

03.1

Метод управления аэродинамическим сопротивлением цилиндра с газопроницаемыми пористыми вставками путем регулирования донного давления

© С.Г. Миронов^{1,2}, И.Р. Валиуллин¹, Т.В. Поплавская^{1,2}¹ Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск, Россия² Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск, Россия
E-mail: mironov@itam.nsc.ru

Поступило в Редакцию 21 декабря 2020 г.

В окончательной редакции 21 января 2021 г.

Принято к публикации 21 января 2021 г.

Приведены результаты экспериментального и численного исследования сверхзвукового ($M_\infty = 7$) обтекания полого цилиндра с газопроницаемыми пористыми вставками, расположенного вдоль потока. Показана возможность управления аэродинамическим сопротивлением модели путем перепуска части набегающего потока в донную область через газопроницаемые пористые вставки. Регулирование расхода воздуха, направляемого в донную область для управления сопротивлением, осуществлялось с помощью нагревания пористых вставок электрическим тлеющим разрядом.

Ключевые слова: аэродинамическое сопротивление, управление, пористые материалы.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.08.50853.18680

Для сверхзвукового летательного аппарата (ЛА) донное сопротивление, возникающее вследствие разрежения в следе за ЛА, составляет значительную долю силы аэродинамического сопротивления. Подача в донную область небольшого количества газа, составляющего $\sim 1\text{--}2\%$ от расхода набегающего потока, позволяет существенно увеличить донное давление и, следовательно, уменьшить аэродинамическое сопротивление ЛА [1]. В исследованиях [1–3] для увеличения донного давления использован выдув в донную область холодных или горячих газов различного состава из модели ЛА. Альтернативой этому является отбор воздуха из внешнего потока и подача его в донную область через щелевые вырезы в кормовых насадках [4] или с помощью газопроницаемой пористой головной части [5]. В последнем случае донное давление изменялось механическим устройством регулирования подачи [5].

В настоящей работе на основе общего принципа управления аэродинамическим сопротивлением с помощью подачи газа в донную область предложен метод регулирования отбираемого из потока воздуха без использования механических устройств. Метод основан на изменении гидравлического сопротивления пористого материала при его нагревании электрическим тлеющим разрядом. Выполнено экспериментальное и численное исследование обтекания модели цилиндра с нагреваемыми высокопористыми вставками.

Эксперименты были выполнены в сверхзвуковой аэродинамической трубе ИТПМ СО РАН Т-327 при числе Маха $M_\infty = 7$ и единичном числе Рейнольдса $Re_1 = 1.5 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$. Модель (рис. 1) представляла собой полый тефлоновый цилиндр длиной 42 мм с внешним диаметром 27 мм и толщиной стенки 1.5 мм. Передний

и задний торцы цилиндра были заглушены двумя газопроницаемыми пористыми вставками из ячеисто-пористого никеля толщиной 10 мм с диаметром пор $d = 1 \text{ мм}$ и величиной пористости 95%. Пористые вставки являлись электродами тлеющего разряда, возникающего между ними внутри цилиндра при подаче напряжения. Передняя вставка являлась катодом, задняя — анодом. Цилиндр устанавливался вдоль потока на тензovesы с помощью державки из трех тонких консолей. На оси симметрии в донной области на расстоянии 4 мм от задней торцевой вставки была установлена медь-константановая термопара, которая измеряла температуру воздуха, прошедшего через обе пористые вставки. Показания термопары являлись индикатором эффективности нагревания воздуха при его прохождении в донную область через пористые вставки. Такая геометрия модели наиболее прямо реализует принцип отвода части набегающего потока в донную область. Модель без нагревания вставок имеет коэффициент сопротивления $C_{x0} = 1.51$ при его максимальной величине для сплошного цилиндра 1.84. В пределах разницы этих коэффициентов возможно управление аэродинамическим сопротивлением модели.

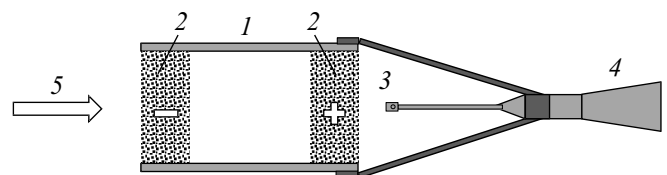


Рис. 1. Схема модели. 1 — тефлоновый цилиндр, 2 — газопроницаемые пористые вставки, 3 — термопара, 4 — тензovesы, 5 — набегающий поток.

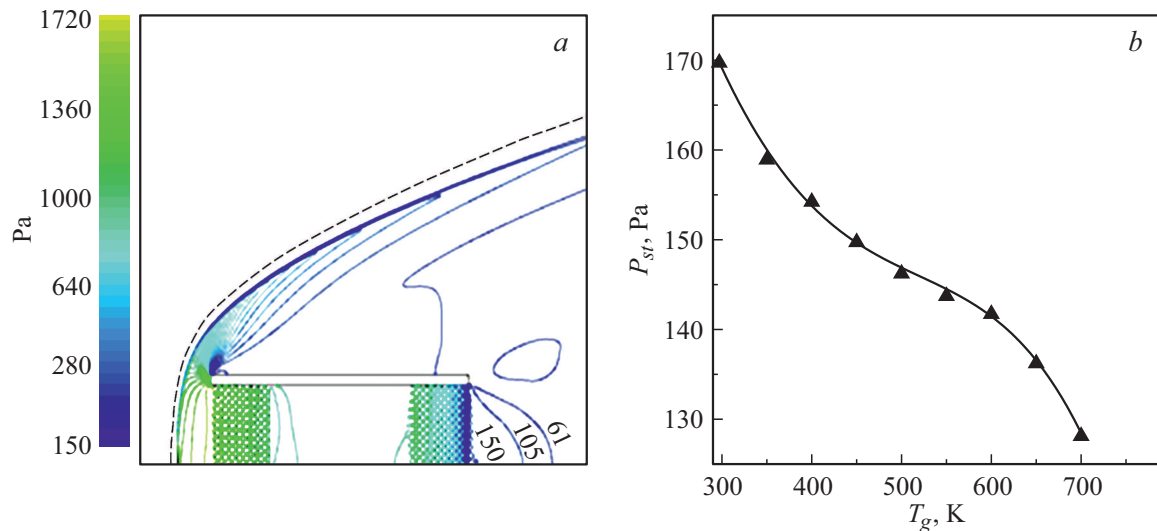


Рис. 2. *a* — изолинии статического давления при температуре воздуха в донной области $T_g = 297$ К, штриховая кривая — положение головной ударной волны при температуре $T_g = 700$ К. *b* — зависимость статического давления на оси симметрии вблизи задней пористой вставки от температуры воздуха в донной области T_g .

В эксперименте в аэродинамической трубе производилась одновременная регистрация температуры воздуха в донной области и величины силы сопротивления модели. По данным весовых измерений строились зависимости силы аэродинамического сопротивления модели F от температуры прошедшего через нее воздуха T_g . В экспериментах варьировалась мощность электрического тлеющего разряда в диапазоне от 40 до 190 W путем изменения величины балластного сопротивления в цепи разряда, что составляет от 11 до 53% мощности набегающего потока. Поскольку основная энергия разряда выделяется на пористых электродах, это дает возможность нагрева пористого материала вставок.

В специальных экспериментах термопарами измерялось распределение температуры на оси торцевой вставки при ее обтекании сверхзвуковым потоком воздуха и нагревании со стороны донной области электрическим тлеющим разрядом. Измерения показали практически линейный рост температуры материала вставки по продольной координате, отсчитываемой от переднего торца. В отсутствие набегающего потока разряд проникал в пористый материал на всю длину вставки, обеспечивая ее равномерный нагрев.

Задача численного моделирования осесимметричного обтекания цилиндра с газопроницаемыми торцевыми вставками решалась с использованием пакета ANSYS Fluent в рамках двумерных уравнений Навье–Стокса, осредненных по Рейнольдсу, с использованием $k-\omega$ -SST-модели турбулентности, неявных схем второго порядка точности по пространству и Roe-FDS методом расщепления для аппроксимации конвективных потоков. Для моделирования торцевых газопроницаемых вставок использовалась кольцевая скелетная модель пористой среды [6,7], в плоскости осевого сечения представляющая собой набор непроницаемых квадрат-

ных элементов, расположенных в шахматном порядке, расстояние между которыми в радиальном и осевом направлениях равно диаметру пор.

Проекция расчетной области на плоскость представляет собой прямоугольник, нижняя сторона которого совпадает с осью симметрии цилиндра (рис. 2, *a*). Внутри цилиндра и в пористых вставках расчетная область покрывалась равномерной прямоугольной расчетной сеткой, вне цилиндра расчетная сетка сгущалась вблизи переднего торца модели и к поверхностям цилиндра. На поверхности цилиндра и на каждом элементе скелета пористой вставки задавались условия прилипания и постоянства температуры. Для задания температуры на элементах скелета передней торцевой вставки, согласно данным измерений (см. выше), использовалась линейно возрастающая зависимость температуры. Минимальная температура равнялась температуре торможения 297 K, а максимальная полагалась равной температуре воздуха T_g , измеренной в донной области. Температура на элементах скелета задней торцевой вставки полагалась равной температуре T_g по всей длине вставки. Коэффициент аэродинамического сопротивления модели вычислялся по соотношению $C_x = F / (0.5\rho_\infty u_\infty^2 S_m)$, где ρ_∞ , u_∞ — плотность и скорость набегающего потока, S_m — площадь мишени модели, F — аэродинамическая сила, определяемая в пакете ANSYS Fluent и включающая в себя силу давления и силу трения.

На рис. 2, *a* приведены изолинии статического давления для $T_g = 297$ К, штриховой кривой на рисунке показано положение головной ударной волны при $T_g = 700$ К. Расчетная зависимость статического давления P_{st} на оси симметрии модели вблизи задней торцевой вставки от температуры воздуха T_g приведена на рис. 2, *b*. Из данных рис. 2 видно, что при нагревании пористых вставок давление в донной области падает, го-

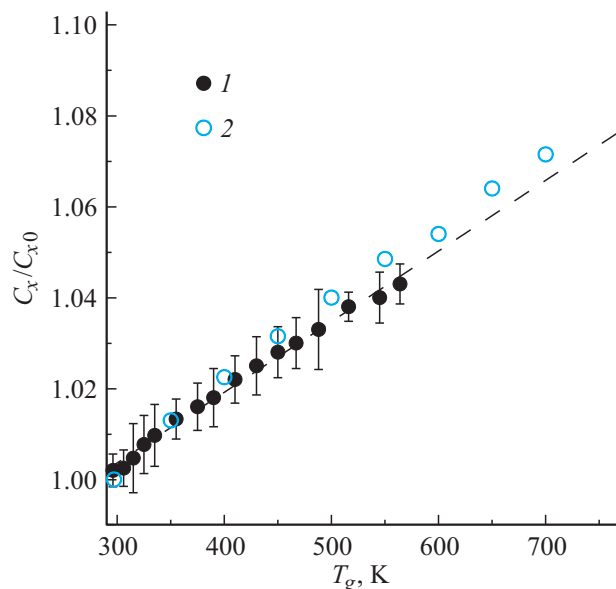


Рис. 3. Зависимость нормированного коэффициента сопротивления модели от температуры воздуха в донной области. 1 — эксперимент, 2 — расчет.

ловная ударная волна смещается вверх по потоку и угол ее наклона к направлению потока увеличивается, что связано с уменьшением расхода воздуха, перетекающего в донную область. Вследствие этого должен возрастать коэффициент аэродинамического сопротивления C_x .

Весовые измерения показали однозначную связь между коэффициентом сопротивления C_x и температурой воздуха в донной области T_g независимо от мощности тлеющего разряда. Это позволило обобщить экспериментальные данные в виде единой зависимости, представленной на рис. 3. Видно практически линейное возрастание нормированного коэффициента сопротивления C_x/C_{x0} от температуры T_g . На рис. 3 также приведены данные численного моделирования. Видно совпадение результатов эксперимента и расчета.

Таким образом, выполнено экспериментальное и численное моделирование обтекания сверхзвуковым потоком полого цилиндра с газопроницаемыми пористыми вставками, нагреваемыми электрическим тлеющим разрядом. Получены зависимости относительного увеличения аэродинамического сопротивления от температуры прошедшего через модель воздуха. Продемонстрирована возможность управления аэродинамическим сопротивлением с помощью регулирования подачи воздуха в донную область модели при нагревании электрическим тлеющим разрядом пористых вставок.

Финансирование работы

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] А.И. Швец, И.Т. Швец, *Газодинамика ближнего следа* (Наук. думка, Киев, 1976).
- [2] В.К. Басев, А.Ф. Гаранин, П.К. Третьяков, *Физика горения и взрыва*, **11** (6), 859 (1975).
- [3] А.Ф. Гаранин, А.И. Глаголев, А.И. Зубков, Л.Д. Сухановская, *Изв. РАН. Механика жидкости и газа*, № 2, 158 (2002). [Пер. версия: 10.1023/A:1015822703200].
- [4] Г.Л. Гродзовский, Ю.А. Лашков, Г.П. Свищев, И.Н. Соколова, *Учен. зап. ЦАГИ*, **3** (2), 21 (1972).
- [5] В.М. Фомин, В.И. Запругаев, А.В. Локотко, В.Ф. Волков, А.Е. Луцкий, И.С. Меньшов, Ю.М. Максимов, А.И. Кирдяшкин, *Прикл. механика и техн. физика*, № 1, 79 (2010). [Пер. версия: 10.1007/s10808-010-0010-5].
- [6] С.В. Кириловский, А.А. Маслов, С.Г. Миронов, Т.В. Поплавская, *Изв. РАН. Механика жидкости и газа*, № 3, 78 (2018). [Пер. версия: 10.1134/S0015462818030102].
- [7] A.A. Maslov, S.G. Mironov, T.V. Poplavskaya, S.V. Kirilovskiy, *J. Fluid Mech.*, **867**, 611 (2019). <https://doi.org/10.1017/jfm.2019.165>