

УДК 533.6.011.5

Воздействие сетчатых экранов на волновое сопротивление затупленного тела в сверхзвуковом потоке

С.Г. Миронов^{1,2}, К.М. Сердюк¹

¹*Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

²*Новосибирский государственный университет*

E-mails: mironov@itam.nsc.ru, colapis@mail.ru

Приведены результаты экспериментального исследования воздействия плоских сетчатых экранов на волновое сопротивление цилиндра с плоским торцом, продольно обтекаемым сверхзвуковым потоком воздуха при числе Маха $M = 4,85$. Получены данные о снижении аэродинамического сопротивления при использовании сеток различной геометрии и прозрачности, расположенных перед торцом цилиндра. Проведены весовые, пневмометрические измерения, измерение векторного поля скоростей PIV-методом, а также визуализация поля течения вокруг системы "цилиндр — сетчатый экран". Показана возможность существенного (до 45 %) снижения волнового сопротивления цилиндра с сетчатым экраном, дана физическая интерпретация эффекта снижения волнового сопротивления.

Ключевые слова: сверхзвуковые течения, плоские сетчатые экраны перед торцом цилиндра, волновое сопротивление.

Введение

Научно-исследовательские работы по созданию перспективных гиперзвуковых летательных аппаратов выявили необходимость конверсии жидкого топлива в газообразное перед его подачей в прямоточный воздушно-реактивный двигатель за счет тепла аэродинамического нагрева [1]. Это обеспечивает меньшую длину перемешивания топлива с воздухом в камере сгорания и уменьшает время индукции смеси перед началом горения, что существенно сокращает вес и длину двигателя. Наиболее эффективным теплообменным устройством для осуществления процесса конверсии может быть система тонких труб, обтекаемых горячим воздухом набегающего потока, через которые течет жидкое топливо. Предельным случаем такого устройства является плоский трубчатый экран в виде сетки. С другой стороны, взаимодействие сетчатого экрана со сверхзвуковым или гиперзвуковым потоком может существенно изменить картину обтекания и повлиять на волновое сопротивление летательного аппарата, моментные характеристики и устойчивость полета. Наиболее сильно это должно проявляться при обтекании затупленных тел, данный эффект может быть использован для управления сопротивлением затупленных

тел с целью их курсового маневрирования. Одной из задач, которая представляет практический интерес, является определение влияние сетчатого экрана на волновое сопротивление.

В настоящее время известен ряд методов управления волновым сопротивлением затупленных тел в сверхзвуковом потоке. К ним относятся: использование аэродинамической иглы [2]; подвод энергии в поток перед телом [3]; выдув вперед струи газа, жидкости или твердых частиц (например, [4]). Эти методы основаны на формировании перед головной частью поля течения, соответствующего обтеканию заостренного тела. При этом изменяется структура скачков уплотнения, снижается давление на корпус и, соответственно, величина аэродинамического сопротивления. К недостаткам данных методов можно отнести: возникновение пульсаций давления в передней отрывной зоне, высокое энергопотребление, необходимость в расходных материалах. В рамках этой общей идеи возможно использование расположенных перед телом высокопроницаемых для воздуха перфорированных экранов с целью перераспределения набегающего потока и формирования течения, соответствующего заостренному телу. Для одиночных перфорированных экранов в сверхзвуковом потоке и перфорированных экранов, расположенных перед тупым телом, был проведен цикл расчетных исследований [5–8], который показал принципиальную возможность снижения аэродинамического сопротивления в системе “перфорированный экран — затупленное тело”. Расчеты были дополнены картинками визуализации течения и единичными измерениями давления в лобовой точке затупленного тела.

Первые результаты прямых весовых измерений сопротивления модели “сетчатый экран — цилиндр” в сверхзвуковом потоке представлены в работе [9]. Было обнаружено значительное, до 45 %, снижение волнового сопротивления модели при увеличении расстояния между плоским сетчатым экраном и торцом цилиндра. В работе [9] было показано увеличение эффекта снижения сопротивления при одновременном росте давления на оси торца цилиндра с ростом прозрачности сетчатых экранов. В настоящее время отсутствует физическая интерпретация результатов исследований [5–9]. В настоящей работе с целью выявления физических механизмов снижения сопротивления в таких системах были выполнены параметрические исследования обтекания цилиндра, параллельного сверхзвуковому потоку, с плоскими сетчатыми экранами на его переднем торце.

Экспериментальная установка, модель и методы измерений

Эксперименты выполнены в сверхзвуковой аэродинамической трубе Т-327Б Института теоретической и прикладной механики СО РАН при числе Маха потока $M_\infty = 4,85$ и единичном числе Рейнольдса $Re_{1\infty} = 2,7 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$. С целью выявления влияния числа Рейнольдса в ряде экспериментов были выполнены измерения в диапазоне $Re_{1\infty} = (1,4 \div 14) \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$.

Основные эксперименты были проведены на модели, схема которой показана на рис. 1. Модель включала цилиндр диаметром $D = 14,5$ мм и длиной 50 мм, державку сетчатых экранов, которая могла двигаться по цилиндру, изменяя расстояние

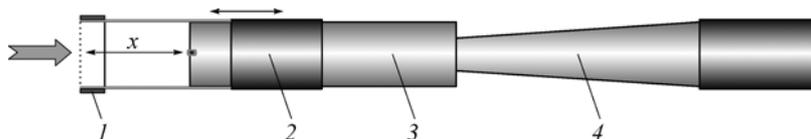


Рис. 1. Схема модели.

1 — сменный сетчатый экран, 2 — подвижная державка экранов, 3 — цилиндр, 4 — тензосесы.

Таблица

№	Размер ячейки, мм × мм	Диаметр проволоки, мм	Оптическая прозрачность
1	0,34 × 0,34	0,11	0,44
2	0,7 × 0,7	0,19	0,53
3	1,15 × 1,15	0,3	0,55
4	1,2 × 1,2	0,24	0,63
5	0,125 × 0,125	0,025	0,64
6	2,2 × 2,2	0,4	0,67
7	0,63 × 0,63	0,13	0,68
8	2,4 × 2,4	0,4	0,69
9	1,74 × 1,74	0,25	0,74
10	2 × 2	0,2	0,81
11	2,5 × 2,5	0,2	0,85
12	4 × 4	0,2	0,9

между торцом цилиндра и сеткой. Сетчатые экраны (рис. 2, *a*) представляли собой тонкостенные кольцевые обечайки диаметром 15 мм с наваренными на них металлическими сетками, которые жестко крепились на державке. В экспериментах использованы 12 сеток различной структуры и прозрачности (см. табл.). Для измерений поля течения за сетчатым экраном в ряде экспериментов использовались сетчатые экраны диаметром 27 мм.

Державки сетчатых экранов представляли собой тонкостенные цилиндрические конструкции различных типов (рис. 2, *b*). Использовались державки с двумя (I) и тремя (II) стойками. Относительная доля площади между стойками державок составляла от 30 % до 87 % общей боковой площади поверхности трубки (прозрачность державки). Державка (III) имела множество круглых отверстий диаметром 4 мм с относительной площадью 40 %. Державка (IV) имела прямоугольные отверстия размером 0,1×0,2 мм с относительной площадью 45 %.

В работе были применены четыре метода измерений: весовые измерения сопротивления, шлирен-визуализация обтекания, измерение давления за прямым скачком уплотнения p'_0 и статического давления $p_{ст}$ в потоке, а также измерение векторного поля скорости PIV–методом с помощью лазерной диагностической системы «Полис» [10]. Для измерения силы сопротивления модель устанавливалась на тензовесы. Точность весовых измерений составляла 3 %. Весовые измерения производились при пошаговом увеличении расстояния сетка–торец цилиндра x (см. рис. 1). Результаты весовых измерений нормировались на величину сопротивления модели при $x = 0$.

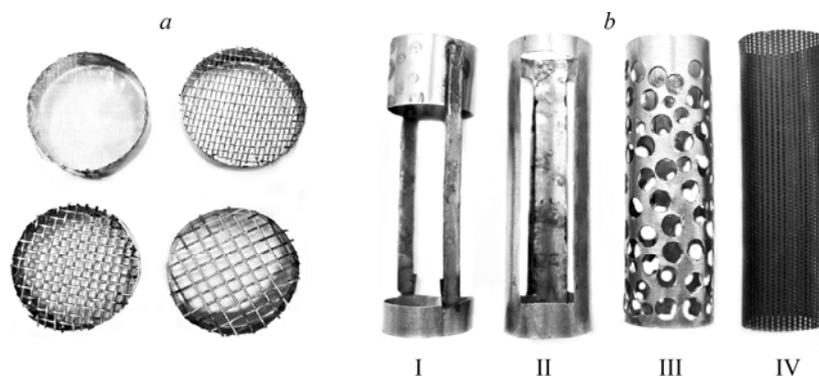


Рис. 2. Типы державок сетчатых экранов.

Оптическая визуализация обтекания модели осуществлялась шлирен-методом. Обработка изображений производилась при помощи программы «Actual Flow», которая позволяла повысить чувствительность системы визуализации путем вычитания друг из друга двух изображений: с потоком и без потока. Измерения давления за прямым скачком p'_0 и статического давления $p_{ст}$ в потоке осуществлялись подвижными трубчатыми пневмозондами. Давление измерялось мембранным дифференциальным тензодатчиком ТМД4-1ИВ с максимальной величиной давления 0,1 атм. и точностью 1 % от максимальной величины. По результатам измерения распределения давлений p'_0 и $p_{ст}$ вычислялось число Маха.

Ниже представлены результаты измерений, выполненных при нулевом угле атаки, т. е. при совпадении продольной оси модели и направления потока.

Результаты измерений

Весовые измерения выявили комплексное влияние оптической прозрачности сеток и газопропускания (прозрачности) державки на величину снижения сопротивления модели. На рис. 3 приведены зависимости величины минимальной относительной силы сопротивления модели при выдвигении вперед сетчатого экрана от оптической прозрачности сеток K . Максимальная относительная величина выдвигения вперед сетчатого экрана составляла $x/D = 3$. Сила сопротивления модели нормирована на ее величину при $x/D = 0$. Кривые на рис. 3 получены для державок (I) и (II) (см. рис. 2, б) с несколькими значениями величины прозрачности: 0,4; 0,53; 0,7 и 0,87. На рисунке приведены 63 %-ые доверительные интервалы, полученные по результатам многократных испытаний. Из графиков видно, что с ростом прозрачности сетки экрана сопротивление модели снижается до некоторой минимальной величины, а затем вновь увеличивается. При этом чем выше прозрачность державки, тем больше эффект снижения сопротивления. Максимальная величина снижения сопротивления модели составила $\approx 45\%$.

Измерение силы сопротивления цилиндра без сетки, но с установленными на него державками и обечайками сеток показало хорошее совпадение по коэффициенту аэродинамического сопротивления, вычисленного по данным [11] ($c_x = 1,28 \pm 0,04$). Однако наличие сетчатого экрана, лежащего на торце цилиндра, заметно повышает силу сопротивления модели. Увеличение сопротивления составляет от 5 % до 10 % в зависимости от размера ячейки и толщины проволок сетки. Скорее всего, это связано с изменением условий течения на торце в присутствии шероховатости, созданной сеткой. Поэтому в настоящей работе и в работе [9] для выявления влияния выдвигения сетчатого экрана и параметров сеток на аэродинамическое сопротивление нормировка производилась на величину сопротивления модели при $x/D = 0$.

Эксперименты с державкой (III) дали минимальный (менее 9 %) эффект снижения относительного сопротивления

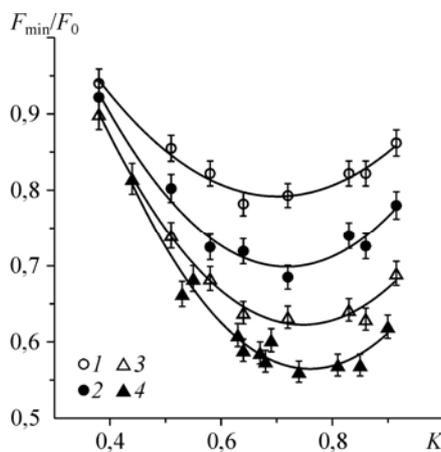


Рис. 3. Зависимости величины минимального относительного сопротивления модели от оптической прозрачности сеток экрана K для державок типа I и II с различной величиной прозрачности:

1 — 0,4, 2 — 0,53, 3 — 0,7, 4 — 0,87.

модели в относительно узких диапазонах значений величины x/D , которые совпадают с прохождением отверстий в державке через плоскость торца цилиндра. Скорее всего, в этот момент обеспечивается наилучший отвод воздуха от торца цилиндра. Эксперименты с державкой (IV) не выявили никакого снижения сопротивления для сеток всех типов, хотя газопропускание державки соответствует кривой I на рис. 3. Это свидетельствует о важной роли хорошей организации отвода воздуха от торца цилиндра для получения максимального эффекта, что обеспечивается конструкцией державок (I) и (II).

Измерения сопротивления модели с сетками № 2, 9 и державкой (I) прозрачностью 87 % выявили очень слабую зависимость величины минимального сопротивления модели от единичного числа Рейнольдса потока. В исследованном диапазоне чисел $Re_{1\infty}$ минимальное нормированное значение сопротивления изменялось в пределах $0,59 \div 0,63$ для сетки № 2 и в пределах $0,47 \div 0,5$ для сетки № 9. При этом абсолютная точность измерений нормированной величины сопротивления моделей составляла $\pm 0,02$. Это свидетельствует о невязком характере явления снижения сопротивления.

При выдвигании вперед сетчатого экрана картина обтекания модели существенно изменяется. На рис. 4 приведены для примера картины шлирен-визуализации обтекания модели с сеткой № 4 и державкой (I) с прозрачностью 87 % при различных расстояниях между экраном и торцом цилиндра. Видно, что с ростом величины x/D головная ударная волна приближается к сетчатому экрану и в дальнейшем “садится” на него. Угол наклона ударной волны к потоку уменьшается, на торце цилиндра образуется заостренная отрывная зона. Следует отметить, что картина обтекания на рис. 4, *e* соответствует минимальной величине относительного сопротивления модели. Измерения поля скорости (рис. 5) показали, что за сетчатым экраном формируется расходящийся под небольшим углом поток, который натекает на торец цилиндра, и перед торцом цилиндра действительно образуется циркуляционная отрывная зона.

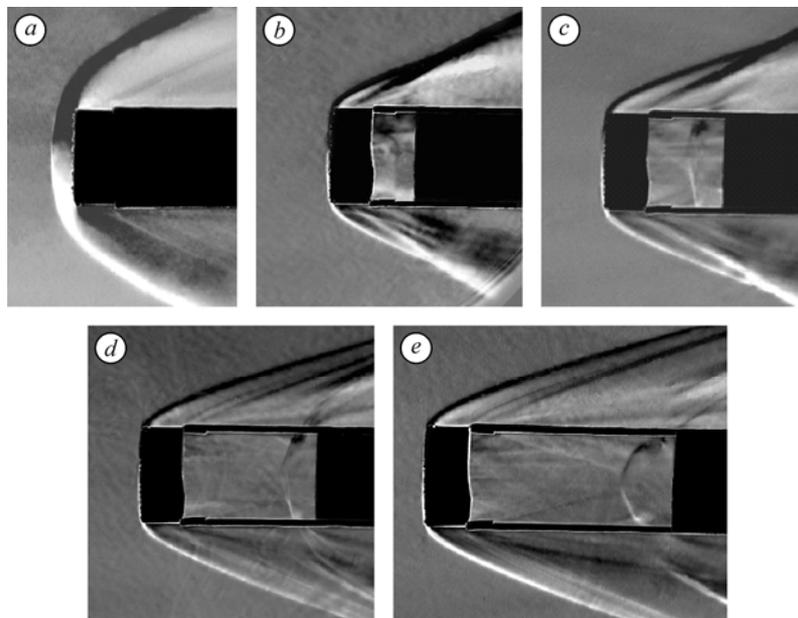


Рис. 4. Шлирен-визуализация обтекания модели с державкой I при различной величине выдвигания вперед сетчатого экрана x/D для сетки № 4.

$x/D = 0$ (a), 1,0 (b), 1,4 (c), 2,0 (d), 2,66 (e).

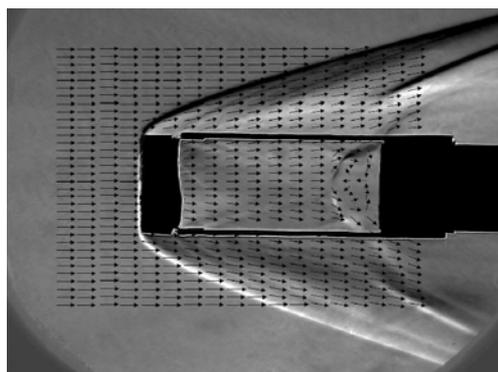


Рис. 5. Поле векторов скорости потока, совмещенное с теневой картиной обтекания модели с державкой I и сеткой № 4 при $x/D = 2,66$.

Вышеупомянутые моменты эволюции обтекания модели имеют место для всех сеток и державок, когда наблюдается снижение сопротивления. Для сеток с малой величиной прозрачности головная ударная волна приближается к экрану, но останавливается на некотором от него расстоянии, что объясняется невозможностью пропустить весь набегающий поток через сетку. Это приводит к дополнительному аэродинамическому сопротивлению сетки экрана и общему увеличению сопротивления модели. Прямые измерения аэродинамического сопротивления сетчатых экранов показали линейную связь между сопротивлением сеток и загромождением потока проволочками сетки экрана, что соответствует экспериментальным данным [12].

На сетчатых экранах диаметром 27 мм были исследованы поля динамического и статического давления в потоке за сетками. На рис. 6, для примера, приведена шлирен-визуализация течения за сеткой № 2, совмещенная с полем изолиний давления p'_0 в плоскости (r, x) . На рис. 6, *a* видно, что за сетчатым экраном формируется течение типа недорасширенной струи в сверхзвуковом потоке с двумя системами скачков уплотнения. На рисунке также видны струйки, выходящие из ячеек сетки. Впервые формирование недорасширенной струи за плоским перфорированным экраном в сверхзвуковом потоке было показано в работе [5]. На рис. 6, *b* показаны скачки уплотнения, соответствующие картине шлирен-визуализации течения

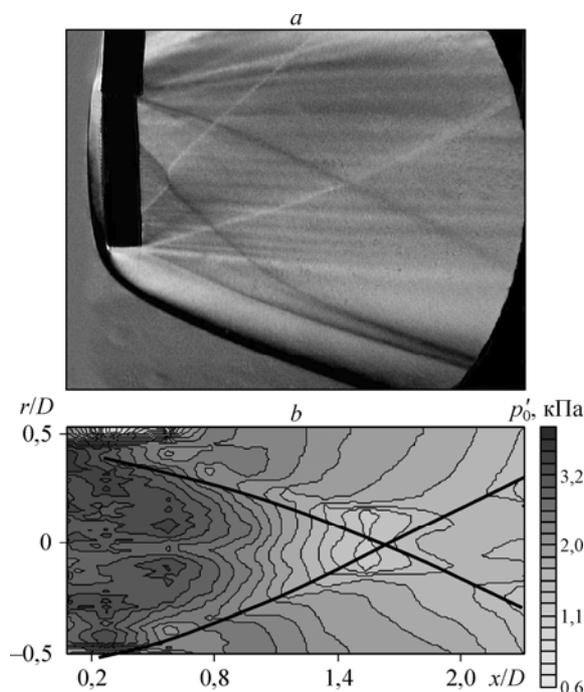


Рис. 6. Шлирен-визуализация течения (*a*) и распределение давления p'_0 в потоке (*b*) за сетчатым экраном с сеткой № 2.

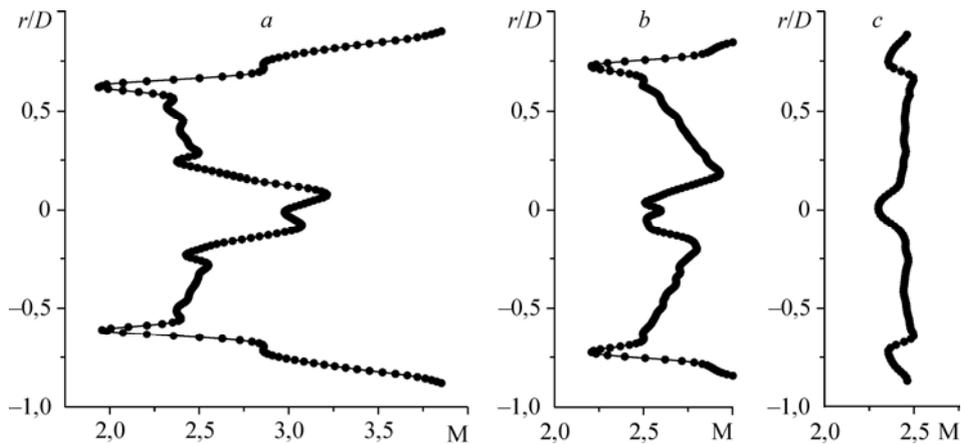


Рис. 7. Профили числа Маха в потоке за экраном с сеткой № 2.
 $x/D = 1,1$ (a), $1,85$ (b), $2,95$ (c).

за экраном. Длина первой ячейки струй зависит от прозрачности сетки и для более прозрачной сетки она больше. Измерения давления p'_0 и статического давления в потоке за сетчатым экраном показали их падение с увеличением расстояния до сетки, что соответствует полю скоростей на рис. 5.

Наличие скачков уплотнения в сверхзвуковом струйном течении за экраном говорит о существенной неоднородности распределения чисел Маха. На рис. 7 показаны радиальные профили числа Маха для трех сечений в потоке за экраном с сеткой № 2. Видно, что в приосевой области течения наблюдается как повышение числа Маха (рис. 7, a), так и уменьшение его значения (рис. 7, b, c). Периферийные минимумы на графиках связаны со следом за кольцом сетчатого экрана. В ряде работ (например, [13–15]) было показано, что наличие дефицита числа Маха или скорости в набегающем потоке в узкой области, лежащей на оси симметрии затупленного тела, приводит к формированию заостренной отрывной зоны на его лобовой части. Это объясняет возникновение заостренной отрывной зоны перед торцом цилиндра, наблюдаемой на рис. 4 и 5, что приводит к падению общего аэродинамического сопротивления модели “цилиндр — сетчатый экран”.

Анализ полученных данных позволяет предложить следующее описание механизма снижения сопротивления цилиндра с передним сетчатым экраном в сверхзвуковом потоке. При обтекании сетчатого экрана за ним формируется недорасширенная струя с расширяющимся течением. Струя возникает при объединении струек, истекающих из отдельных ячеек сетки. В этой струе, на некотором расстоянии от сетки, формируется поток с дефицитом числа Маха на оси. При натекании этого потока на торец цилиндра формируется заостренная отрывная зона, и цилиндр начинает обтекаться как заостренное тело. Это, вместе с падением скоростного напора из-за расширения потока, снижает силу сопротивления, действующую на цилиндр и на модель в целом. Эффект снижения сопротивления увеличивается вместе с увеличением прозрачности сетки экрана и уменьшением ее собственного аэродинамического сопротивления в потоке. При очень большой прозрачности сетки экрана приосевой дефицит числа Маха в потоке за экраном не успевает сформироваться перед торцом цилиндра и эффект снижения сопротивления вновь уменьшается.

Заключение

Выполнен цикл измерений обтекания сверхзвуковым потоком цилиндра, продольного потока с расположенным перед его передним торцом подвижного плоского сетчатого экрана. Измерения выполнены для ряда геометрий сеток экрана и конструкций державок.

Получены данные о влиянии газопроницаемости (прозрачности) сеток и державки экрана на максимальную величину снижения сопротивления модели в сверхзвуковом потоке. Показано, что аэродинамическое сопротивление модели падает с увеличением прозрачности сеток и державки экрана. При этом конструкция державки должна обеспечивать наилучшие условия отвода воздуха от торца цилиндра. Достигнуто 45 % уменьшение сопротивления модели при выдвигании вперед сетчатого экрана. Обнаружена слабая зависимость сопротивления модели от единичного числа Рейнольдса.

Показано, что выдвигание вперед сетчатого экрана существенно изменяет картину обтекания модели. В частности, головная ударная волна приближается к сетчатому экрану и для достаточно прозрачных сеток “садится” на ее проволоочки. За сетчатым экраном имеет место течение типа недорасширенной струи, плотность потока в которой падает с расстоянием, а перед торцом цилиндра возникает заостренная циркуляционная отрывная зона. Возникновение отрывной зоны соответствует достижению минимального значения сопротивления модели для каждой комбинации сетки экрана и державки.

Показано наличие дефицита в величине числа Маха на оси струйного течения за сетчатым экраном, который приводит к возникновению заостренной отрывной области перед торцом цилиндра. На этой основе дано объяснение эффекту снижения сопротивления модели цилиндра с расположенным перед его торцом плоским сетчатым экраном.

Список литературы

1. Турчак А.А., Кочешков Н.А., Куранов А.Л. Новые гиперзвуковые технологии в освоении космического пространства // Мат. науч.-пр. конф., посвященной 40-летию первого полета человека в космос, 11 апреля 2001, С.-Пб. С. 43–44.
2. Запрягаев В.И., Миронов С.Г. Особенности механизма пульсаций в отрывном течении перед цилиндром с острой иглой при сверхзвуковом обтекании // ПМТФ. 1991. Т. 32, № 6. С. 34–39.
3. Коротаева Т.А., Фомин В.М., Шашкин А.П. Анализ воздействия локального энергоисточника на сверхзвуковое обтекание эллиптического конуса // ПМТФ. 1999. Т. 40, № 6. С. 26–30.
4. Коротаева Т.А., Малмус Н.Д., Маслов А.А., Фомин В.М., Шашкин А.П. Режимы обтекания, формируемые противоточной струей в сверхзвуковом потоке // ПМТФ. 2001. Т. 42, № 5. С. 27–36.
5. Гувернюк С.В., Савинов К.Г., Ульянов Г.С. Сверхзвуковое обтекание затупленных перфорированных экранов // Изв. АН СССР. МЖГ. 1985. № 1. С. 143–149.
6. Гувернюк С.В., Савинов К.Г. О сверхзвуковом обтекании затупленных тел, экранированных проницаемой поверхностью // Изв. АН СССР. МЖГ. 1986. № 2. С. 139–144.
7. Гувернюк С.В., Савинов К.Г., Ульянов Г.С. Сверхзвуковое обтекание торца, экранированного проницаемым диском // Волновые задачи механики деформируемых сред. Ч. 2. М.: Из-во МГУ. 1990. С. 101–108.
8. Гувернюк С.В. О гиперзвуковом обтекании тел с сетчатыми экранами // Сб.: Газовая и волновая динамика. М.: Айрис-Пресс, 2005. С. 236–242.
9. 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.
10. Ахметбеков Е.К., Бильский А.В., Маркович Д.М., Маслов А.А., Поливанов П.А., Цырюльников И.С., Ярославцев М.И. Применение лазерного измерительного комплекса “ПОЛИС” для измерений полей скоростей в сверхзвуковом потоке в аэродинамических трубах // Теплофизика и аэромеханика. 2009. Т. 14, № 3. С. 342–352.
11. Краснов Н.Ф., Кошевой В.Н., Данилов А.Н., Захарченко В.Ф. Аэродинамика ракет. М.: Высшая школа, 1968.
12. Benton E.R., Knaption D.A. Supersonic drag of porous wire screens // ARS J. 1962. Vol. 32, No. 10. P. 1608–1610.
13. Lin T.C., Reeves B.L., Siegelman D. Blunt-body problem in nonuniform flowfields // AIAA J. 1977. Vol. 15, No. 8. P. 1130–1137.
14. Гувернюк С.В., Савинов К.Г. Некоторые обобщения задачи о взаимодействии затупленных тел с неоднородными сверхзвуковыми потоками // Известия РАН. МЖГ. 1996. № 2. С. 164–170.
15. Гувернюк С.В., Савинов К.Г. Отрывные изобарические структуры в сверхзвуковых потоках с локализованной неоднородностью // Доклады РАН. 2007. Т. 403, № 2. С. 188–192.

Статья поступила в редакцию 24 января 2011 г.