

УДК 533.6.011

## **Формирование околосвуковой области при теплогазодинамическом воздействии на сверхзвуковой поток в канале\***

**В.П. Замураев, А.П. Калинина**

*Институт теоретической и прикладной механики  
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск  
Новосибирский государственный университет*

E-mail: Zamuraev@itam.nsc.ru, Kalinina@itam.nsc.ru

Изучается управляющее воздействие одновременно струи и пристеночных источников энергии на ударно-волновую структуру сверхзвукового течения в осесимметричном и плоском каналах с целью создания околосвуковой области. Получены режимы с протяженной околосвуковой областью.

**Ключевые слова:** сверхзвуковое течение, канал, пристеночные источники энергии, струя, уравнения Эйлера и Навье–Стокса.

Эффективность подвода теплоты в камере сгорания определяется полнотой сгорания горючего и потерями полного давления. Качество смешения горючего с воздухом определяет полноту сгорания. На применение прямоточных схем в двигателях для полета летательных аппаратов с гиперзвуковой скоростью существует ограничение, связанное с большими потерями полного давления из-за торможения воздушного потока до дозвуковых скоростей и, как следствие, снижением эффективности двигателя. Для решения этой задачи применяются газодинамические и кинетические способы. В частности, для управления потоком в настоящее время широко применяются струи. Рассматривается вдувание встречной и спутной струй [1–3], используется вращающаяся детонационная волна [2]. Вызывают интерес также приповерхностные источники энергии [3]. Применяются всевозможные активные и пассивные способы (см. обзорную часть работы [4]). Однако все эти методы не решают проблемы организации управления энерговыделением в камере сгорания. В работе [5] был предложен новый способ запуска двигателя, обеспечивающий переход к сверхзвуковому течению в камере сгорания с помощью струи при распределенной подаче топлива по длине камеры. При таком запуске применяется предварительное торможение потока до околосвуковых скоростей. В работе было дано объяснение физическому механизму этого способа управления и приведены подтверждающие экспериментальные данные. В публикации [6] численно исследовалась возмож-

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант No. 17-08-00183) и в рамках проекта СО РАН III.22.6.2.

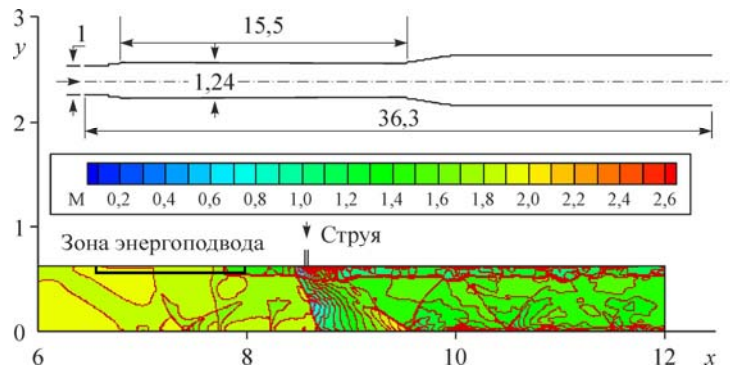


Рис. 1. Конфигурация и размеры канала.  
Фрагмент поля чисел Маха в сечении постоянного сечения.

ность создания подобласти околосвуковых скоростей с помощью струи и приповерхностного подвода энергии для плоского канала, а в работе [7] — для осесимметричного канала. Авторами [7] были представлены результаты численного моделирования процесса формирования околосвуковой области в осесимметричном канале с помощью импульсно-периодических источников энергии и струи, а также оценено влияние турбулентности и горения водорода на ударно-волновую структуру потока при моделировании в рамках упрощенной химической кинетики для плоского канала.

Рассмотрим сверхзвуковое течение в осесимметричном канале переменного сечения с пристеночными источниками энергии и струей газа, втекающей из газогенератора. Конфигурация моделируемой системы и ее размеры показаны в верхней части рис. 1. Здесь все размеры отнесены к диаметру критического сечения на входе в канал; длины секций и площади сечений соответствуют экспериментальной установке, представленной в работе [5]. В первой секции постоянного сечения число Маха  $M \approx 2$ . Пристеночный импульсно-периодический подвод энергии осуществлялся в первой секции постоянного сечения (узкий прямоугольник у стенки на нижней части рис. 1 показывает зону подвода энергии), кроме того, в секцию инжектировалась кольцевая струя. Инжекция производилась из газогенератора с давлением  $p = 2$  атм, в то время как давление в канале при отсутствии горения составляло 0,25 атм. Далее газ вытекал в ресивер. Для численного моделирования использовались нестационарные уравнения Эйлера. На возможность их применения при решении подобных задач для течения в канале указывают, например, результаты работ [8, 9].

В качестве примера на рис. 1 приведена возникающая ударно-волновая структура течения в секции постоянного сечения при источнике с импульсно-периодическим подводом энергии. Мощность источника была эквивалентна количеству теплоты, выделяющейся при сгорании водорода в воздухе ( $T = 1000$  К) при коэффициенте избытка  $\alpha = 10$ .

Период подвода энергии, обезразмеренного на отношение диаметра критического сечения к скорости звука, равнялся  $\Delta t = 0,8$ . Здесь показан момент времени перед очередным подводом энергии.

На рис. 2 приведено распределение вдоль канала числа Маха, осредненного по сечению. В результате совместного действия источника и струи возникает область трансзвукового течения.

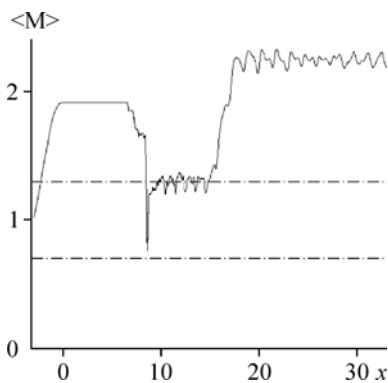


Рис. 2. Распределение вдоль канала числа Маха, осредненного по сечению.

Штрихпунктирными линиями обозначен коридор трансзвуковых скоростей.

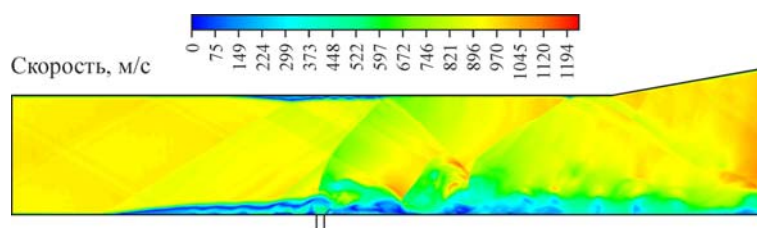


Рис. 3. Распределение скорости в плоском канале при втекании струи.

С целью оценки влияния вязкости проведено нестационарное двумерное CFD-моделирование (Computational Fluid Dynamics) на основе SST-модели турбулентности при втекании струи в плоский канал с непрофилированным соплом, получено распределение абсолютной величины скорости через 780 мксек после начала втекания струи. При расчете использовалась численная схема с высоким порядком точности (рис. 3). Размеры рассматриваемого канала совпадали с размером экспериментального канала из работы [1], при этом щели в них были различными: в эксперименте она была компактная, а в расчетах — протяженная. Поперечный размер сечения постоянного сечения составлял 30 мм. Расчеты проводились для малых входных значений интенсивности и масштаба турбулентности — 0,025 % и 0,00025 м соответственно. При сравнении наблюдается качественное сходство результатов моделирования с экспериментальными данными работы [10], где изучалось нестационарное взаимодействие потока и струи. На рисунке достаточно четко видно формирование отрывной зоны перед струей, втекающей из газогенератора.

На рис. 4 для изучаемого случая представлено сравнение абсолютной величины скорости на средней линии канала с учетом вязкости и без него. Из анализа обоих графиков следует, что влияние вязкости на среднюю величину скорости потока ограничено малым расстоянием от стенок канала.

Для изучения возможности создания пристеночных источников энергии с помощью горения водорода, подаваемого из инжекторов, проведены CFD-расчеты для плоского канала, целью которых являлось качественное определение локализации областей горения, а также сравнение газодинамической картины с результатами моделирования на основе уравнений Эйлера. Задача решалась с применением уравнений Навье–Стокса, замыкаемых SST  $k-\omega$  моделью турбулентности для более высоких значений интенсивности турбулентности (0,1 %) и масштаба (0,001 м). Химическая кинетика моделировалась одной реакцией окисления водорода. На рис. 5 показано распределение чисел Маха (рис. 5a) и массовой доли водорода (рис. 5b). Пристеночные источники энергии создавались с помощью горения водорода, подаваемого из двух струй, втекающих из резервуара под давлением 1 атм. Давление в форкамере, как и в предыдущих случаях, составляло 3 атм, газ вытекал в ресивер с низким давлением.

Моделирование в рамках уравнений Навье–Стокса показало, что при непрерывной подаче сжатой струи воздуха из газогенератора горение действительно локализуется вблизи стенки канала, захватывая турбулентный пограничный слой и обе отрывные зоны, при этом в центральной области оно

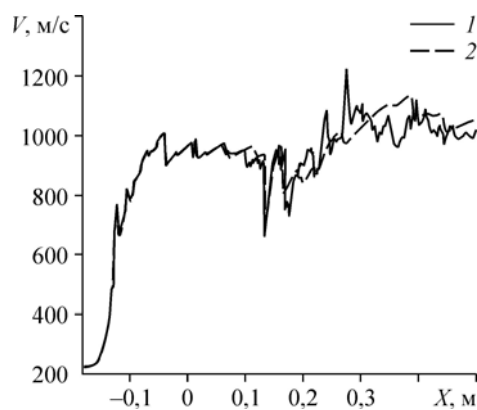


Рис. 4. Распределение числа Маха на средней линии канала.

1 — решение с учетом вязкости,  
2 — невязкое решение.

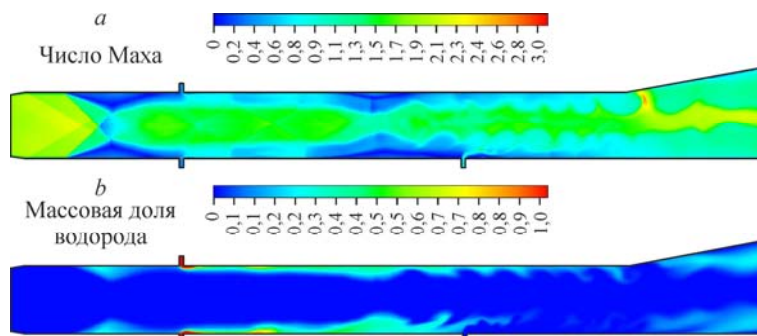


Рис. 5. Поля числа Маха (а) и массовой доли водорода (б).

отсутствует. В результате этого происходит торможение потока до числа Маха 1,4. Видно, что для случаев, представленных на рис. 1 и 5, наблюдается сходство ударно-волновых структур. Следует отметить, что задача с учетом вязкости не является масштабируемой, поэтому для прогноза горения в реальной установке необходимо уточнение всех размеров с учетом всех имеющихся устройств. В рассмотренном случае влияние горения на ударно-волновую структуру достаточно сильно выражено благодаря тому, что поперечный размер канала не очень велик по сравнению с размером отрывной зоны. Поперечная протяженность зоны горения сравнима с глубиной проникновения струи в область потока.

Таким образом, численно показана возможность торможения потока с числом Маха  $M = 2$  до околозвуковых скоростей в каналах сечением около 30 мм, что является благоприятной предпосылкой для реализации горения в расширяющейся части канала.

### Список литературы

1. Гурьева Н.В., Иванькин М.А., Лапинский Д.А., Тимошенко В.И. Исследование особенностей течений в каналах при взаимодействии возмущений с псевдоскачком // Уч. записки ЦАГИ. 2012. Т. XLIII, № 6. С. 40–54.
2. Фролов С.М., Дубровский А.В., Иванов В.С. Трехмерное численное моделирование рабочего процесса в камере сгорания с непрерывной детонацией // Химическая физика. 2012. Т. 31, № 3. С. 32–45.
3. 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. Т. 53, № 5. С. 1336–1348.
4. 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.
5. Третьяков П.К., Забайкин В.А., Прохоров А.Н. Высокоскоростной ПВРД с пульсирующим режимом запуска // XI Всеросс. съезд по фундаментальным проблемам теоретич. и прикл. механики: сб. докладов. Казань: Изд-во Казанского университета, 2015. С. 3778–3780.
6. Замураев В.П., Калинина А.П. О возможности создания устойчивой околозвуковой области в сверхзвуковом потоке в канале // Тепловые процессы в технике. 2016. Т. 8, № 7. С. 292–296.
7. Замураев В.П., Калинина А.П. Формирование устойчивой околозвуковой области в сверхзвуковом потоке в осесимметричном канале при воздействии струи и источников энергии // Вестник НГУ. Сер. Физика. 2016. Т. 11, № 4. С. 45–51.
8. Знаменская И.А., Коротеев И.А., Луцкий А.Е. Экспериментальная реализация двумерной задачи распада плоского разрыва при импульсной ионизации потока с ударной волной // Докл. РАН. 2008. Т. 420, № 5. С. 619–622.
9. Abashev V.M., Eremkin I.N., Zhivotov N.P., Zamuraev V.P., Kalinina A.P., Tretyakov P.K., Tupikin A.V. Experimental and numerical investigation of the flow in half-closed channel with intersecting jets // XVIII ICMAR: Abstract, Part 1. Perm, Russia. 2016. P. 6–7.
10. Ombrello T., Carter C., McCall J., Schauer F., Naples A., Hoke J., Hsu K.-Yu. Enhanced mixing in supersonic flow using a pulse detonator // J. of Propulsion and Power. 2015. Vol. 31, No. 2. P. 654–663.

Статья поступила в редакцию 24 июля 2017 г.