

УДК 532.542

© 2001 г. Б.Я. БЕНДЕРСКИЙ, В.А. ТЕНЕНЕВ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ В ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ КАНАЛАХ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ С ВДУВОМ

Представлены результаты экспериментального и численного исследования течения в осесимметричных каналах с радиальными выемками. Эксперименты проведены на газодинамической установке, продуваемой воздухом. Теоретические результаты, полученные из численного решения задачи о вязком осесимметричном движении газа, согласуются с экспериментальными данными по профилям продольной скорости в канале с радиальной выемкой.

Геометрия каналов ряда энергетических установок, как правило, является достаточно сложной даже при наличии осевой симметрии. Выбор проектных параметров установок базируется на совместном использовании экспериментальных и численных методов исследования. Примером энергетической установки, для которой очень важными являются значения газодинамических параметров, служит твердотопливный ракетный двигатель. Для зарядов с осесимметричными каналами характерно наличие радиальных выемок, обеспечивающих более развитую поверхность вдува [1]. Расчет течений в таких областях сопряжен с вычислительными трудностями, обусловленными сложной формой границ.

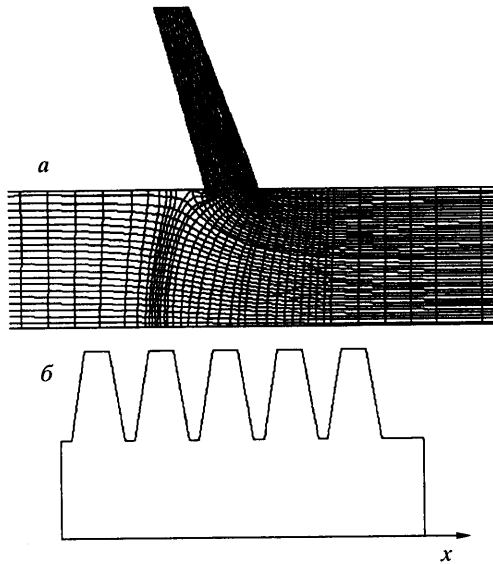
Из работ, посвященных теоретическим исследованиям течений в цилиндрических каналах с вдувом можно выделить [1–4], различающиеся постановкой задачи. В [2] получено аналитическое решение уравнений гидродинамики с исчезающей вязкостью. В [3] проведено численное моделирование газодинамических процессов в каналах для идеального газа. Результаты расчета параметров вязкого течения с постоянной вязкостью содержатся в [4]. Исследование структуры установившихся турбулентных и ламинарных течений в каналах зарядов проведено в [1]. Экспериментальных же данных о структуре потока в каналах с вдувом, имеющих сложную геометрию, недостаточно.

Так, в [5] исследовано турбулентное течение в пористой трубе, в [6] представлены профили скоростей для модели ракетного двигателя, а в [7] приведено распределение давления в канале двигателя Titan-IV SRMU.

В настоящей статье в осесимметричных каналах двух типов экспериментально и численно исследуются течения со вдувом через радиальные выемки. Первый представляет собой цилиндрический канал с радиальной выемкой, имеющей угол наклона к оси канала 70° (фиг. 1,а). В канале второго типа радиальных выемок несколько и они расположены перпендикулярно оси (фиг. 1,б).

1. Численный метод исследования. Система уравнений, описывающая стационарное течение вязкого теплопроводного газа, имеет вид

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) &= 0 \\ \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \mathbf{V}) + \nabla \cdot \mathbf{P} &= 0 \\ \rho \nabla \cdot (e \mathbf{V}) + \mathbf{P} \cdot (\nabla \mathbf{V}) + \nabla \cdot \mathbf{q} &= 0 \end{aligned} \quad (1.1)$$



Фиг. 1. Расчетная область: *a* – фрагмент разностной сетки в канале первого типа; *б* – канал второго типа

Здесь ρ – плотность газа; \mathbf{V} – вектор скорости; e – удельная внутренняя энергия; \mathbf{P} – тензор давления, связанный с давлением p и тензором вязких напряжений \mathbf{S} соотношением $\mathbf{P} = p\mathbf{I} + \mathbf{S}$; \mathbf{S} – тензор вязких напряжений; \mathbf{I} – единичный тензор; μ – коэффициент динамической вязкости; тепловой поток \mathbf{q} определяется законом Фурье ($q = -\lambda\nabla T$), λ – коэффициент теплопроводности; T – температура.

Компоненты тензора \mathbf{S} определяются в [8] из соотношения

$$\mathbf{S} = -\mu[\nabla\mathbf{V} + (\nabla\mathbf{V})^T] + \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot \mathbf{V})\mathbf{I}$$

К системе уравнений (1.1) необходимо добавить уравнение состояния газа в виде $p = \rho RT$, где R – газовая постоянная.

При расчете течений с невысокими скоростями (до значений числа Маха $M < 0,3$) целесообразно считать течение несжимаемым. В этом случае в уравнениях (1.1) принимается $\rho = \text{const}$ и предположение изотермичности.

Система уравнений (1.1) при сделанных допущениях дополняется граничными условиями: на поверхности вдува задана величина нормальной скорости; на твердой поверхности – условие прилипания (составляющие вектора скорости равны нулю); на оси канала – условия симметрии; на выходе из канала известно давление.

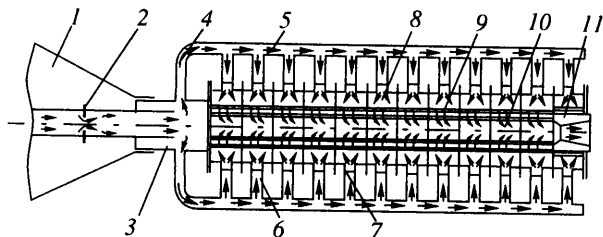
Для замыкания системы уравнений (1.1) добавляется уравнение для турбулентной вязкости [9], имеющее вид

$$\nabla \cdot (v_t \mathbf{V}) = \nabla \cdot (v_m \nabla v_t) + \Gamma_t \quad (1.2)$$

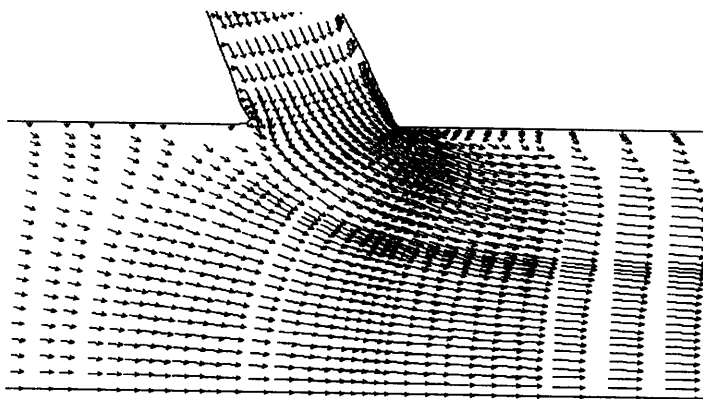
где v_t и v_m – турбулентная и молекулярная вязкости; $\mathbf{v} = v_t + v_m$; Γ_t – член, описывающий генерацию и диссипацию турбулентной вязкости [9].

Граничные условия для уравнения (1.2): на верхней границе (фиг. 1) расчетной области с вдувом газа $v_t = 0$; на левой границе $v_t = v_m$; на нижней границе – условия симметрии; на выходной границе – равенство нулю второй производной по продольной координате.

Система уравнений (1.2) записывалась в цилиндрических координатах с осевой симметрией (x, y – осевая и радиальная координаты). В плоскости x, y делалось преобразование координат, переводящее криволинейную границу расчетной области в



Фиг. 2. Схема экспериментальной установки: 1 – ресивер; 2 – расходомерный узел; 3 – распределительный блок; 4 – патрубок; 5 – коллектор; 6 – трубопровод; 7 – расходомерная шайба; 8 – полость наддува; 9 – массоподводящие поверхности; 10 – канал; 11 – сопло



Фиг. 3. Векторное поле скорости течения в окрестности выемки

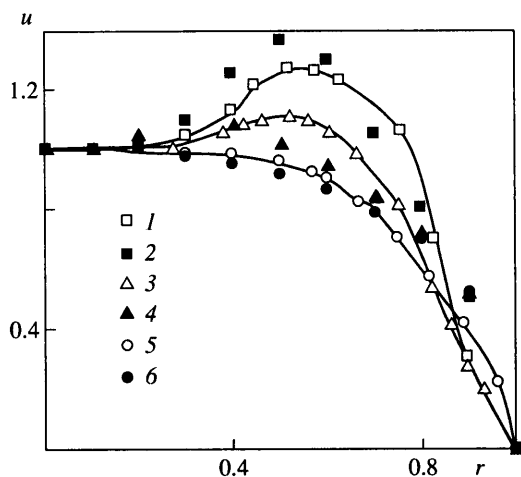
прямоугольник. Разностная сетка строилась комплексным методом граничных элементов [10].

Фрагмент разностной сетки для расчета течения в окрестности радиальной выемки представлен на фиг. 1,а. Для численного решения уравнений движения несжимаемой среды применялся алгоритм SIMPLE [11], реализованный в [10] для областей сложной формы.

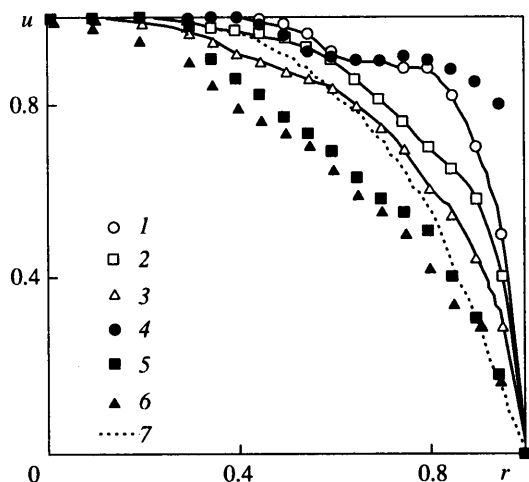
2. Экспериментальная методика. Для исследования течений в проточных каналах с вдвум различной конфигурации спроектирована и изготовлена универсальная газодинамическая установка. Общий вид установки представлен на фиг. 2. Воздух из баллонов высокого давления попадает в ресивер аэродинамической трубы, из которого через расходомерный узел, распределительный блок, патрубки составного коллектора проходит в трубопроводы с расходомерными шайбами и далее в полость секций. Из полости наддува воздух через массоподводящие поверхности, выполненные из пористой бронзы, проникает в проточный тракт канала и вытекает через сопло.

Установка имеет следующие основные характеристики (в м): максимальный диаметр канала – 0,2; максимальный диаметр критического сечения сопла – 0,06; минимальная и максимальная длины канала – 0,33 и 1,7; минимальный диаметр канала – 0,042; минимальный и максимальный расходы воздуха – 1 и 10 кг/с.

Созданная установка отличается от имеющихся аналогов [12] тем, что все ее поверхности, моделирующие распределенный массоподвод, выполнены пористыми. Кроме того, имеется возможность создания определенного закона вдвум по длине канала. Конструктивно это осуществлялось установкой соответствующих расходо-



Фиг. 4. Профили осевой скорости u в канале первого типа: 1, 3, 5 – расчет и 2, 4, 6 – эксперименты при $x = 1,4; 1,7; 4,3$



Фиг 5. Профиль скорости в канале второго типа: 1, 2, 3 – расчет и 4, 5, 6 – эксперименты при $x = 1,5; 2,3; 5,3$

мерных шайб на входе в каждую секцию, что позволяло регулировать соотношение расходов через канал и надсопловый зазор как количеством секций, так и размером расходомерных шайб.

В процессе эксперимента измерялись поля полного и статического давлений в различных сечениях канала с помощью гребенок давления, оформление носиков которых обеспечило слабую чувствительность к скосу потока [13]. Максимальная погрешность измерений полного и статического давлений с доверительной вероятностью 0,95 не превышала 8%, а скорости – 11%. Числа Рейнольдса, рассчитанные по скорости вдува, изменялись в диапазоне $(2-4) \cdot 10^4$, а по скорости на срезе канала – 10^5-10^6 .

3. Результаты. Рассчитанное поле скоростей потока в окрестности выемки канала первого типа показано на фиг. 3. За выходом из выемки имеется небольшая зона возвратного течения. Величина скорости потока существенно возрастает ниже по

потоку из-за интенсивного радиального вдува. Профили осевой скорости на фиг. 4 свидетельствуют о наличии максимума скорости. На графике приведена зависимость продольной составляющей скорости u течения, обезразмеренная на ее осевое значение u_0 от величины радиальной координаты r , деленной на радиус канала r_0 . Расстояние x обезразмерено на диаметр канала и отсчитывается от переднего торца канала. Правая сторона выхода из выемки соответствовала $x = 1$. Положение максимума скорости смещалось к оси канала по мере удаления от выемки. На длине $x > 4$ профиль скорости трансформировался в косинусоидальный. Наличие максимума на профиле скорости получено как экспериментально, так и численно. Согласование расчетных и экспериментальных результатов можно считать удовлетворительным.

В канале с радиальными кольцевыми выемками второго типа (фиг. 5) в начальной его части ($x = 1,5$) профиль скорости имел выраженный перегиб. Положение перегиба примерно одно и то же в эксперименте и в расчете. Из численных результатов следует, что по мере развития течения с увеличением x профиль скорости постепенно выравнивается, являясь более наполненным по сравнению с косинусоидальным. Экспериментальный профиль скорости для развитого течения проходит несколько ниже косинусоидального. Этот факт требует дальнейшего исследования.

Заключение. Согласование экспериментальных и расчетных данных в основных чертах дает подтверждение выбранной математической модели течения и обосновывает применимость численного метода для расчета течений в областях сложной формы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРА

1. Липанов А.М., Бобрышев В.П., Алиев А.В. и др. Численный эксперимент в теории РДТТ. Екатеринбург: УИФ "Наука", 1994. 301 с.
2. Теленин Г.Ф., Шитова Л.Д. Гидродинамика каналов с проницаемыми стенками. Ч. II. Двумерные каналы произвольной формы // Науч. тр. ин-та механики МГУ. 1975. № 41. С. 5–49.
3. Рычков А.Д. Математическое моделирование газодинамических процессов в каналах и соплах. Новосибирск: Наука, 1988. 223 с.
4. Лебедев А.С., Спиридонов Ф.Ф. Течение вязкой жидкости в начальном участке каналов с интенсивным вдувом // Изв. АН СССР. МЖГ. 1987. № 2. С. 187–189.
5. Олсон, Эккерт. Экспериментальное исследование турбулентного течения в пористой круглой трубе с равномерным вдувом газа через стенку // Тр. Амер. о-ва инж.-механиков. Прикл. механика. 1966. № 1. С. 7–20.
6. Данлэп, Виллокби, Гермсен. Поле течения в камере сгорания РДТТ // Ракетн. техника и космонавтика. 1974. Т. 12. № 10. С. 178–180.
7. Albrechtinski T., Drzewiecki R., Perowicz J. et al. A subscale solid propellant rocket motor experimental program to validate the performance and gasdynamic analysis of the Titan IV SRMU // AIAA Paper. 1992. № 3820. 17 p.
8. Оран Э., Борис Дж. Численное моделирование реагирующих потоков. М.: Мир, 1990. 661 с.
9. Секундов А.Н. Применение дифференциального уравнения для турбулентной вязкости к анализу плоских неавтономных течений // Изв. АН СССР. МЖГ. 1971. № 5. С. 114–127.
10. Горохов М.М., Русяк И.Г., Тененев В.А. Численное исследование обтекания осесимметричных тел при наличии вдува с поверхности // Изв. АН СССР. МЖГ. 1996. № 4. С. 162–166.
11. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоиздат, 1984. 150 с.
12. Калинина С.В., Лебедев В.П., Ярыгина Н.И. и др. Экспериментальное исследование газодинамических течений в каналах с пористыми стенками и сосредоточенным струйным вдувом из узких кольцевых проточек // Междунар. конф. по внутрикамерным процессам и горению "Проблемы конверсии и экологии энергетических материалов" (ICOC-96), Россия, С.-Петербург, 1996. Ижевск, 1977. С. 216–229.
13. Петунин А.Н. Методы и техника измерений параметров газового потока. М.: Машиностроение, 1972. 332 с.