

УДК 532.6

ФИЗИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕРХЗВУКОВОГО ОБТЕКАНИЯ ПОД УГЛОМ АТАКИ ТЕЛ С ГАЗОПРОНИЦАЕМЫМИ ПОРИСТЫМИ ВСТАВКАМИ

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

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия
E-mails: mironov@itam.nsc.ru, kirilov@itam.nsc.ru, popla@itam.nsc.ru,
tsivan@itam.nsc.ru, maslov@itam.nsc.ru

Представлены результаты экспериментального и численного моделирования сверхзвукового обтекания под различными углами атаки цилиндра с передней газопроницаемой высокопористой вставкой. Эксперименты проведены в сверхзвуковой аэродинамической трубе при числе Маха $M_\infty = 7$ и единичном числе Рейнольдса $Re_1 = 1,5 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$ в диапазоне углов атаки $0 \div 25^\circ$. Численное моделирование выполнено на основе решения трехмерных уравнений Навье — Стокса, осредненных по Рейнольдсу, с использованием трехмерной кольцевой скелетной модели пористого материала. Получены экспериментальные и расчетные значения коэффициентов сопротивления и подъемной силы цилиндра со вставкой с пористостью 95 % и диаметром пор 2 мм при различных значениях длины вставки и угла атаки.

Ключевые слова: сверхзвуковые течения, управление обтеканием, газопроницаемые пористые вставки, аэродинамическое сопротивление.

DOI: 10.15372/PMTF20200502

Введение. В технологических процессах для управления гидродинамикой и теплообменом с участием газовых и жидкостных потоков широко используются газопроницаемые пористые материалы. В последнее время эти материалы начали применяться в аэродинамике для управления обтеканием с целью улучшения аэродинамических характеристик летательных аппаратов. В начале 2000-х гг. в Институте теоретической и прикладной механики (ИТПМ) СО РАН по инициативе академика В. М. Фомина начались экспериментальные и численные исследования сверхзвукового обтекания тел с газопроницаемыми пористыми вставками. В частности, проведены исследования обтекания цилиндра с передней газопроницаемой вставкой при значении числа Маха $M_\infty = 4,85$ [1, 2] и полого цилиндра с передней газопроницаемой вставкой при $M_\infty = 3$ [3, 4], которые показали возможность существенного снижения аэродинамического сопротивления таких моделей при обтекании под нулевым углом атаки. Результаты экспериментов с пластиной с газопроницаемой вставкой перед уступом при $M_\infty = 2 \div 5$ [5] показали возможность управления

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 19-08-00113).

© Миронов С. Г., Кириловский С. В., Поплавская Т. В., Цырюльников И. С., Маслов А. А., 2020

размером отрывной области перед уступом с помощью пористой вставки. При этом все известные исследования газопроницаемых пористых материалов, используемых в аэродинамике, выполнены для дозвуковых и трансзвуковых скоростей потока (см., например, [6]).

В результате экспериментальных и численных исследований сверхзвукового обтекания под нулевым углом атаки модели сплошного цилиндра с передней газопроницаемой пористой вставкой [6–9] установлено, что уменьшение сопротивления обусловлено формированием эффективного заостренного тела, волновое сопротивление которого меньше, чем у цилиндра без вставки. Численные исследования проводились как в рамках континуальной модели пористой среды [7], так и с использованием кольцевой скелетной модели передней пористой вставки [6, 8]. При использовании скелетной модели не требуются эмпирические данные для описания течения в пористом материале и успешно решается проблема одновременного существования сверхзвукового и дозвукового течений в пористом материале. Было показано, что величина, на которую уменьшается сопротивление, зависит от длины передней вставки, отношения диаметра цилиндра к диаметру пор и числа Маха потока. В результате обобщения экспериментальных и расчетных данных сформулирован критерий подобия [6, 9], позволяющий оценить величину относительного уменьшения коэффициента сопротивления для заданных параметров модели и набегающего потока.

Указанные исследования выполнены для нулевого угла атаки, что позволило провести численное моделирование задачи в двумерной (осесимметричной) постановке. Однако при движении реального летательного аппарата в атмосфере угол атаки может меняться, вследствие чего обтекание становится несимметричным. Поэтому важными задачами, возникающими при исследовании обтекания под углами атаки тел с газопроницаемыми пористыми вставками, являются оценка степени влияния трехмерности течения на аэродинамические силы и определение условий обтекания, при которых аэродинамическое сопротивление уменьшается.

В настоящей работе выполнены измерения сил, возникающих в продольном и поперечном направлениях относительно сверхзвукового потока ($M_\infty = 7$) при обтекании под различными углами атаки цилиндра с передней газопроницаемой пористой вставкой. Данные экспериментальных измерений дополнены результатами численного моделирования сверхзвукового обтекания с использованием трехмерной кольцевой скелетной модели пористой вставки. Получены зависимости коэффициента сопротивления и подъемной силы от длины пористой вставки и угла атаки.

Эксперимент. Экспериментальные исследования проводились в сверхзвуковой аэродинамической трубе Т-327 ИТПМ СО РАН при значениях числа Маха $M_\infty = 7$, единичного числа Рейнольдса $Re_1 = 1,5 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$, давления торможения в потоке 10^5 Па , температуры торможения 297 К . Согласно [10] при этих условиях еще не происходит конденсация воздуха в потоке. В экспериментах использовалось коническое сопло с углом расширения 18° и диаметром выходного сечения 220 мм , в котором распределение числа Маха на выходе было существенно неоднородным по диаметру сопла. Протяженность области, в которой число Маха не менялось, относительно оси сопла составляла $\pm 25 \text{ мм}$ с погрешностью 3% .

Модель, показанная на рис. 1,а, представляла собой сплошной цилиндр диаметром $D = 14,5 \text{ мм}$, по которому без зазора могла перемещаться тонкостенная трубка, удерживаемая на переднем торце цилиндрическую газопроницаемую пористую вставку из высокопористого ячеистого никеля. Путем перемещения тонкостенной трубки по цилиндру изменялась длина передней пористой вставки, выходящей в поток. Общая длина модели составляла $L = 100 \text{ мм}$, вследствие чего она могла находиться в области с постоянным числом Маха при величине угла атаки $\alpha \leq 30^\circ$. Эксперименты проводились для вставки с пористостью 95% и диаметром пор $d = 2 \text{ мм}$.



Рис. 1. Модель цилиндра с передней пористой вставкой (а) и весы в рабочей камере аэродинамической трубы с установленной на них моделью (б)

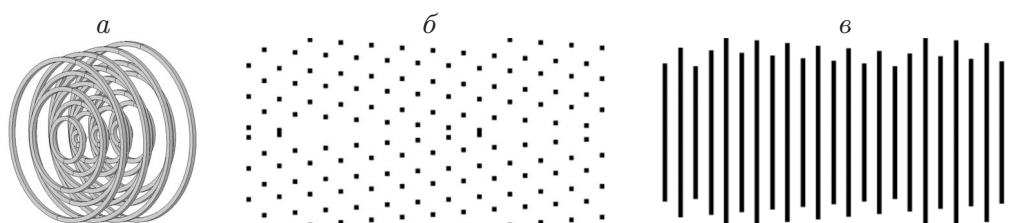


Рис. 2. Трехмерная кольцевая модель высокопористого ячеистого материала, используемая при численном моделировании (а), ее проекция на плоскость, ориентированную вдоль потока, в сечении $z = 0$ (б) и вид модели сбоку (в)

В экспериментах с помощью трехкомпонентных тензочувствительных весов проводились измерения силы сопротивления и подъемной силы, создаваемых моделью в сверхзвуковом потоке. Модель крепилась к весам с помощью державки, позволяющей изменять угол атаки (рис. 1, б). Вследствие того что размер области, в которой число Маха не меняется, ограничен, допускалось варьирование величины угла атаки модели в пределах $0 \div 25^\circ$ (погрешность его установки равна $\pm 1^\circ$).

Численное моделирование. Задача об обтекании цилиндра под углом атаки решалась с использованием трехмерных уравнений Навье — Стокса, осредненных по Рейнольдсу, с помощью пакета ANSYS Fluent. Для моделирования течения воздуха в высокопористом ячеистом материале использовалась трехмерная кольцевая модель [11] (рис. 2, а), построенная по аналогии с двумерной кольцевой скелетной моделью. Трехмерная кольцевая модель состоит из системы соосных колец различного диаметра, расположенных в шахматном порядке. В плоскости осевого сечения она представляет собой набор непроницаемых квадратных элементов (рис. 2, б), расстояние между которыми в радиальном и осевом направлениях равно диаметру пор. Вид модели сбоку свидетельствует об отсутствии радиальных перемычек между кольцевыми элементами (рис. 2, в).

Задача обтекания цилиндра с передней модельной пористой вставкой решалась с использованием неявных схем второго порядка точности по пространству. Для аппроксимации конвективных потоков использовался (Roe-FDS)-метод расщепления с TVD-ограничителем для сохранения монотонности решения вблизи разрывов и локальных экстремумов течения. Расчеты проводились при условиях, соответствующих экспериментам в сверхзвуковой аэродинамической трубе Т-327 ИТПМ СО РАН, описанным выше.

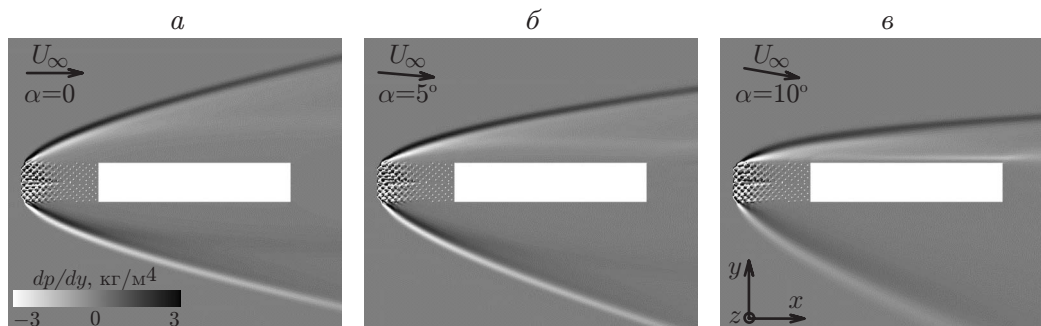


Рис. 3. Расчетные поля градиента плотности по координате y в сечении $z = 0$ в случае обтекания цилиндра с передней пористой вставкой при $D = 14,5$ мм, $L = 100$ мм, $M_\infty = 7$, $p_\infty = 24,53$ Па, $T_\infty = 27,5$ К, $Re_{1\infty} = 1,5 \cdot 10^6$ м $^{-1}$, $\Delta x/D = 2$, $d = 2$ мм и различных значениях угла атаки: a — $\alpha = 0$, b — $\alpha = 5^\circ$, v — $\alpha = 10^\circ$; стрелки — направление набегающего потока

В результате решения задачи получены газодинамические характеристики течения как вне модели, так и внутри пористого материала. Аэродинамический коэффициент сопротивления модели рассчитывался по формуле $C_x = (F_x/0,5\rho_\infty u_\infty^2)/S_m$, коэффициент подъемной силы — по формуле $C_y = (F_y/0,5\rho_\infty u_\infty^2)/S_m$ (ρ_∞ , u_∞ — плотность и скорость набегающего потока; S_m — площадь миделя модели; F_x , F_y — аэродинамические силы в продольном и поперечном относительно потока направлениях, включающие силу давления и силу трения, определяемые в ANSYS Fluent).

На рис. 3 приведены расчетные поля градиента плотности в направлении y при обтекании цилиндра с передней пористой вставкой под различными углами атаки. Видно, что при всех значениях угла атаки головной скачок уплотнения присоединен к переднему торцу модели и с увеличением угла атаки скачок с наветренной стороны приближается к поверхности цилиндра (величина угла наклона ударной волны к направлению потока уменьшается), а с подветренной — отдалается от нее.

Результаты исследования и их обсуждение. На рис. 4 приведены экспериментальные зависимости коэффициентов сопротивления C_x и подъемной силы C_y модели от нормированной длины $\Delta x/D$ пористой вставки с диаметром пор $d = 2$ мм. Видно, что при всех значениях угла атаки при увеличении длины пористой вставки сопротивление модели уменьшается, и максимальное снижение достигается при $\Delta x/D = 1,5 \div 2,0$. В то же время увеличение длины вставки приводит к увеличению подъемной силы, создаваемой моделью. Из рис. 4 следует, что максимальное уменьшение коэффициента сопротивления C_x (до 27 % по сравнению со значением C_x для цилиндра без пористой вставки) наблюдается при $\alpha = 0$ и соответствует нулевому значению коэффициента подъемной силы. При $\alpha = 25^\circ$ коэффициент C_x уменьшается на 14 %, в то время как C_y увеличивается на 9 %. Вероятно, перераспределение газового потока в передней ячейисто-пористой вставке, как и при нулевом угле атаки (см. результаты [6]), приводит к формированию течения, подобного течению при обтекании заостренного тела, в результате чего сопротивление модели в направлении набегающего потока уменьшается. В направлении, перпендикулярном набегающему потоку, при наличии пористой вставки формируется эффективно обтекаемое тело большей толщины, сопротивление которого превышает сопротивление цилиндра без вставки.

На рис. 5 приведены результаты измерений и расчета коэффициентов сопротивления и подъемной силы цилиндра без пористой вставки и с передней вставкой длиной $\Delta x = 29$ мм ($\Delta x/D = 2$) при различных значениях угла атаки. При такой длине вставки при всех значениях угла атаки наблюдается максимальное уменьшение сопротивления (см. рис. 4).

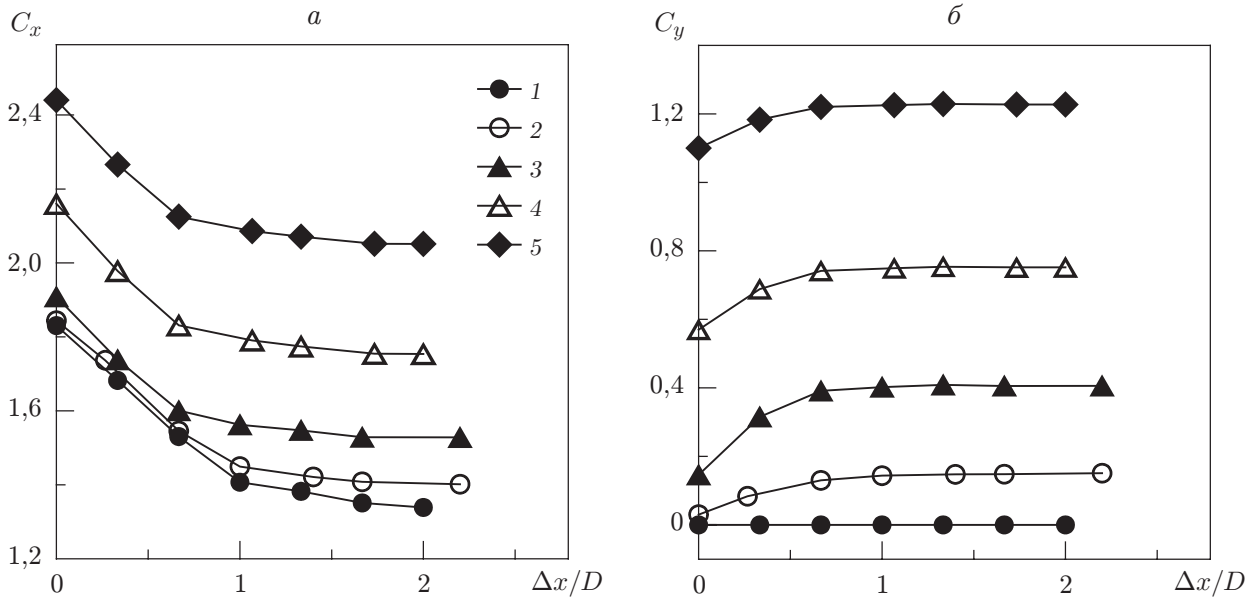


Рис. 4. Экспериментальные зависимости коэффициентов сопротивления (а) и подъемной силы (б) от нормированной длины пористой вставки $\Delta x/D$ при $M_\infty = 7$, $Re_1 = 1,5 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$, $D = 14,5 \text{ мм}$, $d = 2 \text{ мм}$ и различных значениях угла атаки:

1 — $\alpha = 0$, 2 — $\alpha = 10^\circ$, 3 — $\alpha = 15^\circ$, 4 — $\alpha = 20^\circ$, 5 — $\alpha = 25^\circ$

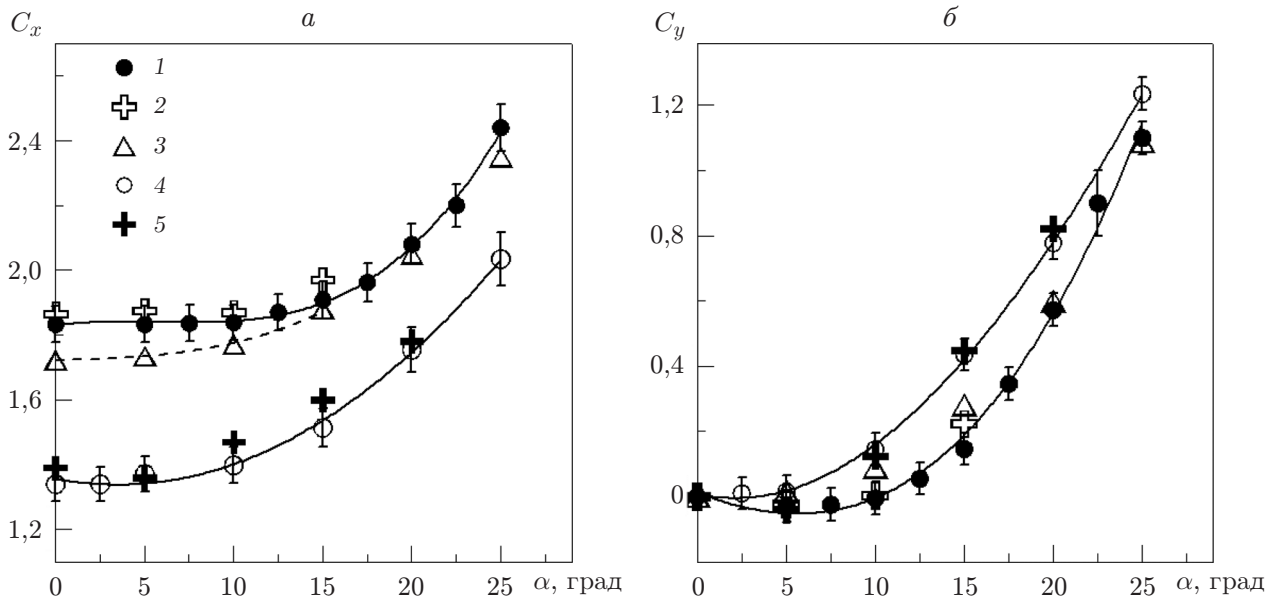


Рис. 5. Зависимости коэффициентов сопротивления (а) и подъемной силы (б) от угла атаки модели для цилиндра без пористой вставки (1–3) и цилиндра с пористой вставкой с относительной длиной $\Delta x/D = 2$ (4, 5) при $M_\infty = 4$, $Re_1 = 1,5 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$, $D = 14,5 \text{ мм}$, $d = 2 \text{ мм}$:

1, 4 — экспериментальные данные, 2, 5 — результаты расчета, 3 — экспериментальные данные [12] для цилиндра при $M = 4$, $Re_1 = 50 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$; сплошные линии — аппроксимация экспериментальных данных 1, 4, штриховая — результаты расчета [11] для условий [12]

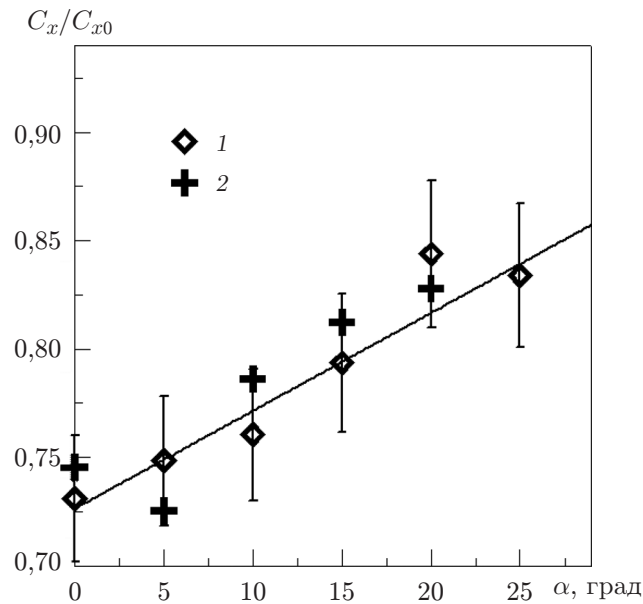


Рис. 6. Зависимость нормированного коэффициента сопротивления цилиндра с передней пористой вставкой от угла атаки при $M_\infty = 7$, $Re_1 = 1,5 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$, $\Delta x/D = 2$, $D = 14,5 \text{ мм}$, $d = 2 \text{ мм}$:
 1 — экспериментальные данные, 2 — результаты расчета

Экспериментальные и расчетные данные показывают, что увеличение угла атаки приводит к росту как коэффициента сопротивления (см. рис. 5, *a*), так и коэффициента подъемной силы (см. рис. 5, *б*). На рис. 5 дополнительно приведены экспериментальные зависимости от величины угла атаки коэффициентов сопротивления и подъемной силы цилиндра без пористой вставки, полученные в [12] при $M_\infty = 4$, $Re_1 = 50 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$, а также расчетные данные [11] для условий обтекания этой модели. Видно, что в этом случае зависимости аэродинамических коэффициентов от угла атаки также возрастают.

Увеличение угла атаки приводит к изменению нормированного коэффициента сопротивления модели C_x/C_{x0} , который определяется как отношение величины C_x цилиндра с передней пористой вставкой к величине C_{x0} цилиндра без пористой вставки и фактически является мерой снижения аэродинамического сопротивления цилиндра с пористой вставкой. На рис. 6 приведена зависимость нормированного коэффициента сопротивления от угла атаки, вычисленная по экспериментальным и расчетным данным. Видно, что при всех рассмотренных значениях угла атаки сопротивление цилиндра с передней пористой вставкой меньше сопротивления цилиндра без вставки ($C_x/C_{x0} < 1$), однако с ростом угла атаки этот эффект ослабевает.

Заключение. Выполнено моделирование сверхзвукового обтекания цилиндра с передней газопроницаемой вставкой из высокопористого ячеистого материала в широком диапазоне углов атаки.

В сверхзвуковой аэродинамической трубе Т-327 проведены весовые измерения и получены зависимости от угла атаки коэффициента сопротивления и коэффициента подъемной силы цилиндра при наличии и в отсутствие передней пористой вставки. Установлено, что при всех значениях угла атаки при увеличении длины пористой вставки коэффициент сопротивления модели уменьшается, а коэффициент подъемной силы возрастает.

Путем численного моделирования на основе решения трехмерных уравнений Навье — Стокса, осредненных по Рейнольдсу, и с использованием трехмерной кольцевой скелетной

модели пористого материала вычислены аэродинамические коэффициенты и построены поля внешнего течения и течения внутри пористой вставки при различных значениях угла атаки. Полученные экспериментальные и расчетные данные хорошо согласуются. Показано, что уменьшение сопротивления, создаваемого передней пористой вставкой, происходит при всех рассмотренных значениях угла атаки.

ЛИТЕРАТУРА

1. **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.
2. **Бедарев И. А., Миронов С. Г., Сердюк К. М. и др.** Физическое и математическое моделирование сверхзвукового обтекания цилиндра с пористой вставкой // ПМТФ. 2011. Т. 52, № 1. С. 13–23.
3. **Фомин В. М., Запрягаев В. И., Локотко А. В., Волков В. Ф.** Влияние газопроницаемых участков поверхности на аэродинамические характеристики тела вращения при сверхзвуковых скоростях // Докл. АН. 2009. Т. 427, № 5. С. 627–628.
4. **Фомин В. М., Запрягаев В. И., Локотко А. В. и др.** Аэродинамические характеристики тела вращения с газопроницаемыми участками поверхности // ПМТФ. 2010. Т. 51, № 1. С. 79–88.
5. **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, вып. 18. С. 68–73.
6. **Maslov A. A., Mironov S. G., Poplavskaya T. V., Kirilovskiy S. V.** Supersonic flow around a cylinder with a permeable high-porosity insert: experiment and numerical simulation // J. Fluid Mech. 2019. V. 867. P. 611–632.
7. **Миронов С. Г., Маслов А. А., Поплавская Т. В., Кириловский С. В.** Моделирование сверхзвукового обтекания цилиндра с газопроницаемой пористой вставкой // ПМТФ. 2015. Т. 56, № 4. С. 12–22.
8. **Кириловский С. В., Маслов А. А., Миронов С. Г., Поплавская Т. В.** Применение скелетной модели высокопористого ячеистого материала для моделирования сверхзвукового обтекания цилиндра с передней газопроницаемой вставкой // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2018. № 3. С. 78–86.
9. **Миронов С. Г., Поплавская Т. В., Кириловский С. В., Маслов А. А.** Критерий подобия сверхзвукового обтекания цилиндра с передней высокопористой ячеистой вставкой // Письма в ЖТФ. 2018. Т. 44, вып. 6. С. 3–10.
10. **Daum F. L., Gyarmathy G.** Condensation of air and nitrogen in hypersonic wind tunnels // AIAA J. 1968. V. 6, N 3. P. 458–465.
11. **Mironov S. G., Kirilovskiy S. V., Militsina T. S., et al.** Effect of the structure of skeleton models of cellular materials on the drag of a cylinder with a frontal gas-permeable insert in a supersonic flow // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. V. 1404. 012032.
12. **Корнилов В. И., Лысенко В. И.** Исследование аэродинамических характеристик цилиндрических тел в сверхзвуковом потоке газа // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Сер. Физика. 2011. Т. 6, вып. 4. С. 16–24.

*Поступила в редакцию 26/V 2020 г.,
после доработки — 26/V 2020 г.
Принята к публикации 29/V 2020 г.*