

03

Управление аэродинамическими силами с помощью газопроницаемых пористых материалов

© С.Г. Миронов, А.А. Маслов, И.С. Цырюльников

Новосибирский государственный университет
Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск
E-mail: mironov@itam.nsc.ru

Поступило в Редакцию 13 мая 2014 г.

Приведены результаты экспериментального исследования влияния несимметричного нагрева газопроницаемых пористых вставок перед цилиндром в сверхзвуковом потоке $M_\infty = 4.85$ на обтекание модели. Нагрев вставок осуществлен электрическим тлеющим разрядом, показано возникновение сил, перпендикулярных оси модели, определены их количественные характеристики.

Газопроницаемые пористые материалы открывают новые возможности управления аэродинамическими силами при движении тел в атмосфере. Использование пористых покрытий позволило существенно увеличить длину ламинарного участка гиперзвукового пограничного слоя и снизить сопротивление трения на конусе [1]. В работе [2] была продемонстрирована возможность снижения волнового сопротивления в сверхзвуковом потоке цилиндра с передней газопроницаемой пористой вставкой. В [2] управление сопротивлением модели осуществлялось путем увеличения длины передней пористой вставки. Для вставки с величиной пористости 95% было достигнуто снижение сопротивления до 40% от первоначальной величины сопротивления цилиндра без вставки. Основным недостатком управления аэродинамическими силами с помощью выдвигания в набегающий поток пористых газопроницаемых материалов является относительно большое время механического перемещения пористого материала и необходимость наличия устройств для его перемещения. Примером управления волновым сопротивлением тела без применения механических устройств является использование выдува плазменной струи навстречу сверхзвуковому потоку [3].

В работе [4] было показано, что при обтекании газопроницаемой передней пористой вставки перед цилиндром формируется эффективное заостренное тело, волновое сопротивление которого меньше сопротивления цилиндра без вставки. Из результатов этой работы также следует, что при наличии поперечной набегающему потоку неоднородности гидравлических характеристик пористого материала возможно создание боковых аэродинамических усилий по углам тангажа и рысканья. Поперечная неоднородность гидравлических характеристик может быть создана с помощью выборочного нагрева части пористого материала различными способами, например электрическим тлеющим разрядом, омическим нагревом или с помощью беспламенного каталитического горения смеси горючих газов в порах материала. Нагрев пористого материала увеличивает гидравлическое сопротивление для движения воздуха в порах вследствие падения плотности потока и роста вязкости газа. Предварительные методические эксперименты по влиянию температуры пористого материала из вспененного никеля на одномерное течение воздуха сквозь пористый материал показали, что расход газа падает с температурой пропорционально $T^{-(0.4 \pm 0.05)}$. Это позволяет достаточно эффективно управлять гидравлическим сопротивлением пористого материала с помощью его нагрева.

В данной работе приведены результаты экспериментов по созданию боковых аэродинамических сил с помощью газопроницаемого пористого материала, расположенного перед цилиндром, продольного направлению сверхзвукового потока. В частности, реализован метод управления с помощью несимметричного нагрева пористого материала электрическим тлеющим разрядом.

Эксперименты были выполнены в сверхзвуковой аэродинамической трубе при числе Маха потока $M_\infty = 4.85$ и единичном числе Рейнольдса $Re_{1\infty} = 2.7 \cdot 10^6 \text{ m}^{-1}$. Температура торможения потока составляла 294 К. Эксперименты проводились на цилиндрической модели диаметром 20 мм, схема которой приведена на рис. 1. Передняя пористая вставка из вспененного никеля с пористостью 95% и диаметром пор 1 мм была разделена на две половины изолятором. На переднем торце цилиндра из изолятора располагался анод в виде диска. Электрический тлеющий разряд осуществлялся между анодом и одной из половинок передней пористой вставки, которая служила катодом. Такая подача напряжения обеспечивала максимальный нагрев пористого материала при минимуме нагрева анода. Кроме того, в схеме с пористым матери-

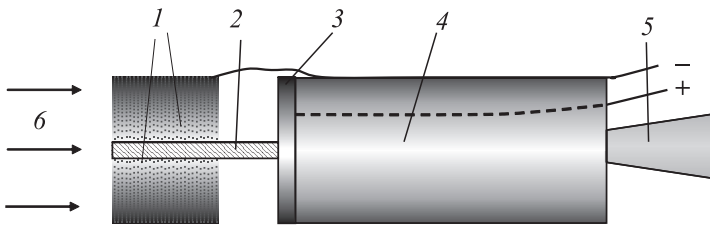


Рис. 1. Схема модели: 1 — пористый материал (катод); 2 — изолятор между полуцилиндрами пористого материала; 3 — анод; 4 — цилиндр из изолятора; 5 — тензосесы; 6 — набегающий поток.

алом в качестве катода реализуется тлеющий разряд с полым катодом, который обеспечивает большой ток разряда при устойчивом его горении в сносящем потоке воздуха и значительное проникновение разряда в объем пористой вставки. В данном случае полыми катодами служили поры в никеле. Тем не менее при длине пористых вставок менее 10 мм тлеющий разряд в потоке не зажигался из-за сноса потоком. Максимальная электрическая мощность, вкладываемая в разряд, составляла 170 Вт, что повышало температуру заднего торца пористой вставки до 700 К. Мощность разряда регулировалась изменением величины балластного сопротивления в электрической цепи. Модель устанавливалась на тензосесах, которые измеряли усилия в направлении, перпендикулярном направлению набегающего потока, возникающие при зажигании тлеющего разряда. В данном случае это силы вверх или вниз в плоскости рисунка. Влияние пандеромоторных сил на подводящих ток проводниках на измерения тензосесами оценивалось при включении разряда на модели без потока при низком давлении в рабочей камере аэродинамической трубы. Измерения показали отсутствие сигнала тензосесов при включении разряда без потока.

На рис. 2 приведена зависимость величины аэродинамического коэффициента боковой силы C_y от электрической мощности W , вкладываемой в разряд. Коэффициент боковой силы вычислялся стандартным образом как $C_y = \frac{F_y}{\frac{1}{2}\rho_\infty U_\infty^2 S}$. Здесь F_y — величина боковой силы, измеряемой тензосесами; ρ_∞ , U_∞ и S — соответственно плотность, скорость воздуха в набегающем потоке и площадь мишени модели. Из графика видно, что для данной конструкции модели величина боковых сил не

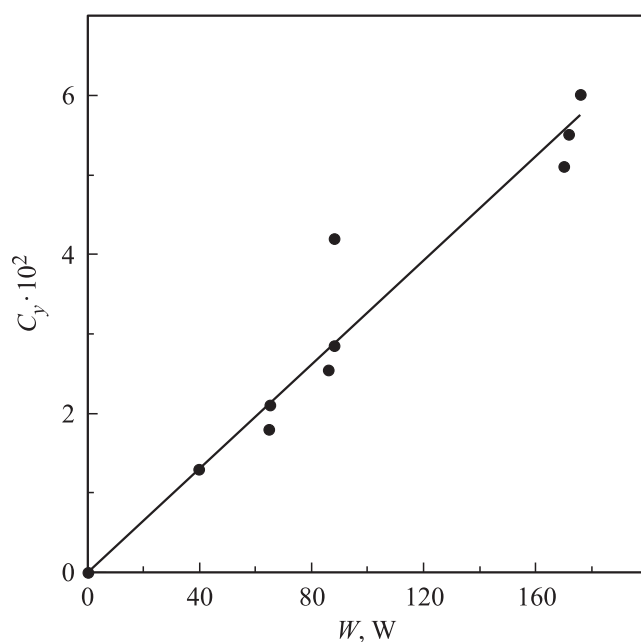


Рис. 2. Зависимость величины коэффициента силы C_y от мощности тлеющего разряда W .

превышает 3% от скоростного напора при максимальной величине мощности W и линейно зависит от мощности разряда. Возможно, предложенная в статье геометрия модели и организация горения тлеющего разряда не является оптимальной для создания больших значений боковых сил, что предполагает проведение дальнейших расчетных и экспериментальных исследований. После выключения разряда пористая вставка охлаждалась набегающим потоком и боковая сила на модели исчезала. Эксперименты показали, что время разогрева пористого материала разрядом и его охлаждение после его выключения составляет менее 1 s, что определяется малой массой материала пористой вставки и большой площадью поверхности пор.

Объяснение эффекта возникновения боковых сил при разогреве одной из пористых вставок тлеющим разрядом дает рис. 3. На рисунке



Рис. 3. Шлирен-визуализация положения головной ударной волны при отсутствии (1) и наличии (2) тлеющего разряда на одной из пористых вставок модели.

приведен результат вычитания двух шлирен-снимков обтекания модели без разряда и с разрядом. Для наглядности тело модели выделено черным цветом. На верхней половине рисунка хорошо видно катодное свечение в объеме пористой вставки и заметное различие в положении головной ударной волны в отсутствие и при наличии тлеющего разряда между передним торцом цилиндра (анодом) и верхней газопроницаемой пористой вставкой (катодом). В нижней половине рис. 3 изображения ударных волн совпадают и полностью вычитаются. При включении разряда и разогреве пористого материала увеличивается сопротивление движению воздуха в порах материала, которое приводит к увеличению угла наклона ударной волны к направлению потока, росту давления за ударной волной и возникновению дисбаланса нормальных к направ-

лению потока сил. Это в свою очередь приводит к возникновению результирующей силы F_y , направленной в данном случае вниз рисунка.

Таким образом, впервые продемонстрирована возможность создания контролируемых боковых аэродинамических сил в сверхзвуковом потоке с помощью несимметричного нагрева материала передних пористых газопроницаемых вставок. Реализован вариант нагрева пористого материала с помощью электрического тлеющего разряда.

Работа выполнена в Новосибирском государственном университете в рамках гранта Правительства РФ (Договор № 14.Z50.31.0019) по поддержке исследований под руководством ведущих ученых.

Список литературы

- [1] *Fedorov A., Kozlov V., Shplyuk A., Maslov A. et al. // AIAA J. 2006. V. 44. N 8. P. 1866–1871.*
- [2] *Фомин В.М., Миронов С.Г., Сердюк К.М. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. В. 3. С. 39–45.*
- [3] *Fomin V.M., Maslov A.A., Malmuth N.D. et al. // AIAA J. 2002. V. 40. N 6. P. 1170–1177.*
- [4] *Бедарев И.А., Миронов С.Г., Сердюк К.М., Федоров А.В., Фомин В.М. // ПМТФ. 2011. Т. 52. № 11. С. 13–23.*