УДК 533.6.011

В.И. ТИМОШЕНКО, В.П. ГАЛИНСКИЙ

ТОРМОЖЕНИЕ СВЕРХЗВУКОВОГО ПОТОКА В ОСЕСИММЕТРИЧНОМ КАНАЛЕ ПЕРЕМЕННОЙ ФОРМЫ

Рассматривается задача о влиянии противодавления на структуру сверхзвукового потока в расширяющемся осесимметричном канале при его торможении. Прикладная направленность задачи определяется выбором рациональных параметров проточной части прямоточных воздушно-реактивных двигателей. Результаты получены на основе численного решения двумерной осесимметричной системы уравнений Навье–Стокса. Проиллюстрирована последовательная перестройка структуры течения в составном канале (цилиндр – расширяющийся конус – цилиндр) при увеличении противодавления. При определенных значениях противодавления в расширяющемся коническом участке формируется пристеночная зона рециркуляционного течения и течение в составном канале становится подобным течению через цилиндрический канал при нулевом трении.

Розглядається задача про вплив протитиску на структуру надзвукового потоку, що розширюється в вісесиметричному каналі при його гальмуванні. Прикладна спрямованість задачи обумовлюється вибором раціональних параметрів проточної частини прямоточних повітряно-реактивних двигунів. Результати отримані на основі чисельного розв'язання двовимірної вісесиметричної системи рівнянь Нав'є–Стокса. Проілюстровано послідовну перебудову структури течії в складеному каналі (циліндр – конус, що розширюється – циліндр) при збільшенні протитиску. При певних значеннях протитиску в кінчній ділянці, що розширюється, формується пристінна зона рециркуляційної течії і течія у складеному каналі стає подібною до течії через циліндричний канал при нульовому терті.

The problem of the effects of the backpressure on the supersonic flow pattern through divergent axisymmetric channel in its deceleration is examined. The applied directivity of the problem is characterized by selecting rational parameters of a passage of ramjets. The results are obtained on a basis of a numerical solution of the 2D system of the Navier-Stocks equations. The subsequent reconstruction of the flow pattern through constitutive channel (cylinder- divergent cone-cylinder) with an increased backpressure is illustrated. The near-wall zone of a recirculation flow is formed in certain values of the backpressure at a divergent conic section, and the flow through constitutive channel is similar to the flow through cylinder channel with zero friction.

Расширяющийся канал – диффузор – является неотъемлемой частью проточной части нерегулируемого прямоточного воздушно-реактивного двигателя (ПВРД) [1]. Его назначением является выравнивание поля потока после воздухозаборника перед входом в камеру сгорания. Существенным параметром, влияющим на течение в диффузоре, является давление в его выходном сечении, которое определяется процессами в камере сгорания и может изменяться в процессе ее функционирования. Качественное описание торможения сверхзвукового потока в канале переменного поперечного сечения и результаты экспериментальных исследований по влиянию противодавления на распределение давления на стенке канала приведены в [2].

Целью работы является исследование влияния давления на выходе из канала (противодавления) на торможение сверхзвукового потока в этом канале на основе численного решения двумерной осесимметричной системы уравнений Навье–Стокса [3]. Метод установления по времени [4] используется для решения системы уравнений Навье–Стокса по неявной конечно-разностной схеме Бима–Уорминга [5] с расщеплением векторов конвективных потоков по Стегеру [6].

Постановка задачи. Осесимметричный канал состоит из трех последовательно расположенных участков: первого цилиндрического участка длиной 0,72, расширяющегося конического участка длиной 6,28 и цилиндрического участка длиной 5,25. Радиус выходного сечения канала – 1,5. Линейные размеры отнесены к радиусу входного сечения. Расширяющийся конический участок имеет угол полураствора 4º46'. Канал такой конфигурации использовался в [2] при проведении экспериментальных исследований.

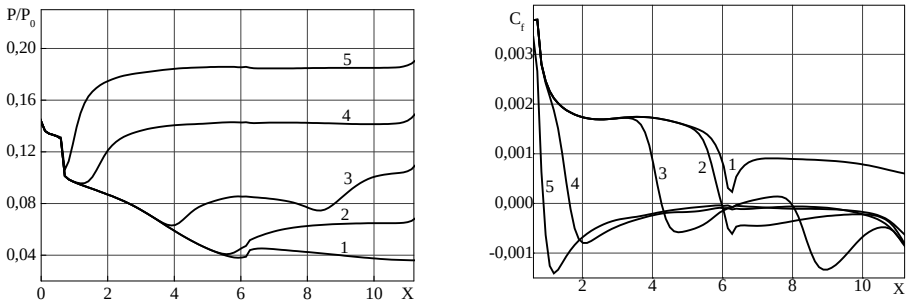
Для проведения расчетов вводится расчетная сетка равномерная вдоль оси x и сгущающаяся к стенке канала по оси y.Число Маха сверхзвукового потока на входе в канал задается равным M_∞=2. Рассматривается ламинарное течение при значении числа Рейнольдса $\mathrm{Re}=10^5$.

Вводится цилиндрическая система координат xOy: ось x направлена вдоль оси канала с началом во входном сечении, а ось y направлена вдоль радиуса канала.

Параметры невозмущенного набегающего сверхзвукового потока задаются во входном сечении канала x=0. В выходном сечении канала $x = L$ в области дозвукового течения задается давление на выходе из канала P_e, а в области сверхзвукового течения используется мягкое условие вытекания. При проведении расчетов вытекания потока из канала без противодавления условие мягкого вытекания используется и в области дозвукового течения. На оси симметрии канала задаются условия симметрии течения, а на теплоизолированной стенке канала используется условие прилипания потока.

Влияние противодавления на торможение сверхзвукового потока в канале. Для численной оценки влияния противодавления вводится коэффициент противодавления $k_p = \left(P_e - P_{out}\right)/P_{out}$, где P_e – задаваемое давление на выходе из канала, P_{out} – осредненное давление на выходе из канала, полученное в расчете без противодавления при условии мягкого вытекания потока из канала.

Продольные распределения давления (а) и коэффициента трения C_f (б) на поверхности канала показаны на рис. 1. Давление отнесено к давлению торможения в набегающем потоке P_0. На этом и последующих рисунках линия с номером 1 соответствует значению $k_p = 0$ (течение без противодавления при условии мягкого вытекания); 2 – $k_p = 1$; 3 – $k_p = 2$; 4 – $k_p = 3$; 5 – $k_p = 4$.



а) б)

Рис. 1

Из распределений давления видно, что возмущения, обусловленные противодавлением, распространяются вверх по потоку при увеличении коэффициента противодавления k_p. Координаты x точек начала отхода линий с номерами 2 – 5 от линии с номером 1 соответствуют границам распростране-

ния возмущений вверх по потоку вдоль пограничного слоя на стенке канала, обусловленных увеличением противодавления. Граница распространения возмущений тем ближе к входному сечению канала, чем выше давление на выходе из канала.

Появление областей отрыва потока иллюстрируется распределениями коэффициента трения C_f вдоль стенки канала. Значения $C_f < 0$ реализуются в областях отрыва потока вблизи стенки канала. При $k_p = 0$ реализуется безотрывное течение, а при $k_p > 1$ возникают области отрыва потока на стенке канала. В точке начала отрыва пограничного слоя значение C_f равно нулю. Эта точка смещается вверх по потоку по мере роста параметра k_p.

Распределения числа Маха потока вдоль оси канала показаны на рис. 2. Очевидно, что сверхзвуковой режим течения вдоль оси канала реализуется для рассмотренных значений коэффициента противодавления k_p.

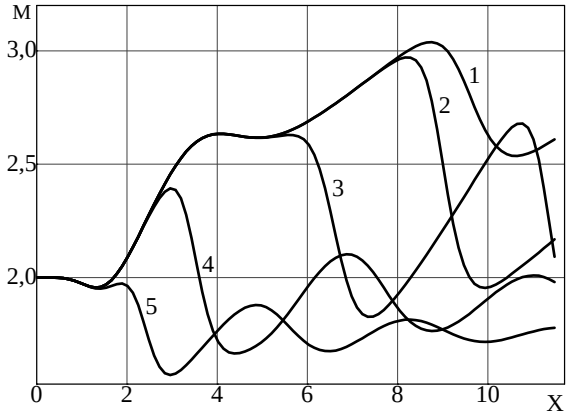


Рис. 2

Влияние противодавления на поле течения в канале осесимметричной переменной формы будем иллюстрировать с использованием полей изолиний. На рис. 3 представлены результаты расчетов по влиянию противодавления на поле безразмерного давления P/P_0.

Сначала в потоке формируется центрированная волна разрежения на кромке, разделяющей начальный цилиндрический и конический участки. При переходе от конического участка к конечному цилиндрическому участку формируется ударная волна. Структура течения определяется отражением и переотражением этих волн на стенке и оси канала. Точка отрыва пограничного слоя перемещается по коническому участку стенки канала в сторону входного сечения канала по мере увеличения противодавления. В окрестности точки отрыва формируется скачок уплотнения, интенсивность которого растет при увеличении k_p.

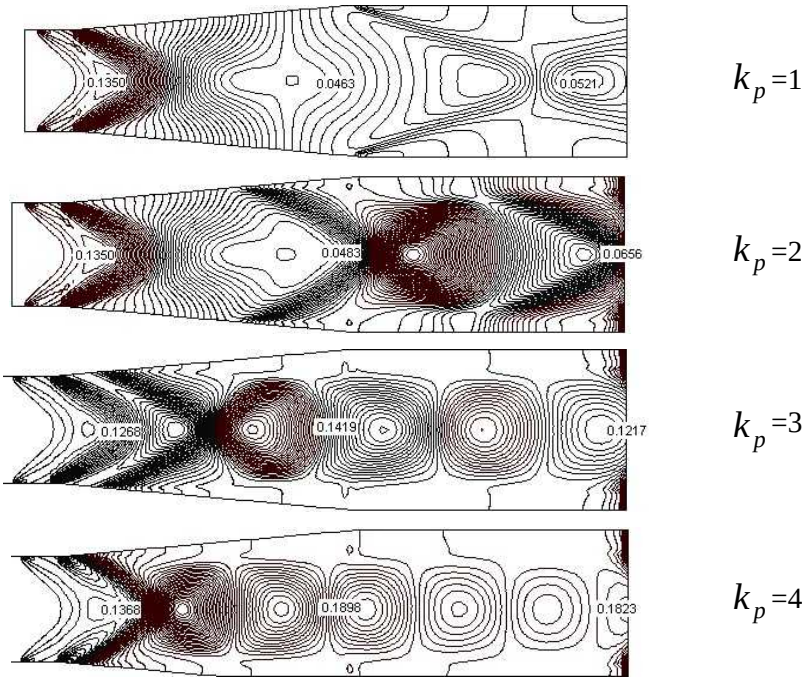


Рис. 3

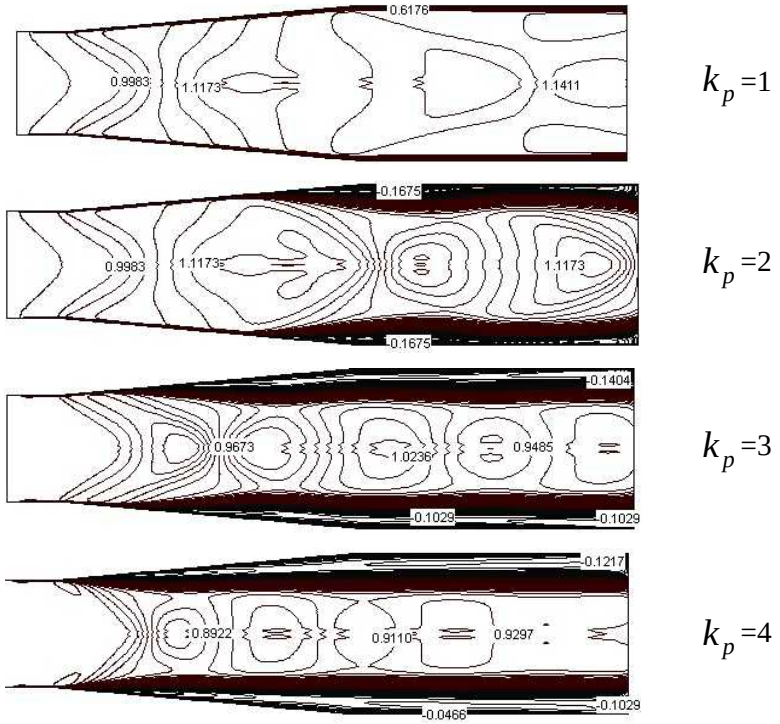


Рис. 4

Влияние противодавления на поле безразмерной продольной компоненты скорости V_x/V_∞ иллюстрирует рис. 4. Увеличение давления в выходном

участке канала приводит к утолщению пограничного слоя с появлением зоны рециркуляционного течения в окрестности кромки, разделяющей цилиндрический и конический участки. Эти зоны рециркуляционного течения идентифицируются на рис. 2 как области со значениями $C_f < 0$.

Точка начала отрыва пограничного слоя смещается вверх по потоку по мере роста параметра k_p, приводя к увеличению длины эффективного цилиндрического участка. Увеличение противодавления влечет за собой движение точки отрыва вверх по потоку, в результате чего увеличивается длина эффективного цилиндрического участка и волны сжатия смещаются вверх по потоку. При определенных значениях противодавления в расширяющемся коническом участке формируется пристеночная зона рециркуляционного течения и течение в составном канале становится подобным течению через цилиндрический канал при нулевом трении.

Выводы. Проиллюстрирована последовательная перестройка структуры течения в составном канале (цилиндр – расширяющийся конус – цилиндр) при увеличении противодавления. При определенных значениях противодавления в расширяющемся коническом участке формируется пристеночная зона рециркуляционного течения и течение в составном канале становится подобным течению через цилиндрический канал при нулевом трении. Информация о влиянии противодавления на изменение структуры течения в расширяющемся цилиндро-коническом канале и программно методическое обеспечение, с помощью которого получены представленные результаты, могут быть использованы при выборе параметров проточной части ГПВРД.

Работа выполнена в рамках проекта № 06-01-12(У)/12-01090416(Р) НАН Украины и РФФИ.

1. *Левин В. М.* Проблемы организации рабочего процесса в ПВРД / *В. М. Левин* // Физика горения и взрыва. – 2010. – Т. 46, № 4. – С. 45 – 55.
2. *Гурылева Н. В.* Исследование особенностей течений в каналах при взаимодействии возмущений с псевдоскачком / *Н. В. Гурылева, М. А. Иванькин, Д. А. Лапинский, В. И. Тимошенко* // Ученые записки ЦАГИ. – 2012. – Т. XLIII, № 6. – С. 40 – 54.
3. *Андерсон Д.* Вычислительная гидромеханика и теплообмен : В 2-х т. Т. 2 / *Д. Андерсон, Дж. Таннехилл, Р. Плетчер*. – М. : Мир, 1990. – 392 с.
4. *Тимошенко В. И.* Торможение ламинарного сверхзвукового потока в плоском канале при наличии противодавления / *В. И. Тимошенко, В. П. Галинский* // Техническая механика. – 2013. – № 2. – С. 56 – 63.
5. *Бим Р. М.* Неявная факторизованная разностная схема для уравнений Навье–Стокса сжимаемого газа / *Р. М. Бим, Р. Ф. Уорминг* // Ракетная техн. и космон. – 1978. – Т. 16, № 4. – С. 145 – 156.
6. *Steger J. L.* Flux Vector Splitting of the Inviscid Gas-dynamic Equations with Application to Finite Difference Methods / *J. L. Steger, R. F. Warming* // Journal of Computational Physics. – 1981. – V. 40, № 2. – P. 263 – 294.

Институт технической механики
НАН Украины и ГКА Украины,
Днепропетровск

Получено 03.03.14,
в окончательном варианте 03.03.14