

УДК 533.6.011.5

## **Воздействие газопроницаемых материалов с изменяемой пористостью на отрывное течение при сверхзвуковом обтекании прямого уступа\***

**Б.В. Постников, К.А. Ломанович, Р.А. Пономаренко**

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

E-mail: boris@itam.nsc.ru

Представлены результаты экспериментального и численного исследований особенностей обтекания сверхзвуковым потоком модели прямого уступа с расположенной перед ним газопроницаемой вставкой с изменяемой пористостью при числах Маха набегающего потока  $M = 2,0, 2,5, 3,0$  и числе Рейнольдса  $Re = 5 \cdot 10^5$ . Газопроницаемая вставка представляла собой участок перфорированной пластины или высокопористого пористого ячеистого материала. Визуализация течения теневым методом, PIV и сажемасяной пленкой показала, что характерный размер области вихревого течения существенно снижается при увеличении пористости вставки. В численных расчетах при высоких значениях пористости вставки получены данные о смещении области рециркуляционного течения внутрь пористого материала.

**Ключевые слова:** сверхзвуковой поток, ударные волны, отрывное течение, пористость, уступ поверхности.

### **Введение**

Геометрические неоднородности на поверхности летательных аппаратов имеют чаще всего типовую геометрию прямых и обратных уступов и служат источником дополнительных тепловых и аэродинамических нагрузок [1, 2]. Газодинамические особенности отрывного течения вблизи прямого уступа рассматриваются в классической литературе по газовой динамике [3, 4]. Подробное изучение обтекания прямой и наклонной ступеней сверхзвуковым потоком было выполнено в работах [5, 6], где приводились результаты экспериментальных и численных исследований. В работах использовались теневая и сажемасяная визуализации, проводились измерения распределения давления по оси симметрии модели ступени, расположенной на протяженной пластине. Размеры модели позволяли пренебрегать краевыми эффектами. Авторами были получены данные о месте расположения точек отрыва и присоединения потока на поверхности. В работе [6] было проведено численное моделирование рассматриваемого течения в двумерной вязкой постановке с использованием двухпараметрической модели турбулентности  $k-\omega$ . Основной особенностью рассматриваемого течения, помимо головного скачка уплотнения, являлось наличие скачка уплотнения, обусловленного отрывом потока, а также рециркуляционной зоны. Последняя может приводить не только к локальному нагреву

---

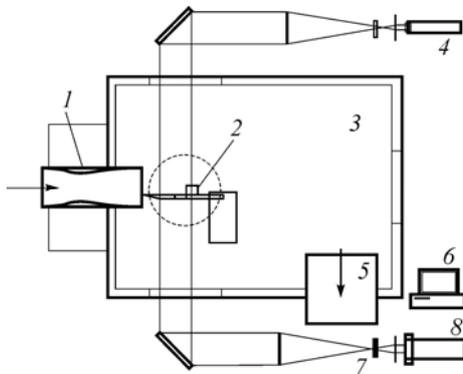
\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №16-08-00745).

поверхности при высокоскоростном обтекании угловых конфигураций, но и к развитию нежелательных режимов автоколебаний ударно-волновой структуры и самой области возвратного течения, сопровождаемых интенсивным акустическим излучением. Один из способов решения этой проблемы — применение пористых материалов с высокой газопроницаемостью. К ним относятся высокопористые проницаемые ячеистые материалы (ВПЯМ), которые широко применяются в химической промышленности, где благодаря развитой структуре поверхности они используются как носители катализатора при проведении гетерогенных химических реакций [7]. Известны работы, в которых исследовались аэродинамические характеристики моделей, включающих пористые вставки, в том числе из ВПЯМ. Так, в работе [8] была показана возможность снижения волнового сопротивления путем применения пористой вставки из ВПЯМ в носовой части осесимметричного тела. Эксперименты сопровождались численным моделированием [9]. Авторами [10] исследовались газодинамические особенности натекания сверхзвуковой струи на газопроницаемые преграды из ВПЯМ. В работе [11] была показана возможность подавления автоколебаний ударно-волновой структуры сверхзвуковой струи вблизи пористого тела воздействием электрического разряда вблизи ее корня. Применение пористых материалов в соплах исследовалось авторами [12]. В работе [13] были приведены результаты экспериментальных и численных исследований способа уменьшения донного сопротивления модели, находящейся в сверхзвуковом потоке с числом Маха  $M = 3,02$ , на основе использования вставок из пористого материала, обеспечивающих перепуск атмосферного воздуха из зоны повышенного давления (носовая часть модели) в донные области.

Отправной точкой предлагаемого исследования следует считать работу [14], в которой были представлены результаты визуализации обтекания моделей прямого уступа с пористой вставкой из ВПЯМ и с перфорацией. Вставка размещалась непосредственно перед уступом. Была показана возможность сокращения области рециркуляционного течения. В настоящей работе, в развитие [14], авторами проведено исследование структуры течения вблизи модели с использованием техники визуализации PIV и высокоскоростной видеорегистрации динамики сажемасляной пленки, нанесенной на поверхность модели. Картина течения внутри пористой вставки была получена в численном эксперименте.

### Экспериментальная установка

Экспериментальная установка представляла собой атмосферную сверхзвуковую аэродинамическую трубу с камерой Эйфеля объемом  $0,04 \text{ м}^3$  и выхлопом в вакуумную емкость  $9 \text{ м}^3$  (рис. 1). Забор воздуха производился непосредственно из помещения, где располагалась установка. Для формирования сверхзвукового потока использовались профилированные осесимметричные сопла 1, рассчитанные на числа Маха  $M = 2,0, 2,5, 3,0$  при числе Рейнольдса  $Re = 5 \cdot 10^5$ . Внутренний диаметр среза сопла составлял  $25 \text{ мм}$ .



Истечение сверхзвукового потока в камеру Эйфеля 3 позволило провести исследование обтекания модели в свободном потоке. Диффузор тракта трубы 5 располагался под углом  $90^\circ$  к оси симметрии камеры Эйфеля. Время работы установки в сверхзвуковом режиме составляло от 40 до 60 с, этого времени

Рис. 1. Схема эксперимента.

1 — сопло, 2 — модель, 3 — камера Эйфеля, 4 — лазер,  
5 — диффузор, 6 — ПК, 7 — пластинка АВТ,  
8 — скоростная камера.

достаточно для проведения PIV-диагностики потока, а также сажемасляной визуализации. Рабочая часть оснащалась пятью смотровыми и диагностическими окнами диаметром 75 мм, расположенными напротив среза сопла. В экспериментах были задействованы следующие техники визуализации потока: теневая, регистрация полей скорости методом PIV, сажемасляная. Для регистрации фазовых неоднородностей теневая съемка производилась с помощью теневого прибора ТП-АВТ-1 с адаптивным визуализирующим транспарантом (АВТ) 7 на основе фототропных материалов [15]. Прибор выполнен на базе телескопа ТАЛ-100R, диаметр наблюдаемого поля составляет 100 мм. В качестве источника света в приборе используется твердотельный Nd:YAG-лазер 4 с длиной волны 532 нм. При измерении полей скорости перед уступом использовался измеритель полей скорости «Полис» с программным пакетом для обработки данных Actual Flow. Двойной импульсный лазер Laser POLIS v3.3 с длиной волны 532 нм формировал два импульса когерентного света с временной задержкой  $1,2 \cdot 10^{-6}$  с точностью до  $10^{-8}$  с, длительность импульса лазерного излучения составляла 5 нс, максимальная частота повторения импульсов — 8 Гц. Для введения в поток частиц глицерина диаметром 0,1–5 мкм использовался генератор аэрозоля Safex, который устанавливался непосредственно перед входом в дозвуковую часть сопла Лавала. Для теневых и PIV-измерений, а также для регистрации динамики сажемасляной пленки на поверхности модели была задействована скоростная цифровая камера PCO 1200hs 8 с необходимым объективом. Камера позволяла проводить регистрацию изображений с частотой 1357 кадров/с (VGA разрешение). При проведении сажемасляной визуализации использовалась стандартная методика нанесения раствора трансформаторного масла и мелкой сажи на модель. Выбор консистенции минимизировал растекание раствора по поверхности при работе установки за пределами сверхзвукового режима.

Экспериментальная модель 2 представляла собой алюминиевую пластину шириной 23 мм и толщиной 2 мм. Полная длина пластины до кромки крепления к пилону равнялась 40 мм. Передняя нижняя кромка пластины была «срезана» под клин углом  $15^\circ$ . Радиус закругления носика составлял 10–35 мкм. Ступени из оргстекла шириной 19 мм имели равную протяженность и высоту —  $b = 5$  мм. С помощью однокомпонентного гелеобразного клея на основе цианоакрилата они крепились к пластине на относительном расстоянии от ее передней кромки  $L/b = 3$ . Область газопроницаемости позиционировалась непосредственно перед ступенью и имела одинаковую с ней ширину (19 мм) и протяженность (5 мм). Газопроницаемая область была образована равномерным перфорированием сплошных пластин тридцатью одинаковыми отверстиями диаметром из ряда 0,3, 0,5, 0,7, 1,0, 1,5 мм. Для получения зоны проницаемости со значением пористости, близким к 1,0, использовалась сквозная вставка из пеноникелиевого ВПЯМ, смонтированная заподлицо с обеих сторон пластины. Пористость зоны перфорации вычислялась согласно формуле  $\Pi = 1 - \rho_v / \rho_s$ , где  $\rho_v$  — плотность образца с порами,  $\rho_s$  — истинная плотность материала образца. В экспериментах изменение пористости области перфорации обеспечивалось заменой пластины. У используемой для этой цели вставки из ВПЯМ пористость с плотностью ячеек  $\phi = 30$  пор/дюйм с учетом внутренней канальной пористости (1–2 %) составила 0,95, что является особенностью данного материала [16]. При различных  $\phi$  образцы имеют разную газопроницаемость, но равную пористость. Для изготовления вставок были выбраны ВПЯМ, произведенные в ГНУ «Институт порошковой металлургии» НАН Беларуси с помощью дублирования полимерной матрицы пенополиуретана нанесением на ее поверхность никеля. Исходная матрица удаляется температурным воздействием.

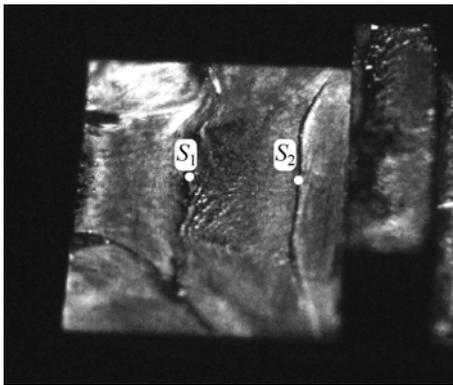


Рис. 2. Скоростная регистрация при сажемасляной визуализации.

$S_1$  — начало разворота потока,  $S_2$  — точка отрыва потока; сплошная пластина,  $M = 2,0$ .

### Результаты экспериментов

На рис. 2 приведены данные сажемасляной визуализации. Эксперимент выполнялся при скоростной видеосъемке с частотой 500 и 1000 кадров/с со временем экспозиции 40 мкс при числе Маха набегающего потока  $M = 2,0$ . При этом для увеличения контрастности модель наклонялась по тангажу на угол  $45^\circ$ , что обеспечивало четкость изображения благодаря отражению в объектив камеры источника света. Наклон модели приводил к небольшой асимметрии обтекания в силу воздействия силы тяжести на сажемасляный раствор. Наличие темных следов вблизи носика пластины связано с поступлением туда сажемасляного раствора в момент запуска установки, когда интенсивное возвратное течение, инициированное ступенью до установления сверхзвукового режима, намывает сажу по поверхности навстречу основному потоку, при этом часть ее закрепляется до окончания эксперимента. Начало изменения направления течения, то есть снижения давления на поверхности до линии отрыва, начинается в плоскости симметрии в точке  $S_1$ , эта область характеризуется «намывом» частичек сажи. Сажемасляная визуализация позволила идентифицировать возвратное течение вблизи ступени, точка  $S_2$  определяет начало отрыва потока. На поверхности в зоне возвратного течения перед ступенью следов сажемасляной пленки не наблюдается, что свидетельствует об его интенсивности. Точки  $S_1$  и  $S_2$  нанесены на совмещенные данные PIV и теневой визуализации головной ударной волны, полученные также при  $M = 2,0$  (рис. 3). Здесь показано сечение оси симметрии модели. Теневая съемка производилась с частотой до 10000 кадров/с и временем экспозиции 40 мкс. По результатам теневой визуализации было обнаружено, что головная ударная волна вблизи ступени испытывает осцилляции в частотном диапазоне от 1 до 2 кГц в зависимости от удаления ступени от передней кромки пластины, высоты ступеньки, пористости газопроницаемой области. Характерным параметром, описывающим размер отрывной зоны в условиях эксперимента, была принята величина минимального значения высоты подъема ножки головной ударной волны  $h$ . Скорость набегающего потока по данным PIV составляла 475 м/с. Вблизи препятствия происходило торможение и изменение направления течения. Относительная высота подъема ножки ударной волны над пластиной составила  $h/b = 0,76$ . При обдуве модели с пористой вставкой разворот потока внутрь вставки происходит ближе к внутреннему углу уступа, при этом ножка ударной

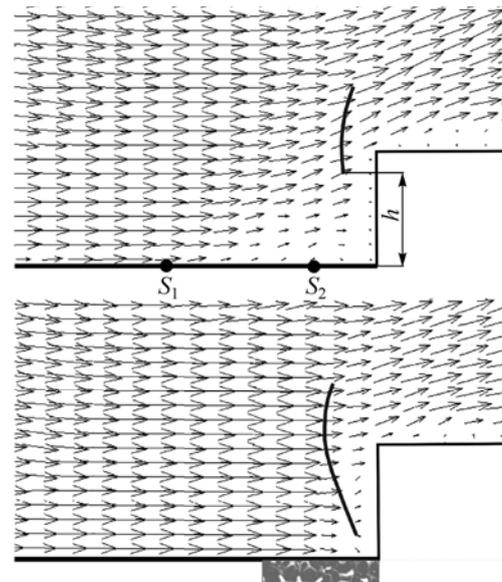
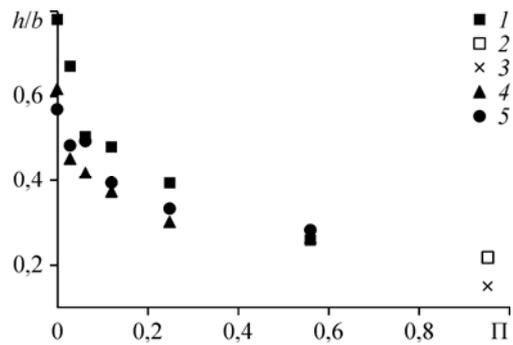


Рис. 3. Поле скоростей PIV с наложенной головной ударной волной вблизи ступени, полученное при теневой визуализации для течения на сплошной пластине (вверху) и с наличием пористой вставки (внизу) при  $M = 2,0$ .

Рис. 4. Зависимость относительной высоты подъема ножки ударной волны  $h/b$  от различных значений пористости  $\Pi$ .  
 1 —  $M = 2,0$ , перфорация; 2 —  $M = 2,0$ , ВПЯМ;  
 3 —  $M = 2,0$ , ВПЯМ, расчет; 4 —  $M = 2,5$ ,  
 перфорация; 5 —  $M = 3,0$ , перфорация.



волны опускается значительно ниже и имеет искривленную конфигурацию. Внутри пористой вставки имеет место перетекание части воздуха в направлении нижней стороны модели. Данные измерения

полей скорости позволили предположить, что внутри пористой вставки должно существовать возвратное течение. Это подтвердили результаты численных расчетов.

На рис. 4 приведены значения высоты подъема ножки ударной волны при использовании перфорированных моделей при значениях числа Маха набегающего потока  $M = 2,0, 2,5, 3,0$ . Одновременно на график нанесена точка, соответствующая эксперименту со вставкой из ВПЯМ аналогичной геометрии, в условиях обтекания потоком с числом Маха  $M = 2,0$ . Как следует из рисунка, при увеличении пористости происходит уменьшение характерной области рециркуляционного течения, максимальное ее сокращение зафиксировано для вставки из ВПЯМ с открытой пористостью, равной 0,95.

#### Численное моделирование

Численное моделирование обтекания прямого уступа проведено в программном пакете Ansys Fluent. Расчетная область представляла собой прямоугольник  $30 \times 35$  мм, высота ступени и протяженность пористой вставки соответствовали геометрии экспериментальной модели. Задача решалась в двумерной стационарной постановке с использованием модели турбулентности Спаларта–Аллмараса. Это обеспечивало приемлемое время расчетов и возможность фиксации основных особенностей течения, согласно данным работы [17]. Расчет проводился по неявной схеме второго порядка точности по пространству. В расчетной области строилась структурированная сетка с количеством ячеек  $3,7 \cdot 10^6$ . На область пористой вставки приходилось около  $2 \cdot 10^5$  ячеек. Вблизи внутреннего угла уступа и непроницаемых для газа поверхностей сетка сгущалась. По ходу вычисления производилось градиентное адаптивное изменение сетки. На внешней границе расчетной области задавалось невозмущенное течение с числом Маха  $M_\infty = 2,0$ , статическим давлением в потоке 0,128 бар и статической температурой 157 К. Пористая вставка моделировалась как пористая среда, в которой потеря импульса вследствие высокой проницаемости учитывалась только инерциальным членом в уравнении Дарси–Форхгеймера (коэффициент  $\beta$ ), определяемым квадратичным законом сопротивления. На выходе из пористой вставки задавалось граничное условие с постоянным давлением, соответствующим давлению в невозмущенном потоке. Пористость вставки составляла 0,95, что соответствует экспериментальным значениям используемых ВПЯМ. Динамический коэффициент  $\beta$  задавался исходя из данных работы [18], где авторами была получена зависимость перепада давления в пористом образце ВПЯМ от средней скорости фильтрации воздуха при ее высоких значениях. На рис. 5 приведены изолинии статического давления и модуля скорости. Из рисунка следует, что головная ударная волна опирается на область возвратного течения, которая в сравнении с непроницаемой пластиной (рис. 3) опустилась внутрь газопроницаемой вставки. Зона возвратного течения охватывает небольшую часть пластины непосредственно перед пористой вставкой. В эксперименте получены значения  $h/b = 0,2$ , тогда как при численном моделировании  $h/b = 0,15$ . Расхождение экспериментальных и расчетных данных может быть связано с тем, что при моделировании коэффициент  $\beta$

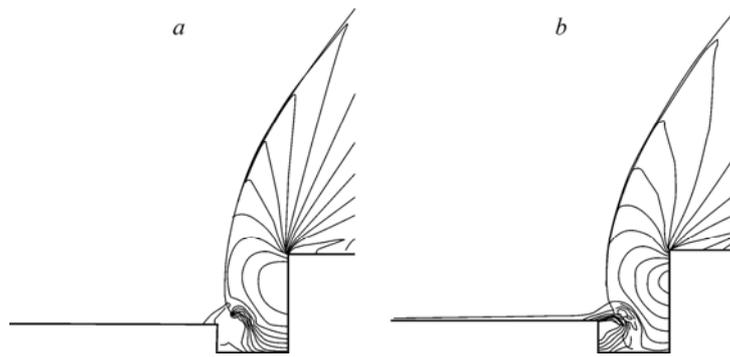


Рис. 5. Результаты расчетов.  
Изолинии статического давления (а), изолинии скорости (б);  $M = 2,0$ .

задавался единым для всей области течения в пористой вставке, тогда как из распределения поля скоростей внутри пористой вставки следует, что скорость изменяется в широком диапазоне. Отсутствие в двумерной модели оттока воздуха в поперечном к основному потоку направлении вдоль фронтальной поверхности ступеньки к периферии также оказывает влияние на положение головного скачка, который смещен вперед, в сравнении с экспериментом. Особенностью течения, полученного в расчетах, является наличие крупномасштабного возвратного течения вблизи передней стенки пористой вставки, что удовлетворительно согласуется с данными, полученными на оси экспериментальной модели, где направление скорости по данным PIV параллельно плоскости пластины на начальном отрезке зоны пористости.

### Заключение

Проведены экспериментальное и численное исследования обтекания прямого уступа поверхности с расположенной перед ним пористой вставкой в диапазоне изменения пористости  $\Pi$  от 0,03 до 0,95 сверхзвуковым потоком. Пористость обеспечивалась перфорацией модели отверстиями, а также вставкой из ВПЯМ (для  $\Pi = 0,95$ ). Выполнена визуализация течения методом PIV и высокоскоростной съемкой динамики сажемасляной пленки для числа Маха  $M = 2$ , что позволило определить положение точки отрыва и поле скоростей вблизи внутреннего угла. Показано уменьшение характерного размера области рециркуляционного течения перед ступенью с увеличением пористости для исследованной модели при числах Маха 2,0, 2,5, 3,0 для относительного удаления уступа от передней кромки пластины  $L/b = 3$ . Проведено численное моделирование обтекания экспериментальной модели со вставкой из ВПЯМ в двумерной вязкой постановке с использованием модели турбулентности Спаларта–Аллмараса для числа Маха  $M = 2,0$ . Получено удовлетворительное согласование ударно-волновой картины течения с экспериментом, критерием которого служила величина подъема ножки головной ударной волны. Данные численных расчетов позволили построить поле скоростей в пористой области и сделать вывод о наличии внутреннего возвратного течения внутри пористой вставки.

Авторы выражают признательность Е.К. Дерунову за консультацию по сажемасляной визуализации.

### Список литературы

1. Grotowsky I.M.G., Ballmann, J. Numerical investigation of hypersonic step-flows // Shock Waves. 2000. Vol. 10. P. 57–72.
2. Leite P.H.M., Santos W.F.N. Computational analysis of rarefied hypersonic flow over a forward-facing step // AIAA Paper. 2011. No. 2011–3310.

3. **Чжен П.** Управление отрывом потока: Пер. с англ. М.: Мир, 1979. 552 с.
4. **Краснов Н.Ф., Кошевой В.Н., Калугин В.Т.** Аэродинамика отрывных течений. М.: Высшая школа, 1988. 351 с.
5. **Демьяненко В.С., Желтоводов А.А.** Экспериментальное исследование отрыва турбулентного пограничного слоя в окрестности ступеньки // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1977. № 5. С. 73–80.
6. **Борисов А.В., Желтоводов А.А., Максимов А.И., Федорова Н.Н., Шпак С.И.** Экспериментальное и численное исследование сверхзвуковых турбулентных отрывных течений в окрестности двумерных препятствий // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 1999. № 2. С. 26–37.
7. **Анциферов В.Н., Макаров А.М., Остроушко А.А.** Проблемы порошкового материаловедения. Ч. VII. Высокпористые проницаемые материалы — перспективные носители катализаторов. Екатеринбург: УрО РАН, 2006. 226 с.
8. **Фомин В.М., Миронов С.Г., Сердюк К.М.** Снижение волнового сопротивления тел в сверхзвуковом потоке с помощью пористых материалов // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35, вып. 3. С. 39–45.
9. **Миронов С.Г., Маслов А.А., Поплавская Т.В., Кириловский С.В.** Моделирование сверхзвукового обтекания цилиндра с газопроницаемой пористой вставкой // Прикладная механика и техническая физика. 2015. Т. 56, № 4. С. 12–22.
10. **Запругаев В.И., Кавун И.Н., Солотчин А.В.** Структура течения при взаимодействии сверхзвуковой струи с пористой преградой // Прикладная механика и техническая физика. 2015. Т. 56, № 3. С. 73–81.
11. **Фомин В.М., Постников Б.В., Ломанович К.А.** Подавление сильных автоколебаний ударных волн электрическим разрядом // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37, № 14. С. 84–89.
12. **Зайковский В.Н., Киселев В.П., Киселев С.П., Меламед Б.М., Соколовский М.И., Тодошенко А.И., Трубачев Г.В., Фомин В.М.** О влиянии пористой вставки в сверхзвуковой части сопла на изменение его тяги // Докл. АН. 2005. Т. 401, № 4. С. 479–482.
13. **Фомин В.М., Запругаев В.И., Локотко А.В., Волков В.Ф., Луцкий А.Е., Меньшов И.С., Максимов Ю.М., Кирдяшкин А.И.** Аэродинамические характеристики тела вращения с газопроницаемыми участками поверхности // Прикладная механика и техническая физика. 2010. Т. 51, № 1. С. 79–88.
14. **Фомин В.М., Постников Б.В., Ломанович К.А.** Изменение режимов обтекания прямого уступа сверхзвуковым потоком введением газопроницаемых вставок // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41, № 18. С. 68–73.
15. **Бойко В.М., Оришич А.М., Павлов А.А., Пикалов В.В.** Методы оптической диагностики в аэрофизическом эксперименте. Новосибирск: НГУ, 2009. 450 с.
16. **Пористые проницаемые материалы:** справочное издание / под ред. Белова С.В. М.: Металлургия, 1987. 335 с.
17. **Velez C., Pie M.** Numerical studies of turbulent separation in forward facing step flows using  $k-\epsilon$ , SST, S-A and LES // AIAA Paper. 2013. No. 2013–0390.
18. **Миронов С.Г., Колотилов В.А., Маслов А.А.** Экспериментальное исследование фильтрационных характеристик высокпористых ячеистых материалов // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22, № 5. С. 599–607.

*Статья поступила в редакцию 20 апреля 2017 г.*