

В. П. Замураев, А. П. Калинина

*Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН
ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия*

*Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия*

zamuraev@itam.nsc.ru

ВОЗДЕЙСТВИЕ ВТЕКАЮЩЕЙ ЧЕРЕЗ ЩЕЛЬ СТРУИ С ПЕРЕМЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ НА СВЕРХЗВУКОВОЙ ПОТОК ГАЗА В РАСШИРЯЮЩЕМСЯ КАНАЛЕ *

Исследуется влияние струи, втекающей из газогенератора через узкую щель, на ударно-волновую структуру течения в канале переменного сечения. Изучено влияние размера щели, плотности и скорости газа на входе, а также влияние колебаний параметров струи. Исследована возможность управления ударно-волновой структурой сверхзвукового течения в канале с помощью импульсно-периодического подвода энергии перед струей при отрицательной обратной связи по давлению.

Ключевые слова: сверхзвуковое течение, канал переменного сечения, струя, импульсный подвод энергии, уравнения Эйлера.

Введение

Современное развитие гиперзвуковых технологий, в частности разработка перспективных ГПВРД, связано с решением задач по управлению процессами в каналах [1]. В качестве активного управляющего воздействия применяются энергетические, механические способы воздействия. Подвод энергии в сверхзвуковой поток приводит к его торможению в ударных волнах и, как следствие, к потере полного давления. В [2] предложен способ организации рабочего процесса в камере сгорания, при котором скорость потока в камере поддерживается близкой к скорости звука. Для этого используется структура типа псевдоскачка. Для ее создания в канале постоянного сечения

применяется импульсно-периодическое воздействие на поток. В [3] рассматривалась возможность создания подобласти околозвуковых скоростей.

В данной работе исследовано влияние струи и подвода энергии на структуру сверхзвукового течения в канале ($M \approx 2$). При этом использовались граничные условия, реализующие отрицательную обратную связь по давлению. Изучено влияние размера щели, параметров газогенератора, из которого струя истекает, а также влияние колебаний параметров струи.

Постановка задачи

Исследуется влияние струи и подвода энергии на структуру сверхзвукового тече-

* Работа выполнена в рамках проекта СО РАН III.22.6.2. (№ 01201351870) и при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-08-00820).

ния в плоском канале. Канал состоит из сопла, секции постоянного сечения, в которую втекает струя и осуществляется подвод энергии, расширяющегося участка, завершающегося секцией постоянного сечения. Сопло обеспечивает в секции постоянного сечения поток с числом Маха $M \approx 2$. Энергия подводится выше по потоку от струи в двух пристеночных зонах, расположенных напротив друг друга. Параметры струи и подвода энергии выбраны так, что по отдельности оба механизма не ведут к запыранию канала. Для моделирования задачи используются нестационарные уравнения Эйлера. В обоснование возможности их использования при решении рассматриваемой задачи можно сослаться, например, на работу [4], в которой экспериментально исследовано взаимодействие приповерхностного электрического разряда с ударной волной, а также показано, что результаты удовлетворительно согласуются с численным решением двумерных нестационарных уравнений Эйлера. В критическом сечении сопла задается число Маха потока $M = 1$, безразмерное давление $p = 1$, плотность газа $\rho = \gamma = 1,4$ (температура $T = 1$). На выходе из канала применяются «мягкие условия». На стенках канала ставятся условия непротекания. Параметры струи определяются из распада разрыва параметров потока в канале возле стенки и задаваемых параметров в газогенераторе. Это позволяет реализовать отрицательную обратную связь по давлению. Для численного решения задачи применяется конечно-объемная схема, уменьшающая полную вариацию. В рассматриваемой модели течения импульсный подвод энергии осуществляется мгновенно, при этом изменения плотности газа и его скорости не происходит, увеличивается плотность энергии газа e в зоне ее подвода на величину Δe (соответственно увеличиваются температура и давление газа). Численное интегрирование системы дифференциальных уравнений проводится в промежутках между моментами подвода энергии. Более подробно постановка задачи изложена в [1].

Результаты расчета

Расчеты проведены для следующих размеров канала: длина первой секции постоянного сечения составляет 14 диаметров входного отверстия d сопла, ее безразмерная

ширина равна 1,66, что соответствует требуемому числу Маха потока в этой секции $M = 2$; аналогичные размеры второй секции постоянного сечения имеют значения 10,5 и 2,8 соответственно. Общая длина канала равна 35,5 (все размеры отнесены к d). Подвод энергии осуществлялся в пристеночных зонах. Размер зон 1,7 вдоль канала больше перпендикулярного размера 0,16. На рис. 1 показаны форма и размеры канала, положение струи и прилегающих к стенкам зон энергоподвода, а также распределение числа Маха стационарного потока при отсутствии воздействия на него.

Влияние стационарной струи на ударно-волновую структуру течения в канале исследовано для следующих значений параметров: ширина струи варьировалась в пределах $\Delta x = 0,104 \div 0,433$ диаметра критического сечения; давление в газогенераторе, из которого подавалась струя, изменялось от 0,5 до 2,5. Значения давления в газогенераторе и в невозмущенном потоке в канале отличались до десяти раз. Расчеты проводились как с предварительным подогревом газа (при этом $\rho = \gamma = 1,4$), так и без подогрева ($T = 1$). На рис. 2 представлены некоторые результаты расчетов. Положение скачка уплотнения определялось относительно левой границы отверстия для струи.

При параметрах газогенератора $p = T = 1$, $\rho = \gamma$ скачок уплотнения возле нижней стенки канала для всех размеров отверстия струи практически примыкает к струе, у верхней стенки скачок смещается вверх по потоку с увеличением размера отверстия. Увеличение давления в газогенераторе приводит к смещению скачка вверх по потоку и у нижней стенки, причем увеличение p

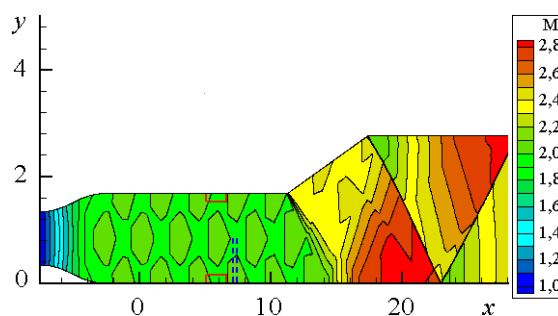


Рис. 1. Форма и размеры канала. Поле чисел Маха стационарного потока при отсутствии воздействия на него. Схема возмущений (поперечная полоса дает условное положение струи; прямоугольники – прилегающие к стенкам зоны энергоподвода)

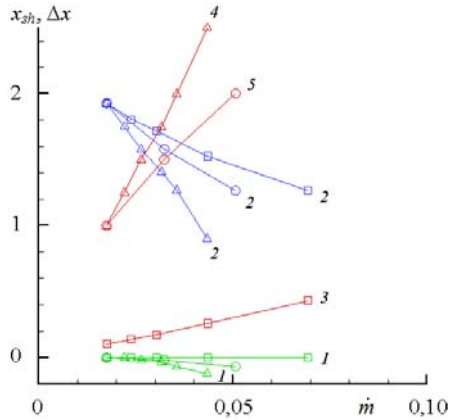


Рис. 2. Зависимость положения скачка уплотнения x_{sh} от расхода \dot{m} в струе: 1 – на нижней, 2 – верхней стенках; квадратики – при варьировании размера отверстия ($p = T = 1$), треугольники – с подогревом, кружки – без подогрева. Кривая 3 дает связь размера отверстия Δx с расходом \dot{m} , кривые 4 и 5 – давление в газогенераторе при $\Delta x = 0,104$

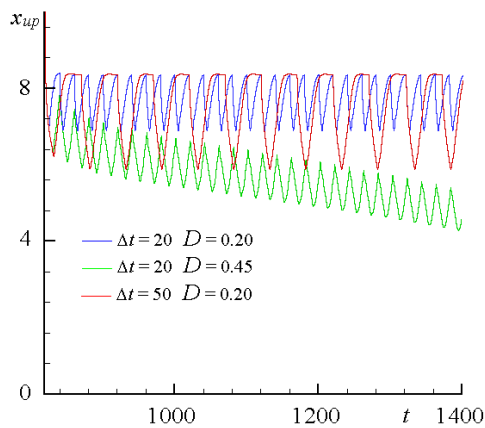


Рис. 3. Колебания положения ударной волны у верхней стенки канала.

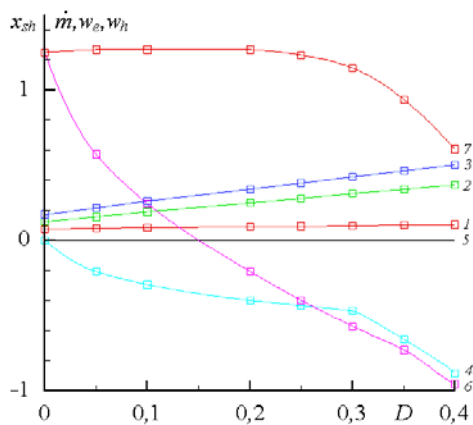


Рис. 4. Зависимость от коэффициента заполнения D среднего по периоду расхода \dot{m} (1), подводимой мощности w_e (2), потока полной энтальпии w_h (3) и положений ударной волны у нижней и верхней стенок канала (кривые 4–7)

в результате подогрева дает более значительное смещение скачка у верхней стенки, чем изотермическое сжатие газа.

Таким образом, подвод энергии в газогенератор с помощью электрического разряда или при использовании небольшого количества топлива позволяет создать в сверхзвуковом потоке существенное возмущение. Область этого возмущения тем больше, чем шире отверстие. Однако в случае большого отверстия этот подвод энергии может привести к запиранью канала. Целесообразно использовать периодическое возмущение параметров струи. Это достигается путем задания в газогенераторе периодического ступенчатого изменения давления при изохорическом подводе энергии:

$$p = \begin{cases} p_0 + \Delta p, & n\Delta t \leq t \leq n\Delta t + \tau, \\ p_0, & n\Delta t + \tau < t < (n+1)\Delta t. \end{cases}$$

Здесь Δt – период следования импульсов, τ – длительность импульса, n – число периодов. В расчетах приняты равными $p_0 = 1$, $\Delta p = 1,5$, $\Delta t = 20$ и 50 ; варьировался коэффициент заполнения D , равный отношению длительности импульса τ к периоду Δt . Расчет проводился для самой широкой рассматриваемой щели $\Delta x = 0,433$, через которую вытекала струя газа. На рис. 3 в качестве примера приведены колебания положения ударной волны у верхней стенки канала.

Увеличение периода Δt (при сохранении скважности) приводит к увеличению амплитуды колебания положения скачка. Тот же эффект может наблюдаться при увеличении коэффициента заполнения D . Начиная с некоторого значения D происходит запирание канала (на рис. 3 вариант с $\Delta t = 20$ $D = 0,45$). Следует обратить внимание, что расход газа в струе также изменяется во времени.

На рис. 4 показаны зависимости от коэффициента заполнения D среднего по периоду расхода, подводимой мощности, потока полной энтальпии и положений ударной волны у нижней и верхней стенок канала. Положение ударной волны определяется координатой, отсчитываемой от левой границы щели. Кривые 4 и 5 – минимальная и максимальная координаты у нижней стенки, кривые 6 и 7 – аналогичные величины у верхней стенки. Расход слабо зависит от скважности. Подвод энергии увеличивается в три раза. В результате значительно увеличивается амплитуда колебаний положения ударной

волны как у верхней, так и у нижней стенки. При этом у нижней стенки ударная волна к концу периода возвращается к струе (линия 5). Тогда как у верхней стенки при $D > 0,2$ максимальное отклонение ударной волны не восстанавливается, см. кривую 7). При $D = 0,40$ ударная волна успевает перейти в прямой скачок, однако к концу периода скачок вновь становится косым. При $D = 0,45$ ударная волна переходит в прямой скачок, который запирает канал.

Большая амплитуда колебаний положения скачка уплотнения обеспечивает сравнительно протяженную область повышенного давления и околосвуковых скоростей. Это можно видеть на рис. 5, на котором приведено распределение давления на стенках канала и среднего числа Маха в конце периода для варианта с широким отверстием и $D = 0,40$. Скачок давления в ударной волне относительно небольшой.

Незначительные колебания давления и других параметров потока до области возмущения связаны с нерасчетностью сопла. С аналогичной причиной связан скачок давления и некоторое падение среднего числа Маха в секции постоянного сечения, которой завершается канал.

Дальнейшие возможности управления ударно-волновой структурой сверхзвукового течения в канале дает импульсно-периодический подвод энергии перед струей. Демонстрацией этого служит рис. 6, на котором показано поле чисел Маха при совместном действии на поток узкой струи ($\Delta x = 0,104$) и двух источников теплоты суммарной мощностью 0,428, подводимой с периодом $\Delta t = 6$. В расчетах $p_0 = 2$.

Воздействие на поток одних только рассматриваемых пристеночных источников энергии (без струи) не приводит к возникновению в секции постоянного сечения подобласти околосвуковых скоростей: периодические возмущения сносятся в расширяющую часть канала. Тонкая струя создает слабый косой скачок уплотнения. Совместное действие источников энергии и струи приводит к образованию подобласти околосвуковых скоростей протяженностью вдоль канала ~ 1 . Это создает благоприятные условия для эффективного подвода и горения топлива в расширяющейся секции канала.

На рис. 7 показаны колебания положения ударной волны у верхней стенки. Рисунок подтверждает формирование в рассматри-

ваемом случае квазистационарной колебательной ударно-волновой структуры. Размах колебаний по длине канала порядка единицы.

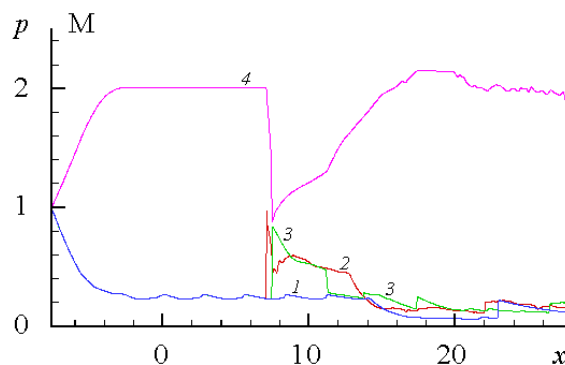


Рис. 5. Распределение давления по каналу: 1 — на нижней стенке без струи; 2, 3 — на нижней и верхней стенках со струей. Кривая 4 — распределение по длине канала среднего числа Маха

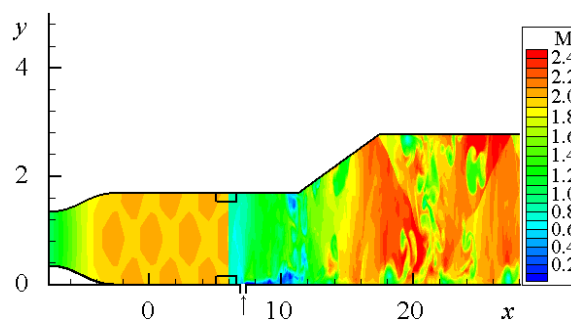


Рис. 6. Поле чисел Маха при совместном действии на поток струи (ее положение показано стрелкой под осью абсцисс) и двух противоположно стоящих источников тепла (прямоугольники у стенок)

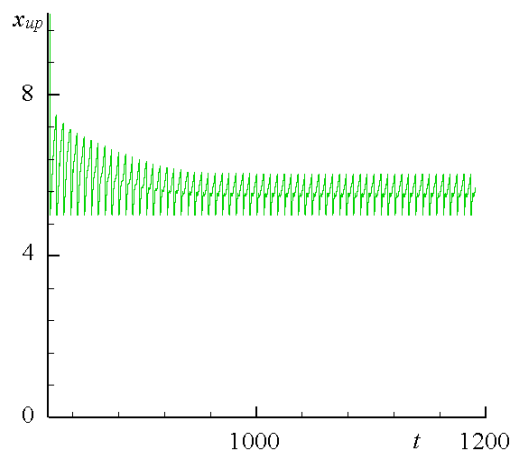


Рис. 7. Колебания положения ударной волны у верхней стенки канала

Критерий интенсивности энергетического воздействия, определяющий отношение максимального изменения параметров к значениям в стационарном решении, приближенно равен $\beta \approx 4,3$. Это соответствует девятикратному перепаду давления [3]. В результате временами втекание газа в канал практически прекращалось из-за достаточно близкого положения зон подвода энергии к струе. Используемые граничные условия реализовали отрицательную обратную связь по давлению. Благодаря этому удалось реализовать режимы, в которых ударная волна «застревала» в секции постоянного сечения. Амплитуда колебаний координаты фронта ударной волны при этом уменьшалась.

Заключение

Таким образом, исследовано влияние стационарной струи на ударно-волновую структуру течения в канале в зависимости от ширины щели, параметров в газогенераторе, из которого подавалась струя. Установлена необходимость подогрева, что дает более значительное смещение скачка у верхней стенки, чем изотермическое сжатие газа. Периодическое возмущение параметров струи (например, путем подвода энергии в газогенератор с помощью электрического разряда или при использовании небольшого количества топлива) позволяет создать в сверхзвуковом потоке значительную об-

ласть возмущения. Исследована возможность управления ударно-волновой структурой сверхзвукового течения в канале с помощью импульсно-периодического подвода энергии перед струей. Подтверждена возможность формирования квазистационарной колебательной ударно-волновой структуры с помощью использования отрицательной обратной связи по давлению.

Список литературы

1. Гуськов О. В., Копченков В. И. Процессы торможения сверхзвуковых течений в каналах. М.: Физматлит, 2008. 168 с.
2. Третьяков П. К. Организация пульсирующего режима горения в высокоскоростных ПВРД // ФГВ. 2012. Т. 48, № 6. С. 21–27.
3. Замураев В. П., Калинина А. П. Численно-аналитическое моделирование структуры сверхзвукового течения в канале переменного сечения с подводом энергии // ИФЖ. 2015. Т. 88, № 1. С. 210–219.
4. Знаменская И. А., Коротеев И. А., Луцкий А. Е. Экспериментальная реализация двумерной задачи распада плоского разрыва при импульсной ионизации потока с ударной волной // ДАН. 2008. Т. 420, № 5. С. 619–622.

Материал поступил в редколлегию 02.06.2015

V. P. Zamuraev, A. P. Kalinina

*Institute of Theoretical and Applied Mechanics of SB RAS
4/1 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

*Novosibirsk State University
2 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

zamuraev@itam.nsc.ru

INFLUENCE OF THE VARIABLE PARAMETERS JET FLOWING THROUGH THE SLIT ON THE SUPERSONIC GAS FLOW IN THE EXPANDING CHANNEL

Influence of the jet flowing from a gas generator through a narrow slit on shock-wave structure of a stream in the channel of variable section is investigated. Influence of the size of a jet, density and speed of gas on an entrance, and also influence of oscillations of parameters of a jet is studied. Possibility of management of a supersonic stream of shock-wave structure in the channel with the help pulse and periodic an energy supply before a jet is investigated at negative feedback on pressure.

Keywords: supersonic flow, channel of variable cross section, jet, pulse energy supply, Euler's equation.