

**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, a\_p\_kalinina@mail.ru*

## **ФОРМИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОЙ ОКОЛОЗВУКОВОЙ ОБЛАСТИ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ В ОСЕСИММЕТРИЧНОМ КАНАЛЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СТРУИ И ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ \***

Исследуется влияние струи, втекающей из газогенератора через узкую кольцевую щель, на ударно-волновую структуру течения в осесимметричном канале переменного сечения. Изучено влияние размера щели. Исследована возможность управления ударно-волновой структурой сверхзвукового течения в канале и создания околосвуковой области с помощью импульсно-периодического подвода энергии перед струей.

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

### **Введение**

Создание перспективных летательных аппаратов связано, в частности, с решением задач по управлению физическими процессами в каналах [1]. Так, снижение потерь полного давления в двигательном тракте определяет эффективность высокоскоростных ПВРД [2]. Для активного управления процессами применяются энергетические и механические способы воздействия. В [3] используется встречная и спутная струи, в [4] применяется вращающаяся детонационная волна, создаваемая также с помощью струи. Интерес вызывает приповерхностный подвод энергии [5]. В [6] дан обзор различных способов управления газодинамическим потоком. Однако эти способы либо

требуют значительного вложения энергии, либо не дают достаточно устойчивого результата. В [7] предложен новый способ организации рабочего процесса в камере сгорания, при котором скорость потока в камере поддерживается близкой к скорости звука. Запуск двигателя осуществляется с помощью струи, подаваемой из газогенератора в импульсно-периодическом режиме, при распределенной подаче топлива по длине камеры сгорания. Эксперименты [7], выполненные в плоском канале, подтверждают эффективность предложенного способа. В [8; 9] численно рассмотрена возможность создания подобласти околосвуковых скоростей с помощью струи и приповерхностного подвода энергии для плоского канала. Однако плоский канал имеет повышенную из-

---

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

*Замураев В. П., Калинина А. П.* Формирование устойчивой околосвуковой области в сверхзвуковом потоке в осесимметричном канале при воздействии струи и источников энергии // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2016. Т. 11, № 4. С. 45–51.

нашиваемость при интенсивном тепловыделении, особенно в области углов. Осесимметричный канал с этой точки зрения более надежен, поэтому представляет интерес возможность реализации околосвукового режима в осесимметричном канале. В предлагаемой работе представлено численное исследование на основе 2D-модели возможности управления сверхзвуковым потоком в осесимметричном канале с помощью кольцевой струи и поверхностного энерговыделения с целью выявления относительно устойчивых режимов с протяженной околосвуковой областью.

### Постановка задачи

В отличие от экспериментальной работы [2], в которой используется плоский канал, рассмотрим осесимметричный канал с кольцевой щелью в секции постоянного сечения. Диаметр секции полагаем равным 51 мм. При двумерном моделировании трехмерных экспериментов, в которых щель представляет собой круглое отверстие, возникает вопрос соответствия расчетных параметров экспериментальным. Соответствие можно проводить либо по равенству отношений площадей щели и канала, либо по равенству отношений диаметров. В [2] газогенератор сообщается с каналом через узкую цилиндрическую трубку диаметром 4 мм. Отношение диаметров струи в [2] и поперечного сечения выбранного в расчетах канала равно 0,078, отношение площадей сечения струи и поперечного сечения канала – 0,0061.

Для численного исследования был выбран диапазон ширины кольцевой щели, в котором отношения площадей и диаметров щели и канала лежат в указанном диапазоне. Равенство отношений линейных размеров позволяет адекватно оценить эффекты, связанные с пространственным затуханием, но при этом энергетический вклад в осесимметричной постановке задачи будет превышать экспериментальный примерно в десять раз. Равенство площадей сильно изменяет эффекты пространственного затухания и любые локальные эффекты, которые имеют значительное влияние на формирующийся режим с точки зрения его устойчивости, хотя энергетический вклад будет совпадать с экспериментальным. Прогноз на основе осесимметричной постановки задачи может быть перенесен на реальный эксперимент

с круглым отверстием только приближенно. Однако данное исследование представляет непосредственный интерес для установки с кольцевой конфигурацией.

Параметры сопла и секции постоянного сечения канала обеспечивают создание сверхзвукового потока с числом Маха, равным  $M \approx 2$ . Создается десятикратный перепад давления между газогенератором и каналом.

Для моделирования задачи используются нестационарные уравнения Эйлера. При решении рассматриваемой задачи можно сослаться, например, на работу [10], 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 [11] проведен эксперимент и выполнены 2D и 3D расчеты (с использованием уравнений Эйлера) сверхзвукового истечения из полужакрытого цилиндрического канала при втекании в него струй из форкамеры с высоким давлением. Измеряемые значения давления и силы тяги согласуются с расчетными величинами.

В критическом сечении сопла задается число Маха потока  $M = 1$ , безразмерное давление  $p = 1$ , плотность газа  $\rho = \gamma = 1,4$  (при температуре  $T = 1$ ). 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: если давление в потоке в области щели возрастет, то перепад давлений соответственно уменьшится, что приведет к снижению расхода газа через щель. 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  $\Delta e$  (соответственно увеличиваются температура и давление газа). Численное интегрирование системы дифференциальных уравнений проводится в промежутках между моментами подвода энергии.

### Влияние кольцевой струи на структуру течения

Итак, расчеты проводятся для осесимметричного канала, состоящего 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  $M = 1,9$ . Первоначально рассмотрено воздействие на сверхзвуковой поток в канале только струи. Исследуется влияние размера кольцевой щели при давлении в газогенераторе  $p = 2$  (дано в безразмерных единицах, соответствует 2 атм.) и давлении в невозмущенном потоке  $p = 0,25$ . Рассмотрен диапазон ширины кольцевой струи  $l$  от 0,078 до 2,5 мм. Отношение  $N$  площадей кольцевой щели и отверстия для струи в эксперименте равно

$$N = \frac{4Dl}{d^2},$$

где  $d$  – диаметр струи в эксперименте,  $D$  – диаметр секции постоянного сечения канала. При  $N=1$  ширина кольцевой струи  $l \approx 0,078$  мм, при  $N=32$  –  $l \approx 2,5$  мм, что соответствует приблизительно диапазону расхода (в безразмерных единицах) по абсолютной величине от 0,006 до 0,17. На рис. 1 изображен сдвиг скачка уплотнения в зависимости от расхода в струе, вызванный втекающей струей; указано положение скачка на стенке канала и на оси. Для соответствующего диапазона расходов видно, что сдвиги скачков уплотнения на стенке  $x_w$  и на оси  $x_{ax}$  существенно отличаются. Это соответствует косому скачку и означает, что режим запираания далек от рассматриваемого режима параметров. При увеличении расхода кривые сближаются. Следовательно, скачок уплотнения становится прямым. Происходит запираание канала. Подобный рисунок позволяет оценить размер щели, при котором наступает запираание потока в канале.

Расчеты со струей шириной 0,078 мм показали, что создать околзвучковой режим практически невозможно. При такой малой ширине происходит быстрое пространственное затухание вносимого струей возмущения. Решение почти не отличается от стационарного случая без струи и источников энергии, поток остается сверхзвуковым. Действительно, такой размер щели можно соотнести только с несостыковкой секций

канала, но никак не с газодинамическим воздействием.

На рис. 2, а показано поле чисел Маха для случая малой ширины щели ( $N = 1$ ). Рисунок дает представление о форме и размерах осесимметричного канала (приведена область при  $0 \leq y \leq R(x)$ , где  $y$  – радиальная независимая переменная,  $R(x)$  – координата стенки канала). Сопло на входе в канал

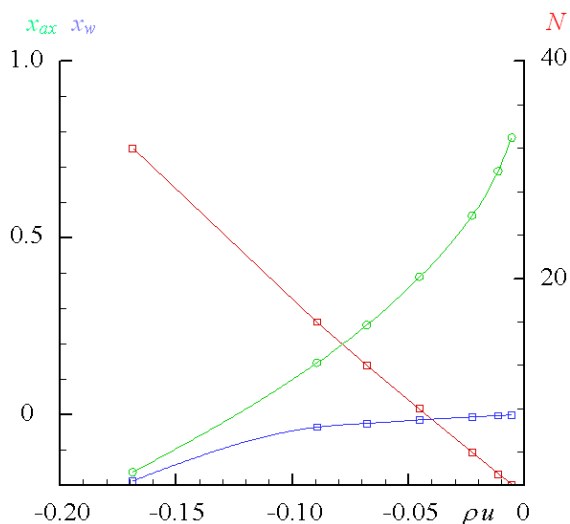


Рис. 1. Зависимость сдвига ударной волны от струи на стенке осесимметричного канала (синяя линия) и на оси (зеленая линия) в зависимости от расхода в струе. Красная линия дает связь относительной ширины струи и расхода

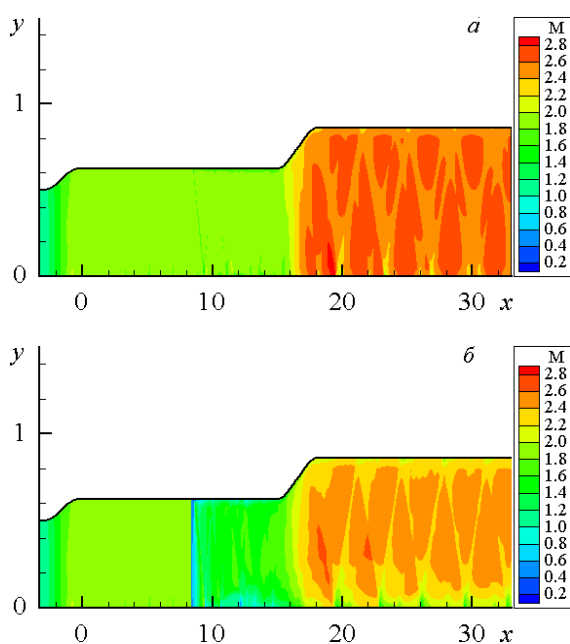


Рис. 2. Схема осесимметричного канала. Воздействие струи на поток при  $N = 1$  (а) и  $N = 32$  (б)

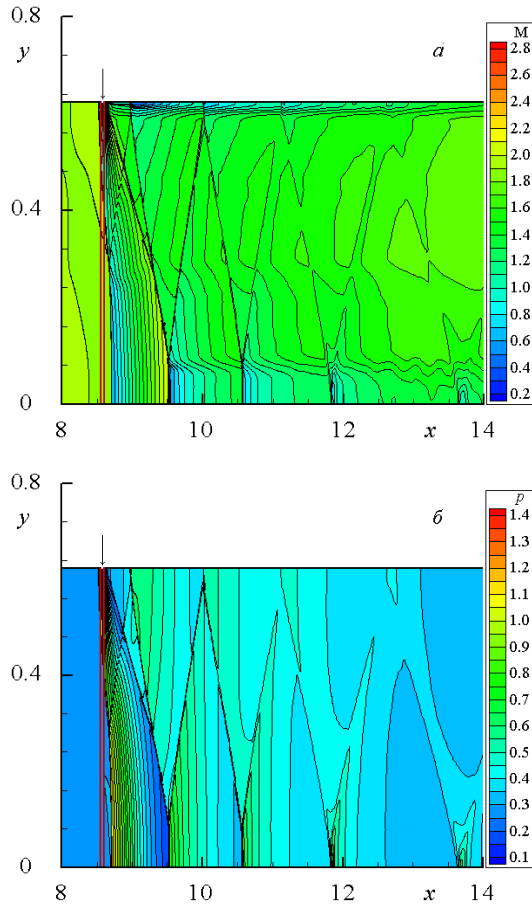


Рис. 3. Фрагменты поля течения в осесимметричном канале,  $N = 16$ : *a* – поле чисел Маха; *б* – поле давления

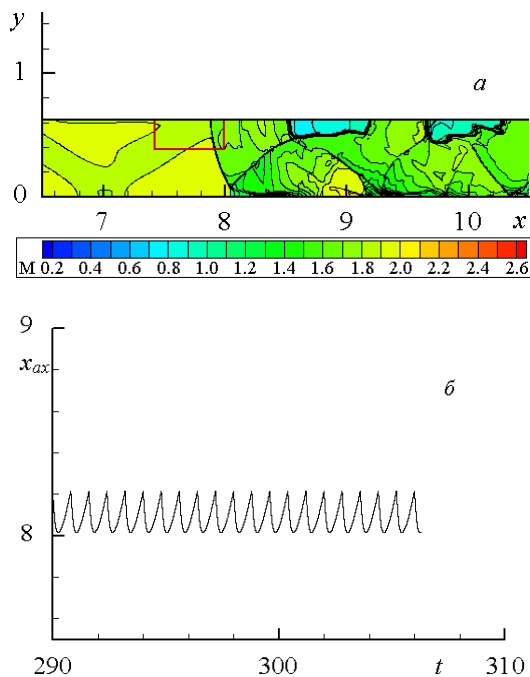


Рис. 4. Ударно-волновая структура течения в осесимметричном канале при импульсно-периодическом подводе энергии: *a* – фрагмент поля чисел Маха; *б* – колебание координаты ударной волны на оси

обеспечивало в первой секции постоянного сечения число Маха потока  $M = 1,9$ . Влияние щели на поле течения едва просматривается. На рис. 2, *б* показано поле чисел Маха для другого практически предельного случая ( $N = 32$ ). Сформировался прямой скачок уплотнения, который начал двигаться вверх по потоку. Сверхзвуковой поток в этом скачке тормозится, скорость потока становится дозвуковой,  $M \approx 0,5$ . Поле чисел Маха на рис. 2, *б* показано для начального момента запираания.

На рис. 3 приведен фрагмент поля течения, дающий его ударно-волновую структуру для промежуточного значения отношения площадей кольцевой щели и экспериментального отверстия для струи  $N = 16$ . В данном варианте сверхзвуковой поток тормозится в скачке уплотнения, созданном струей. Положение струи показано двумя вертикальными красными линиями. Скачок у стенки и оси канала прямой, за ним скорость газа дозвуковая. Однако по значительной части области он косой, и скорость газа за ним сверхзвуковая. Затем поток отклоняется струей в сторону оси канала. Это приводит к возникновению другого косоугольного скачка уплотнения. Далее происходит его нерегулярное отражение от оси с образованием тройной конфигурации ударных волн: падающей ударной волны, отраженной, ножки Маха и контактного разрыва. На обоих рисунках наблюдается многократное отражение ударных волн от стенки канала и оси симметрии с формированием относительно слабого псевдоскачка. Несколько снижая скорость потока до чисел Маха  $M \approx 1,6$ , рассматриваемая струя не создает режим с околосонной областью.

### Влияние приповерхностного источника энергии на структуру течения

В расчетах с энергоподводом (без струи) использовался импульсно-периодический кольцевой источник, прилегающий к стенкам канала, с удельной мощностью  $W = 3,65$ . Мощность источника задавалась в сравнении с энергией горения водорода в воздухе при температуре 1 000 К при коэффициенте избытка  $\alpha = 2,39$ , отнесена к квадрату критической скорости звука. Период подвода энергии  $\Delta t = 0,8$ , отнесен к  $D_0/a_0$  ( $D_0$  – диаметр критического сечения,

$a_0$  – критическая скорость звука). На рис. 4 приведены некоторые результаты расчета для этого варианта, а именно: фрагмент поля чисел Маха (рис. 4, а, масштабы по осям координат одинаковы; граница зоны подвода энергии показана красным цветом) и изменение во времени положения ударной волны на оси канала (рис. 4, б).

К моменту очередного подвода энергии область пониженной плотности, возникающая при предыдущем энергоподводе, успевает переместиться вниз по потоку. Однако полностью возмущение не уходит. Наблюдается конфигурация ударных волн с тройной точкой. Поэтому уменьшение коэффициента избытка  $\alpha$  (увеличение подводимой мощности) приводит к запираанию. В рассмотренном варианте (см. рис. 4) числа Маха в потоке сохраняются порядка  $M \approx 1,6$ . Таким образом, возможность управления ударно-волновой структурой сверхзвукового течения в канале при помощи импульсно-периодического источника энергии с целью создания околзвучковой области иллюзорны.

### Совместное действие струи и источника энергии

В дальнейшем исследование проводилось при совместном действии струи и энергоисточников. На рис. 5 приведено поле чисел Маха при импульсном подводе энергии с периодом  $\Delta t = 0,8$ . Подводимая энергия соответствует  $\alpha = 10$  при  $T = 1\,000$  К на входе в канал. Струя подавалась из газогенератора через кольцевую щель (стрелка на рисунке),  $N = 16$ . Этот случай соответствует варианту со струей, представленному на рис. 2 и 3. Выше по течению располагался пристеночный источник энергии (на рисунке прямоугольник). Энергии подводилось в три с лишним раза меньше, чем для результатов без струи.

Ударно-волновую структуру течения, возникающую при взаимодействии импульсного источника энергии и струи, можно видеть на рис. 6, на котором показан фрагмент поля течения в первой секции постоянного сечения канала. Ударная волна перед струей при отсутствии источника энергии довольно слабая. Взаимодействие с источником приводит к ее усилению и смещению вверх по потоку. Течение за ней становится дозвуковым. Однако струя приводит к смещению

потока в сторону оси канала, что вызывает его ускорение. Он становится сверхзвуковым. Далее возникает косой скачок уплотнения. При его отражении от оси возникает тройная конфигурация с диском Маха и контактными разрывом.

Однако в целом уровень чисел Маха понижается, о чем можно судить по рис. 7. Возникает область околзвучковых скоро-

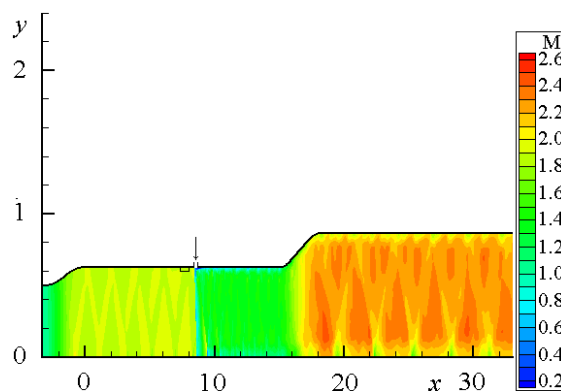
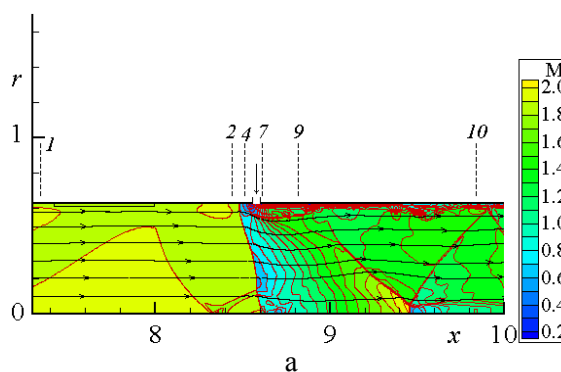
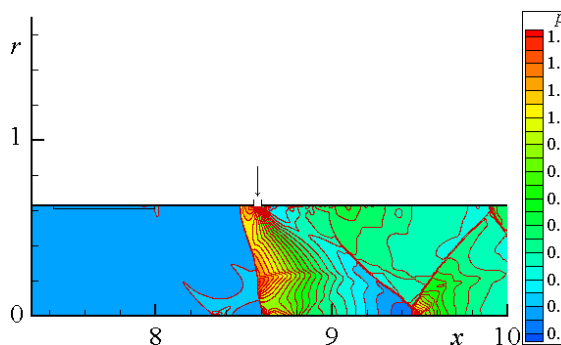


Рис. 5. Поле чисел Маха перед очередным подводом энергии в зонах



а



б

Рис. 6. Фрагменты полей чисел Маха (а) и давления (б)



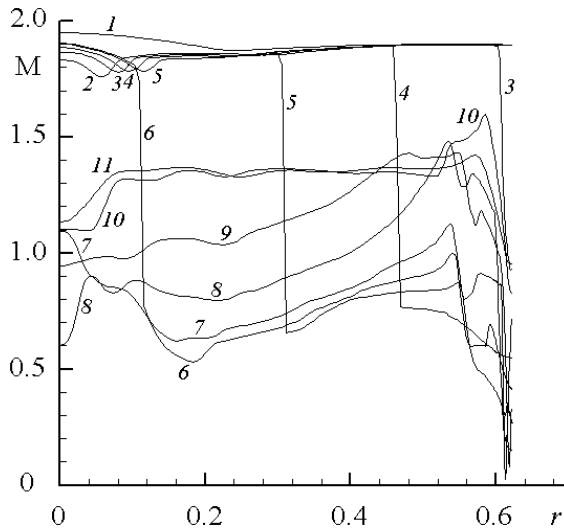


Рис. 7. Профили чисел Маха в поперечных сечениях секции постоянного сечения канала. Числами указаны номера сечений, обозначенных на рис. 6

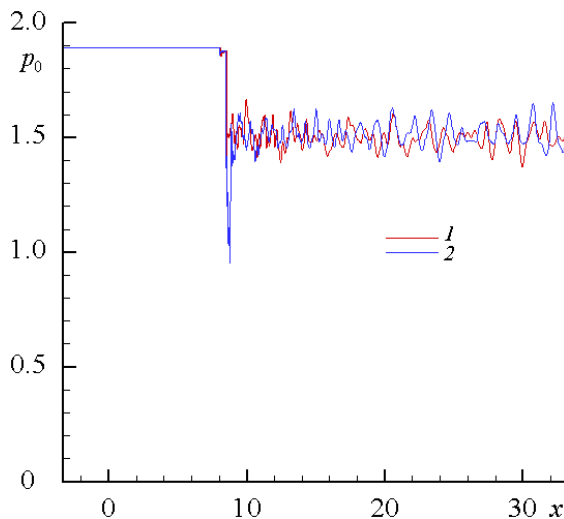


Рис. 8. Распределение полного давления по длине канала: 1 – ближе к оси канала; 2 – ближе к стенке

стей. Кривые 7–9 на рис. 7 получены в поперечных сечениях канала, показанных штриховыми линиями на рис. 6 с теми же номерами. Сравнение этих рисунков позволяет установить, что область околосвуковых скоростей имеет по продольной координате размеры приблизительно в два раза меньше радиуса секции постоянного сечения канала.

Потери полного давления в результате энергетического воздействия на поток можно оценить по результатам на рис. 8. Кривые 1 и 2 получены на расстоянии от оси и стенки канала соответственно, составляющем

16 % его радиуса. Потери в скачке уплотнения перед струей составляют до 20 %.

Резкое падение полного давления приходится на область струи.

### Заключение

В результате исследована возможность управления ударно-волновой структурой сверхзвукового течения в осесимметричном канале с помощью приповерхностного импульсно-периодического подвода энергии и струи. Показано, что при совместном действии струи и подвода энергии перед ней можно создать режим с протяженной околосвуковой областью в потоке. Подобные режимы могут быть использованы как благоприятные начальные условия при реализации горения в камерах сгорания.

### Список литературы

1. Гуськов О. В., Копченков В. И. Процессы торможения сверхзвуковых течений в каналах. М.: Физматлит, 2008. 168 с.
2. Третьяков П. К., Забайкин В. А., Прохоров А. Н. Высокоскоростной ПВРД с пульсирующим режимом запуска // XI Всерос. съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: сборник докладов. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2015. С. 3778–3780.
3. Гурылева Н. В., Иванькин М. А., Латинский Д. А., Тимошенко В. И. Исследование особенностей течений в каналах при взаимодействии возмущений с псевдоскачком // Учен. зап. ЦАГИ. 2012. Т. 43, № 6. С. 40–54.
4. Фролов С. М., Дубровский А. В., Иванов В. С. Трехмерное численное моделирование рабочего процесса в камере сгорания с непрерывной детонацией // Хим. физика. 2012. Т. 31, № 3. С. 32–45.
5. Zhao Z., Li J.-M., Zheng J., Cui Y. D., Khoo B. C. Study of shock and induced flow dynamics by nanosecond dielectric-barrier-discharge plasma actuators // AIAA J. 2015. Vol. 53, № 5. P. 1336–1348.
6. Журавская Т. А., Левин В. А. Стабилизация детонационного горения высокоскоростного потока горючей газовой смеси в плоском канале // Изв. РАН. МЖГ. 2015. № 2. С. 117–128.
7. Третьяков П. К. Организация пульсирующего режима горения в высокоскорост-

ных ПВРД // ФГВ. 2012. Т. 48, № 6. С. 21–27.

8. Замураев В. П., Калинина А. П. Воздействие втекающей через щель струи с переменными параметрами на сверхзвуковой поток газа в расширяющемся канале // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2015. Т. 10, вып. 3. С. 26–30.

9. 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.

10. 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.

11. Abashev V. M., Eremkin I. N., Zhivotov N. P. et al. Experimental and numerical investigation of the flow in half-closed channel with intersecting jets // XVIII ICMAR: Abstract. Pt. 1. Perm, 2016. P. 6–7.

*Материал поступил в редколлегию 11.08.2016*

**V. P. Zamuraev, A. P. Kalinina**

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

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

*zamuraev@itam.nsc.ru, a\_p\_kalinina@mail.ru*

**CREATING OF STABLE TRANSONIC ZONE  
INTO SUPERSONIC FLOW IN AXISYMMETRICAL CHANNEL  
BY THE ACTION OF JET AND ENERGY SOURCES**

The effect of the jet flowing out from the gas generator through a narrow annular gap, on the shockwave structure of the flow in the axisymmetric channel of variable section is studied. The effect of the gap size is investigated. The possibility to control the shock-wave structure of supersonic flow in the channel and creating of transonic area using pulsed-periodic energy supply and jet is studied.

*Keywords:* supersonic flow, the axisymmetric channel of variable cross section, jet, the pulse energy source, the Euler equations.