

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕРХЗВУКОВОГО ОБТЕКАНИЯ ЦИЛИНДРА С ГАЗОПРОНИЦАЕМЫМИ ЭКРАНАМИ

С.Г.Миронов, К.М.Сердюк

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

Новосибирский государственный университет, Новосибирск

EXPERIMENTAL STUDY OF SUPERSONIC FLOW PAST CYLINDER WITH WIRE SCREENS

S.G.Mironov, K.M.Serdyuk

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, Novosibirsk

Novosibirsk State University, Novosibirsk

The results of experimental study of the action of flat wire screens on wave drag of cylinder with flat end longitudinally streamlined supersonic airflow at Mach number $M = 4,85$ are presented. The data about reduction of aerodynamic drag with the use of grids of different geometry and transparency located before the face of cylinder are acquired. Balance, pneurometric, thermograph measurements, measurements of vectorial velocity field by PIV- method and flow-field shlieren-visualization around the system of cylinder – wire screen are carried out. The possibility of considerable (up to 55%) reduction of heat flux and wave drag of cylinder with wire screens is shown, the physical interpretation of the effect of reduction is given.

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]. 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 выдвинутый вперед плоский трубчатый экран типа сетки. 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 и может быть использовано для управления их движением. Одной из задач, которая представляет практический интерес, является определение влияния сетчатого экрана на волновое сопротивление.

Для одиночных перфорированных экранов в сверхзвуковом потоке и перфорированных экранов, расположенных перед тупым телом, был проведен цикл расчетных исследований [2-5], 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 были получены в работе [6]. Было обнаружено значительное, до 45%, снижение волнового сопротивления модели при увеличении расстояния между плоским сетчатым экраном и торцом цилиндра. В [6] 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 [2-6]. В данной 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.

Экспериментальное оборудование и методики 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 $Re_{1\infty} = (1,4 \div 14) \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$. Эксперименты проводились на двух моделях: для весовых и тепловых измерений. Весовая модель включала цилиндр диаметром $D = 14,5 \text{ мм}$ и длиной 50 мм , державку сетчатых экранов, которая могла двигаться по цилиндру, изменяя расстояние x между торцом цилиндра и сеткой (рис. 1а). Тепловая модель имела цилиндр диаметром $D = 34 \text{ мм}$ и длиной 80 мм , торец которого был покрыт теплоизоляционным материалом толщиной 3 мм (рис. 1б).

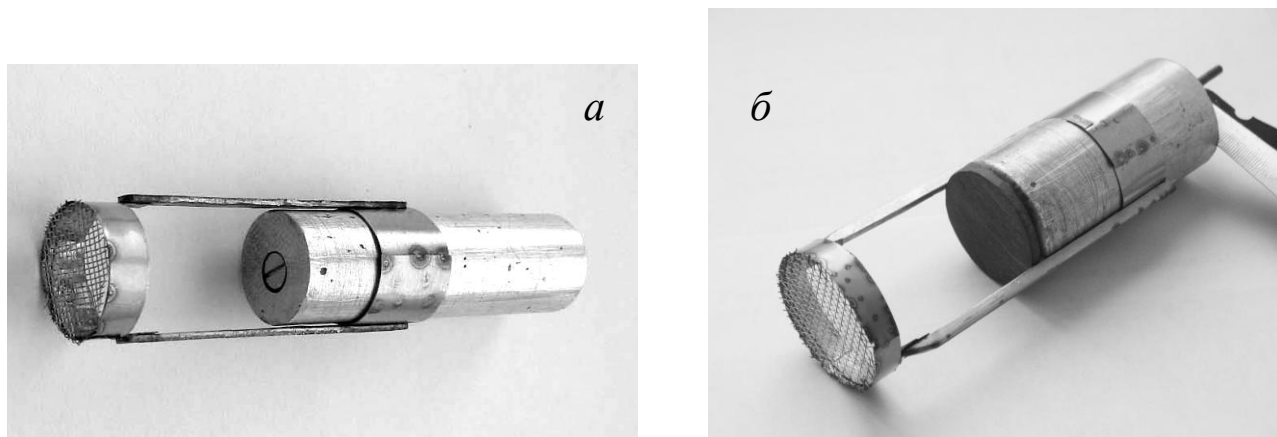


Рис. 1. Весовая (а) и тепловая (б) модели.

Сетчатые экраны представляли собой тонкостенные кольцевые обечайки диаметром с наваренными на них металлическими сетками, которые жестко крепились на державке. Сетчатые экраны удерживались державками с двумя или тремя стойками. Относительная доля площади между стойками державок могла изменяться и составляла от 30% до 96% общей боковой площади поверхности трубки (прозрачность державки). В экспериментах использованы 12 сеток различной структуры и прозрачности. Для измерений поля течения за сетчатым экраном в ряде экспериментов использовались сетчатые экраны диаметром 27 мм .

В работе были применены пять методов измерений: весовые измерения сопротивления, шпирен-визуализация обтекания, измерение давления за прямым скачком уплотнения p_0' и статического давления $p_{ст}$ в потоке, измерение векторного поля скорости PIV-методом (Particle Image Velocimetry) с помощью лазерной диагностической системы «Полис» [7], а также измерения тепловых потоков с помощью тепловизора «СВИТ-ИФП» [8].

Для измерения силы сопротивления модель устанавливалась на тензочасы. Результаты весовых и тепловых измерений нормировались на величины при $x/D = 0$. 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. По результатам измерения распределения давлений p_0' и $p_{ст}$ вычислялось число Маха.

Результаты измерений

Весовые измерения выявили комплексное влияние оптической прозрачности сеток и газопропускания (прозрачности) державки на величину снижения сопротивления модели. На рис. 2а приведены зависимости величины минимальной относительной силы сопротивления модели при выдвигании вперед сетчатого экрана от оптической прозрачности сеток K . Максимальная относительная величина выдвигания вперед сетчатого экрана составляла $x/D = 3$. Кривые на рис. 2а получены для нескольких значений величины прозрачности державки. 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 $\approx 55\%$.

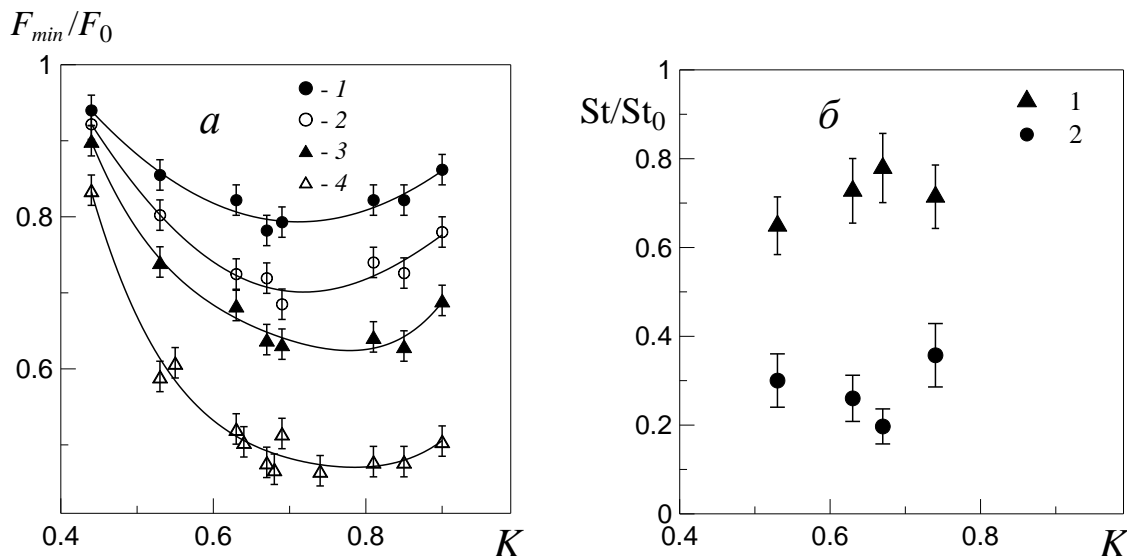


Рис. 2. (а) – зависимости минимального нормированного сопротивления модели от прозрачности сеток экрана для нескольких величин прозрачности державки: 1 – 0,4; 2 – 0,53; 3 – 0,7; 4 – 0,87. (б) – зависимости числа Стантона на оси торца цилиндра от прозрачности сеток для двух величин выдвижения экрана: 1 – $x/D = 0,88$; 2 – $x/D = 2,35$.

Измерения сопротивления модели выявили очень слабую зависимость величины минимального сопротивления модели от единичного числа Рейнольдса потока, что свидетельствует о невязком характере явления снижения сопротивления.

На рис. 2б приведены данные измерений теплоотдачи в центре торца цилиндра от прозрачности сеток экрана, полученные для двух величин выдвижения сетчатого экрана вперед. Видно, что величина безразмерного теплового потока (число Стантона) на торец цилиндра падает при увеличении расстояния между торцом цилиндра и сеткой экрана.

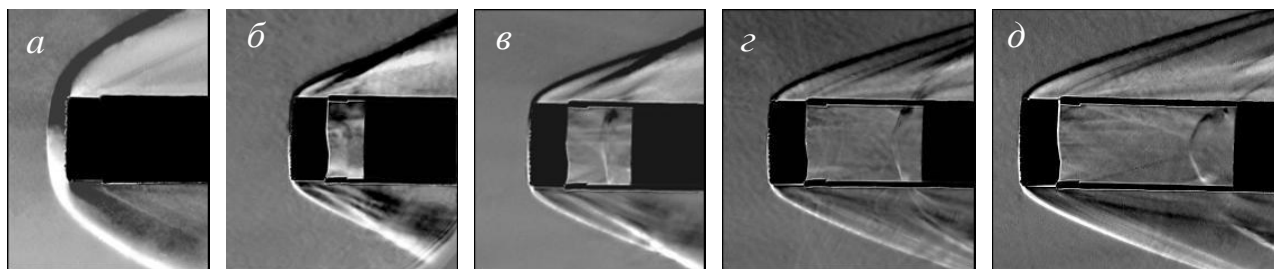


Рис. 3. Шлирен – визуализация обтекания модели при различной величине выдвижения вперед сетчатого экрана x/D : а – $x/D = 0$; б – 1,0; в – 1,4; г – 2,0; д – 2,66.

При выдвижении вперед сетчатого экрана картина обтекания модели существенно изменяется. На рис. 3, для примера, приведены картины шлирен–визуализации обтекания модели 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. 4д соответствует минимальной величине относительного сопротивления модели. Измерения поля скорости методом PIV 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. Возникновение расходящегося

течения и отрывной зоны снижает тепловые потоки на торец цилиндра, что коррелирует с данными по сопротивлению модели.

Приведенные на рис. 3 фазы 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 [9].

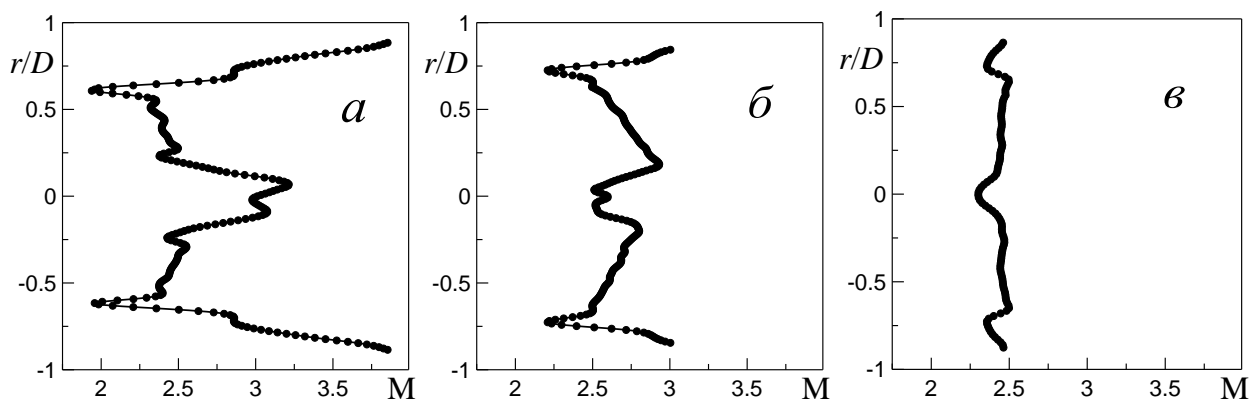


Рис. 4. Профили числа Маха в потоке за экраном с сеткой: $a - x/D = 1,1$; $б - 1,85$; $в - 2,95$.

На сетчатых экранах диаметром 27 мм были исследованы поля динамического и статического давления в потоке за сетками. Было показано, что за сетчатым экраном формируется течение типа недорасширенной струи в сверхзвуковом потоке с двумя системами скачков уплотнения. Наличие скачков уплотнения в сверхзвуковом струйном течении за экраном говорит о существенной неоднородности распределения чисел Маха. На рис. 4 показаны радиальные профили числа Маха для трех сечений в потоке за сетчатым экраном. Видно, что в приосевой области течения наблюдается как повышение числа Маха (рис. 4а), так и уменьшение его значения (рис. 4б, в). Периферийные минимумы на графиках связаны со следом за кольцом сетчатого экрана. В ряде работ (например, [10–12]) 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. 3, что приводит к падению общего аэродинамического сопротивления модели «цилиндр – сетчатый экран».

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 экрана и газопроницаемости (прозрачности) 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 55% уменьшение сопротивления модели при выдвигании вперед сетчатого экрана. Обнаружена слабая зависимость сопротивления модели от единичного числа Рейнольдса. Получены данные о влиянии сетчатого экрана на тепловые

потоки к торцу цилиндра. В частности, показано значительное снижение (до $\approx 70\%$) теплового потока при увеличении расстояния между сеткой и торцом цилиндра.

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 проволочки сетки. 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.

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 снижением 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.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта АВЦП «РНПВШ» 2.1.1/3963.

Список литературы

1. Турчак А.А., Кочешков Н.А., Куранов А.Л. Новые гиперзвуковые технологии в освоении космического пространства. Материалы научно-практической конференции посвященной 40-летию первого полета человека в космос, 11 апреля 2001, Санкт-Петербург. С. 43-44.
2. Гувернюк С.В., Савинов К.Г., Ульянов Г.С. Сверхзвуковое обтекание затупленных перфорированных экранов. Изв. АН СССР. МЖГ. №1. 1985. С.143–149.
3. Гувернюк С.В., Савинов К.Г. О сверхзвуковом обтекании затупленных тел, экранированных проницаемой поверхностью. Изв. АН СССР. МЖГ. №2. 1986. С. 139-144.
4. Гувернюк С.В., Савинов К.Г., Ульянов Г.С. Сверхзвуковое обтекание торца, экранированного проницаемым диском. Волновые задачи механики деформируемых сред. Часть 2. М.: Из-во МГУ. 1990. С. 101-108.
5. Гувернюк С.В. О гиперзвуковом обтекании тел с сетчатыми экранами. Газовая и волновая динамика. М.: Айрис-Пресс. 2005. С. 236–242.
6. Фомин В.М., Миронов С.Г., Сердюк К.М. Снижение волнового сопротивления тел в сверхзвуковом потоке пористыми материалами. Письма в ЖТФ. Т. 35, вып. 3. 2009. С. 39-45.
7. 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 Теплофиз. аэромех. Т. 14, № 3. 2009. С. 342-352.
8. Базовкин В.М., Ковчавцев А.П., Курышев Г.Л., Маслов А.А., Миронов С.Г., Хотяновский Д.В., Царенко А.В., Цырюльников И.С. Численное и экспериментальное

исследование обтекания двумерного угла сжатия гиперзвуковым потоком. Вестник Новосиб. универ. Сер. физика. Новосибирск: Т. 2, вып. 1. 2007. С. 3-9.

9. Benton E. R., Knapton D.A. Supersonic drag of porous wire screens. ARS J. Vol. 32, No.10. 1962. P. 1608-1610.

10. T.C. Lin, B.L. Reeves, D. Siegelman. Blunt-body problem in nonuniform flowfields. AIAA J. Vol.15. No.8. 1977. P.1130–1137.

11. Гувернюк С.В., Савинов К.Г. Некоторые обобщения задачи о взаимодействии затупленных тел с неоднородными сверхзвуковыми потоками. Изв. РАН, МЖГ. № 2. 1996. С. 164-170.

12. Гувернюк С.В., Савинов К.Г. Отрывные изобарические структуры в сверхзвуковых потоках с локализованной неоднородностью. Докл. РАН. Т.403. №2. 2007. С. 188–192.