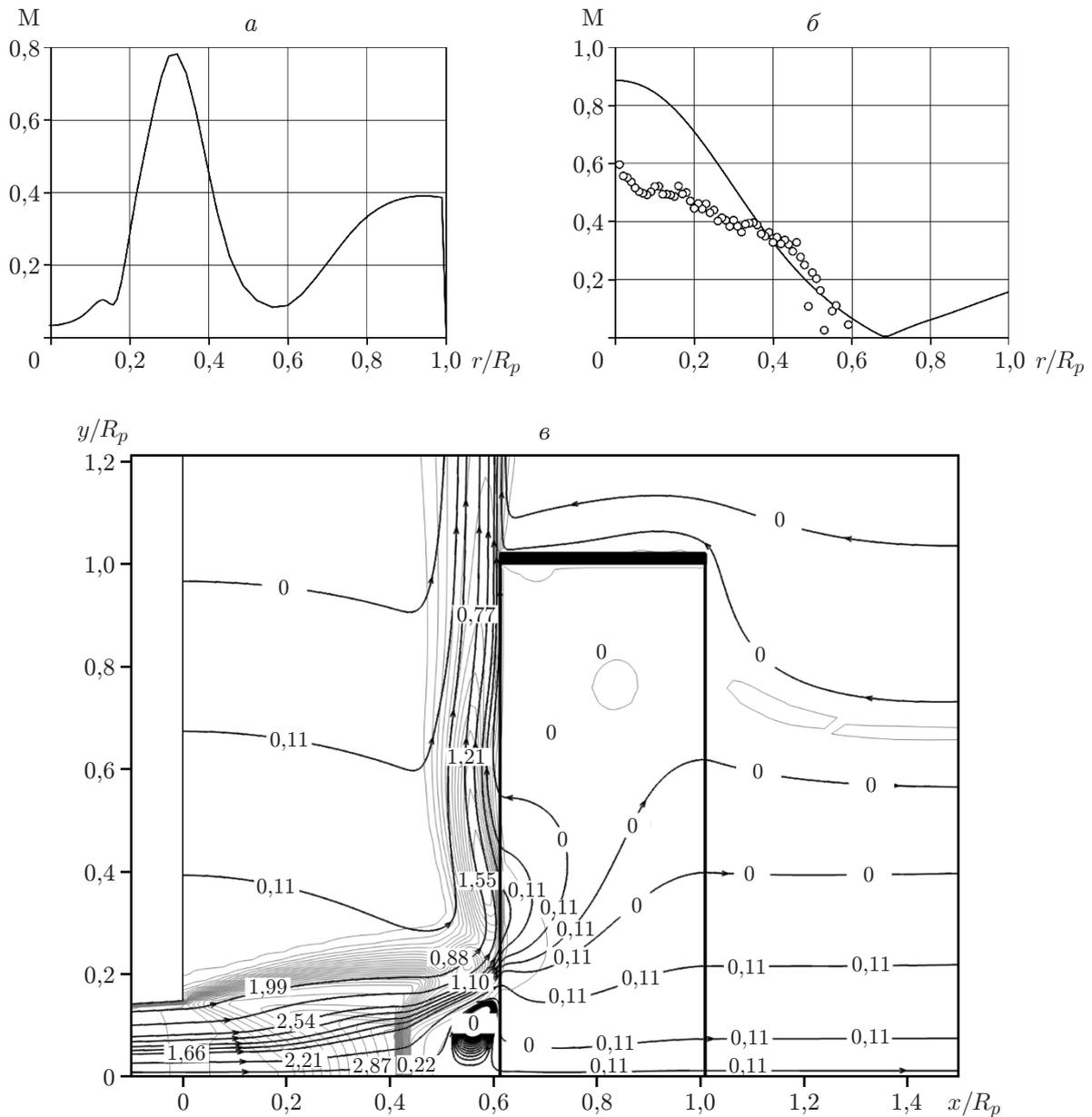


Рис. 4. Распределения числа Маха на поверхности пористой преграды (а) и за ней (б), а также линии тока в случае натекания струи на преграду (в): точки — экспериментально полученное распределение числа Маха за преградой

Поскольку максимум давления на поверхности преграды находится не на оси симметрии (см. рис. 3,а), в приосевой области между центральным скачком уплотнения и преградой образуется отрывная зона (см. рис. 3,в), имеющая форму вихря [10].

Наблюдаемое на рис. 3,а различие максимумов давления на наветренной поверхности в случаях сплошной и пористой преград обусловлено различием режимов течения в пристенной области вне циркуляционной зоны. Согласно результатам проведенных расчетов на сплошной преграде максимум давления имеет место в той области, к которой подходят линии тока, прошедшие через прямой скачок уплотнения. Затем эти линии тока поворачивают и движутся по направлению к внешней кромке преграды. Линии тока, образующие кольцевую поверхность, отделяющую циркуляционное течение от обтекающего ее пото-

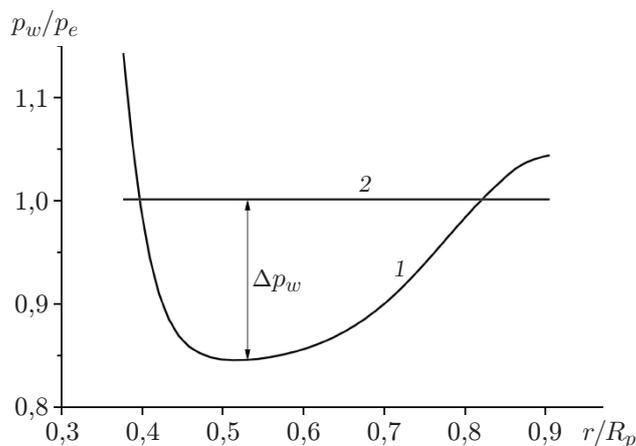


Рис. 5. Распределение статического давления фильтрации воздушного потока на входной (1) и выходной (2) плоскостях пористой преграды

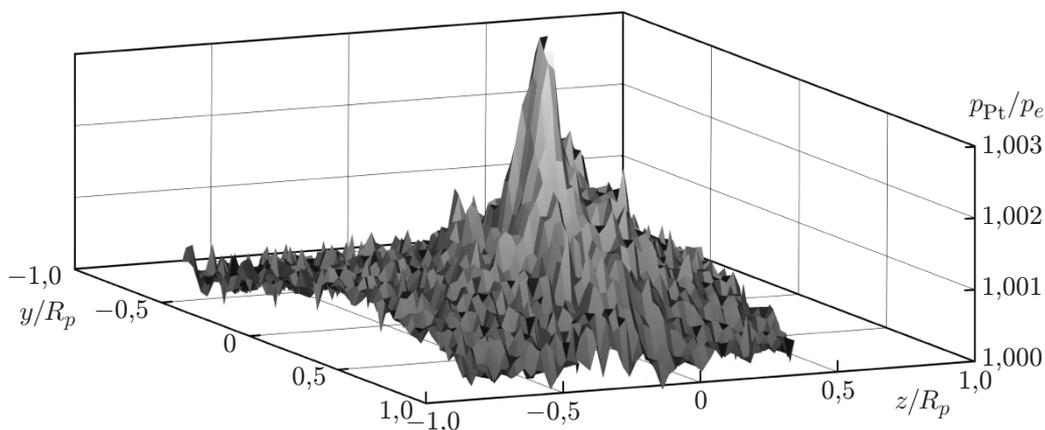


Рис. 6. Распределение относительного полного давления в потоке за пористой преградой

ка, проходят перед прямым скачком вблизи оси струи (что и обуславливает в расчете режим течения без существенных пульсаций потока). Максимум давления находится на поверхности преграды выше линии присоединения потока.

В случае пористой преграды максимум давления Пито находится в той области, к которой подходят линии тока, прошедшие через слабые висячий и отраженный скачки уплотнения. В этой области линии тока направлены внутрь пористой преграды и имеют ненулевую скорость. По-видимому, наблюдаемое различие значений максимума давления на преграде обусловлено тем, что суммарные потери полного давления за двумя косыми скачками уплотнения оказываются меньше, чем в случае прохождения через один прямой скачок. В результате вблизи области максимума давление Пито оказывается больше, чем в случае сплошной преграды. Разделяющая кольцевая поверхность тока также проходит перед прямым скачком вблизи оси струи.

На рис. 6 представлена пространственная картина течения низконапорного потока за пористой преградой в виде распределения давления Пито p_{Pt} , отнесенного к давлению в окружающей среде p_e , на координатной плоскости (y, z) , где y — вертикальная координата, z — горизонтальная. Давление дозвукового потока за пористой преградой измерялось в прямоугольнике размером 60×80 мм. Плоскость, в которой измерялось давление в

потоке, представляла собой сетку с шагом изменения координат y, z , равным 1 мм, т. е. $\Delta y = \Delta z = 0,01d_p$. Видно, что в области за пористой преградой распределение относительного давления фильтрации воздушного потока является неоднородным. Это обусловлено неравномерностью распределения коэффициентов гидравлического сопротивления в различных областях преграды. Минимальные потери давления фильтрации газа имели место в центре преграды, где вектор скорости направлен по нормали к выходной поверхности. На рис. 6 видно, что в приосевой области течения за пористой преградой относительное давление растет.

Таким образом, в работе представлена структура течения, полученная в результате численного расчета с использованием уравнения Форхгеймера, коэффициенты которого определены экспериментально. Показано, что в режиме малых пульсаций течения в приосевой области за прямым скачком уплотнения реализуется циркуляционное течение. Массовый расход воздуха, проходящего сквозь пористую преграду, составляет 14 %. Это приводит к формированию за преградой низкоскоростного неравномерного потока с максимумом давления на оси струи.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Белов С. В.** Пористые металлы в машиностроении. М.: Машиностроение, 1981.
2. **Шейдеггер А. Э.** Физика течения жидкостей через пористые среды. М.; Ижевск: Ин-т компьютер. исслед.: Науч.-издат. центр “Регулярная и хаотическая динамика”, 2008.
3. **Благосклонов В. И., Гаркуша В. И.** Исследование течения в пористой среде при заданном распределении давления на ее поверхности // Учен. зап. Центр. аэрогидродинам. ин-та. 1971. Т. 2, № 4. С. 125–129.
4. **Гаркуша В. И.** Исследование неустановившегося течения в пористой среде при воздействии на ее поверхность горячей сверхзвуковой струи // Учен. зап. Центр. аэрогидродинам. ин-та. 1973. Т. 4, № 2. С. 103–107.
5. **Матвеев С. К.** О теплообмене газовой струи с пористой преградой // Теплообмен — V: Материалы 5-й Всесоюз. конф. по теплообмену, Минск, май 1976 г. Минск: Ин-т тепло- и массообмена АН БССР, 1976. Т. 1, ч. 2. С. 160–166.
6. **Курочкин Ю. В., Пустогаров А. В.** Исследование плазмотронов с подачей рабочего тепла через пористую межэлектродную вставку // Экспериментальные исследования плазмотронов. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1977. С. 82–104.
7. **Дараган В. Д., Котов А. Ю., Мельников Г. Н. и др.** Расчет потерь давления при истечении газа через пористые материалы // Инж.-физ. журн. 1979. Т. 26, № 5. С. 787–794.
8. **Запрягаев В. И., Солотчин А. В., Кавун И. Н., Яровский Д. А.** Натекание сверхзвуковой недорасширенной струи на преграды различной проницаемости // ПМТФ. 2011. Т. 52, № 5. С. 60–67.
9. **Анцупов А. В., Куканов Ф. А.** Исследование распространения сверхзвуковой нерасчетной струи газа по плоской преграде, установленной нормально оси струи // Тр. Центр. аэрогидродинам. ин-та. 1974. Вып. 1589. С. 18–25.
10. **Губанова О. И., Лунев В. В., Пластинина Л. Н.** О центральной срывной зоне при взаимодействии сверхзвуковой недорасширенной струи с преградой // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1971. № 2. С. 135–138.