

УДК 533.601.155+532.546

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕРХЗВУКОВОГО ОБТЕКАНИЯ ЦИЛИНДРА С ПОРИСТОЙ ВСТАВКОЙ

© 2011 г.

И.А. Бедарев

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

bedarev@itam.nsc.ru

Поступила в редакцию 16.05.2011

Представлены результаты численного исследования обтекания сверхзвуковым потоком ($M_\infty = 4.85$) модели продольного цилиндра с установленными на его переднем торце газопроницаемыми пористо-ячеистыми материалами. Моделирование проводилось на основе осредненных по Фавру уравнений Навье – Стокса, описывающих движение вязкого сжимаемого теплопроводного газа. Система была дополнена источником членом, учитывающим сопротивление пористого тела в рамках континуальной модели фильтрации. Рассчитаны поля давления и скорости внутри пористого тела и во внешнем потоке, определена форма эффективного заостренного тела, соответствующего обтеканию модели. Получены данные о влиянии структуры пор и длины цилиндрической пористой вставки на аэродинамическое сопротивление модели, давление на переднем торце цилиндра и картину обтекания. Результаты расчета сопоставлены с данными измерений и теневой визуализации поля течения.

Ключевые слова: сверхзвуковые течения, обтекание газопроницаемых пористых тел, численное моделирование, эксперимент.

Снижение сопротивления тел, движущихся с высокой сверхзвуковой скоростью, позволяет повысить аэродинамическое качество летательного аппарата. Наиболее продуктивной идеей управления сопротивлением может проявить себя в отношении летательных аппаратов с притупленной головной частью, основная доля аэродинамического сопротивления которых приходится на волновое сопротивление, поэтому тема исследований представляется, безусловно, актуальной. Представлены результаты численного исследования обтекания сверхзвуковым потоком модели продольного цилиндра с установленными на его переднем торце газопроницаемыми пористо-ячеистыми материалами. Схема модели представлена на рис. 1. Цель исследований – моделирование возможности снижения волнового сопротивления системы пористое тело–сплошной цилиндр.

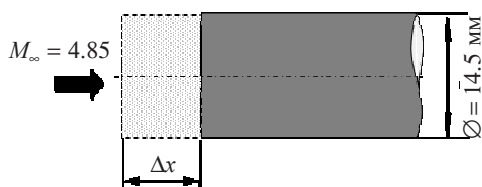


Рис. 1

Расчеты проведены в условиях эксперимен-

тов [1], выполненных в сверхзвуковой аэродинамической трубе Т-327Б ИТПМ СО РАН при числе Маха потока $M_\infty = 4.85$. Температура торможения потока составляла 290 К. Основные измерения были выполнены при единичном числе Рейнольдса $Re_{1,\infty} = 2.7 \cdot 10^6 \text{ м}^{-1}$.

Для численного моделирования использовались осредненные по Фавру уравнения Навье – Стокса, описывающие движение вязкого сжимаемого теплопроводного газа. Система была дополнена источником членом, учитывающим сопротивление пористого тела в рамках континуальной модели фильтрации. Численное решение уравнений Навье – Стокса определялось на основе неявной четырехшаговой конечно-разностной схемы с использованием расщепления по физическим процессам и пространственным переменным. Для аппроксимации невязких потоков использовался TVD подход.

В численном расчете получены данные о поле давлений и скоростей внутри пористого тела и во внешнем потоке. Результаты расчета сопоставлены с данными измерений и теневой визуализации поля течения. Сопоставление показало адекватность физико-математической модели изучаемому явлению. На рис. 2а показано сравнение расчетных (кривые 3 и 4) и экспериментальных данных по значению снижения дав-

ления. На рисунке приведены значения давления в центре торца цилиндра, отнесенные к давлению в центре торца цилиндра без пористого тела, в зависимости от величины выдвижения пористой вставки $\Delta x/D$ вверх по потоку. Эксперименты приводились для двух различных ячеисто-пористых материалов (материал №1 имел меньшую длину непрозрачности, чем материал №2). В расчете варьировались коэффициенты α и β в квадратичном законе сопротивления пористого тела. На рисунке обозначены точки 1 – эксперимент, материал №1; точки 2 – эксперимент, материал №2; кривая 3 – расчет $\beta = 690$, $\alpha = 1 \cdot 10^7$; кривая 4 – расчет $\beta = 200$, $\alpha = 0.2 \cdot 10^7$. Видно, что расчет в целом правильно отражает поведение данного параметра. Исследования влияния характеристик ячеисто-пористых материалов на сопротивление показали условия существенного (до 35%) снижения волнового сопротивления системы пористый цилиндр – сплошной цилиндр.

На рис. 2б приведено сравнение расчетной и экспериментальной зависимости относительной силы сопротивления модели (сопротивление отнесено к сопротивлению цилиндра без пористого тела) от величины выдвижения пористого материала. Обнаружено, что структура пористости разнонаправленно влияет на сопротивление системы и давление на торце цилиндра. Так, уменьшение сопротивления сопровождается увеличением давления на торце цилиндра, что свидетельствует об определяющей роли течения газа в пористом теле на процесс сверхзвукового обтекания модели в целом. Это показывает, что газопроницаемые материалы перераспределяют воздушные потоки таким образом, что их воздействие на цилиндр

сильно уменьшается и основную роль играет аэродинамическое сопротивление собственно газопроницаемого материала. Вычислена форма «эффективного тела» эквивалентного системе пористый материал–цилиндр. Сравнение с шлирен-визуализацией поля течения вокруг моделей показало, что по мере выдвижения пористой вставки вперед происходит уменьшение угла наклона головной ударной к направлению потока. В расчете показано, что увеличение длины выдвижения пористого материала перед цилиндром формирует «эффективное» тело оживальной формы, обладающее меньшим аэродинамическим сопротивлением, чем продольный цилиндр без пористого материала на переднем торце.

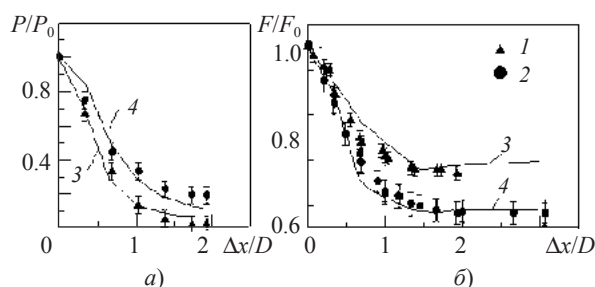


Рис. 2

Работа выполнена при поддержке АВЦП РНП ВШ (проект 2.1.1/11316) и Программ специализированных отделений РАН.

Список литературы

1. Фомин В.М., Миронов С.Г., Сердюк К.М. Снижение волнового сопротивления тел в сверхзвуковом потоке с помощью пористых материалов // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35, №3. С. 39–45.

NUMERICAL MODELING OF A SUPERSONIC FLOW AROUND A CYLINDER WITH A POROUS INSERT

I.A. Bedarev

Results of the numerical and experimental modeling of a supersonic flow ($M_\infty = 4.85$) around a model of a stream-wise-aligned cylinder with a cellular-porous insert permeable for the gas on the frontal face of the cylinder are described. Experimental data on the influence of the pore structure and the length of the porous cylindrical insert on the model drag, pressure on the frontal face of the cylinder, and flow pattern are obtained. Numerical modeling includes solving Favre-averaged Navier–Stokes equations, which describe the motion of a viscous compressible heat-conducting gas. The system is supplemented with a source term taking into account the drag of the porous body within the framework of the continuum model of filtration. Data on pressure and velocity fields inside the porous body are calculated, and the shape of an effective pointed body whose drag is equal to the drag of the model considered is determined. The calculated results are compared with the measured data and schlieren visualization of the flow field.

Keywords: supersonic flow, flow around porous bodies permeable for the gas, numerical modeling, experiment.