

**М. А. Гольдфельд, Ю. В. Захарова, А. В. Старов, К. Ю. Тимофеев**

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

*starov@itam.nsc.ru*

## **ЩЕЛЕВОЙ КАНАЛ КАК ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЙ ИСТОЧНИК ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И СТАБИЛИЗАЦИИ ГОРЕНИЯ В СВЕРХЗВУКОВОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ\***

Для обеспечения воспламенения топлива при большой сверхзвуковой скорости потока в канале была предложена оригинальная схема стабилизации горения при параллельной потоку спутной подаче топлива, которая обеспечивает высокую температуру потока в области образования топливно-воздушной смеси. Были проведены расчетно-экспериментальные исследования самовоспламенения и горения водорода в модельной камере сгорания с щелевым каналом (газодинамический источник воспламенения) при числах Маха 3,7 и 5,8 на входе. Численное моделирование было выполнено на основе решения полных осредненных уравнений Навье – Стокса, дополненных  $k-\omega$  SST моделью турбулентности. Эксперименты были выполнены в импульсной аэродинамической трубе ИТ-302М ИТПМ СО РАН в режиме присоединенного воздухопровода. Щелевой канал имел два варианта исполнения выходного сопла: с и без геометрического горла. Было установлено, что поток на входе в щелевой канал характеризуется сложной структурой с двумя вихрями с высокой температурой, которая остается таковой в канале с геометрическим горлом и при запираии канала без горла. Обнаружено, что в канале с геометрическим горлом реализуется равномерное дозвуковое течение. Течение в щелевом канале без геометрического горла остается сверхзвуковым, но с меньшим числом Маха, чем в основном канале. Структура течения на выходе щелевого канала существенно разная для этих двух случаев.

*Ключевые слова:* сверхзвуковая скорость, канал, самовоспламенение, стабилизация горения.

### **Введение**

Многочисленные экспериментальные данные по горению при спутной [1] и угловой [2] инъекции топлива свидетельствуют о значительном влиянии температуры на воспламенение и горение в высокоскоростных камерах сгорания. При больших скоростях потока на входе в канал, когда статическая температура в потоке воздуха близка или меньше температуры самовоспламенения топлива, горение начинается в зонах стабилизации [3]. В этих зонах локальная скорость потока низкая, и реализуется поток с температурой, близкой к полной.

Известно, что процесс стационарного горения газовой смеси в однородном потоке со сверхзвуковой скоростью, которая превышает скорость распространения пламени, возможен только при продолжительном горении смеси любого источника воспламенения. Такой источник иногда называют «тепловой генератор» или «стабилизирующий реактор» [4], он обеспечивает поступление высокотемпературных продуктов сгорания в основной поток. Наличие «теплового генератора» при больших сверхзвуковых скоростях потока в канале становится обязательным.

Топливо-воздушная смесь, проникая в рециркуляционные зоны и турбулентный

---

\* Исследования выполнены при поддержке РФФИ (проект № 13-08-00860А).

пограничный слой за стабилизатором пламени, смешивается с горячими продуктами реакции. Смесь нагревается и через некоторое время, которое соответствует начальной стадии химической реакции, воспламеняется. Для разных линий тока это расстояние будет различным в зависимости от физических параметров смеси вдоль линии тока. При стационарном процессе горения области воспламенения располагаются в пределах длины зоны рециркуляции потока таким образом, что обеспечивается непрерывное возвращение части горячих продуктов реакции в области рециркуляции потока. Тепловой энергии этого газа достаточно для воспламенения свежего объема смеси. Газодинамические и физико-химические циклы стабилизации пламени становятся замкнутыми и самодостаточными.

При сверхзвуковых скоростях потока в канале необходимо приложить особые усилия для обеспечения воспламенения и стабилизации пламени. Это может быть пилотный факел [5], организация зон свободной рециркуляции [6], использование пилонов [7], каверн [8], конусов и клиньев, обратных уступов и т. д. [9; 10]. С ростом числа Маха полета доля импульса топлива в суммарном импульсе двигателя растет. Сопротивление внутренних элементов камеры сгорания также увеличивается. Поэтому в условиях больших сверхзвуковых скоростей течения в канале необходимо использовать спутную или близкую к спутной схему подачи топлива [11]. Необходимо также использовать такую схему стабилизации, которая обеспечивает самовоспламенение топлива, причем ее конфигурация должна быть оптимальной с точки зрения минимизации аэродинамического сопротивления.

Для удовлетворения этих требований была предложена оригинальная схема камеры сгорания с щелевым каналом на всю ширину основного канала, который был установлен за наклонным обратным уступом. Предполагалось, что в результате замедления потока в щелевом канале будет достигнута высокая температура, которая обеспечит самовоспламенение топлива. Выхлоп из сопла щелевого канала в основной канал должен способствовать воспламенению и горению топлива в основном канале. При этом щелевой канал не приносит дополнительного сопротивления, кроме сопротивления трения. В этом случае пограничный

слой в канале используется для создания мини ПВРД в качестве источника воспламенения.

Цель данной работы состояла в численных и экспериментальных исследованиях предлагаемой концепции щелевого канала для воспламенения водорода и стабилизации горения при сверхзвуковых скоростях потока в канале камеры сгорания; определении влияния чисел Маха, полной температуры на входе в канал и конфигурации щелевого канала на изменение структуры течения в основном канале при различных схемах подачи топлива.

### Экспериментальная установка и условия испытаний

Схема экспериментального канала представлена на рис. 1. Модель состоит из следующих основных элементов: сменного блока плоского профилированного сопла, успокоительной секции (секция-изолятор) и собственно модельной камеры сгорания. Выход сопла (и секция-изолятор) имеет прямоугольное сечение  $50 \times 100$  мм. В секции-изоляторе измеряются статическое давление и тепловые потоки перед входом в основной канал камеры сгорания. Модельная камера сгорания состоит из инжекторной секции длиной 355 мм и расширяющейся секции (на схеме не показана) длиной 525 мм с полууглом раскрытия  $3^\circ$ . Инжекторная секция имеет боковые окна с кварцевыми стеклами марки КУ, которые позволили провести визуализацию как «холодного», так и «горячего» течения в этой области камеры сгорания. Разработанный «тепловой генератор» представляет собой щелевой канал, который является частью основного канала камеры сгорания (рис. 2). Щелевой канал имеет треугольные в плане поддерживающие пилоны и сменное геометрическое горло выходного сопла, которое позволяло двукратно уменьшать проходное сечение на выходе мини-канала.

Эксперименты были проведены в импульсной аэродинамической трубе ИТ-302М ИТПМ СО РАН в режиме присоединенного воздухопровода при следующих параметрах потока на входе в основной канал: числа Маха  $M_{вх} = 3,7$  и  $5,8$ ; полное давление  $P_0 = 90\text{--}270$  атм.; полная температура  $T_0 = 1\ 900\text{--}2\ 900$  К. Были предусмотрены два варианта подачи водорода. Во-первых, подача в ядро

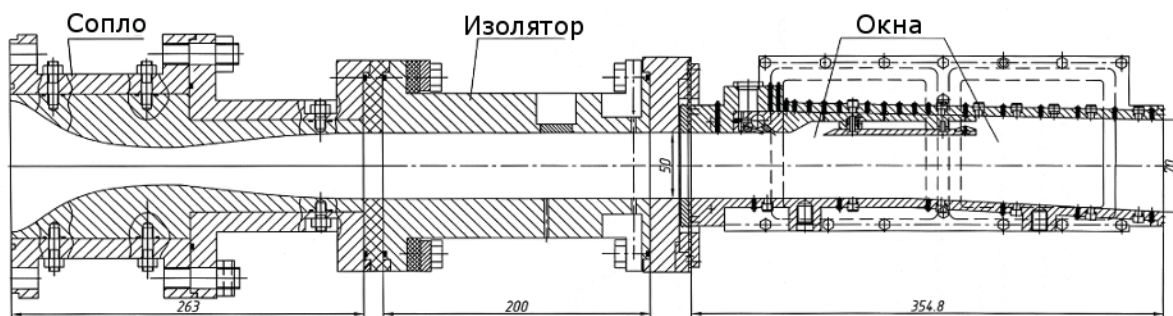


Рис. 1. Схема модельной камеры сгорания

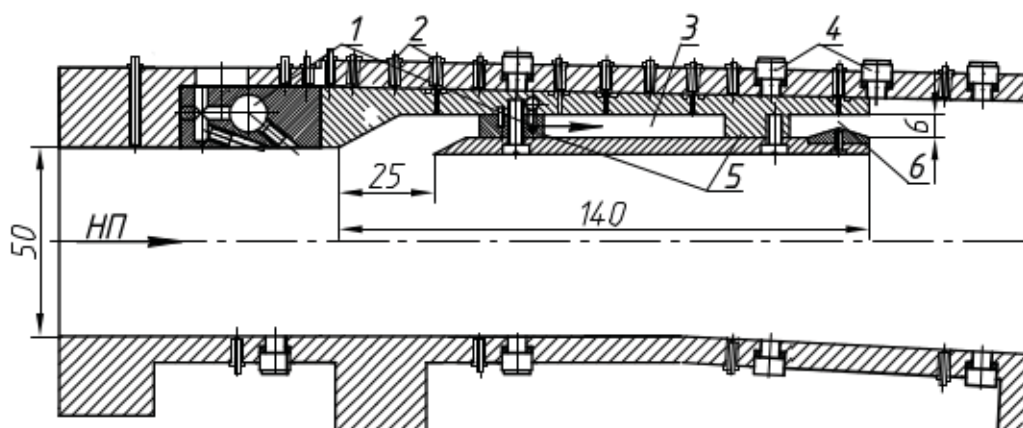


Рис. 2. Участок камеры сгорания со щелевым каналом:  
НП – направление потока; 1 – подача топлива; 2 – приемники давления; 3 – щелевой канал;  
4 – датчики теплового потока; 5 – поддерживающие пилоны; 6 – горло

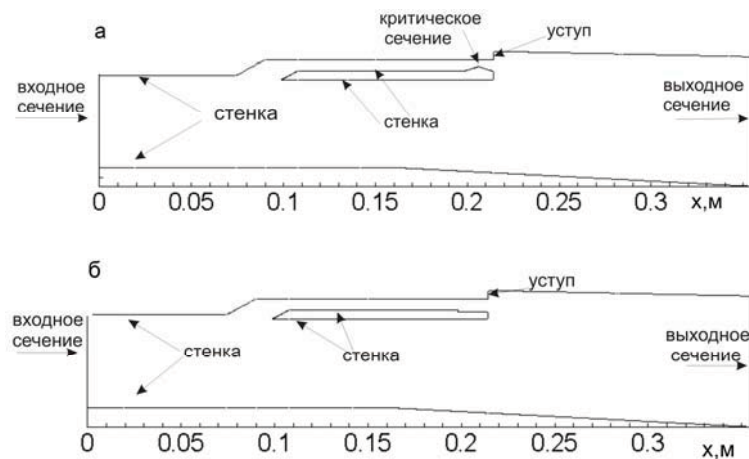


Рис. 3. Расчетная область. Щелевой канал:  
а – с геометрическим горлом; б – без геометрического горла

потока перед входом в щелевой канал через три так называемых «аэродинамических клина» – две пары отверстий сгруппированы таким образом, что вдув топлива осуществлялся со стенки под углом  $40^\circ$  в попе-

речном и под углом  $20^\circ$  в продольном направлениях. Во-вторых, подача в щелевом канале с пилонов в поперечном направлении. Коэффициент избытка водорода менялся от 0,6 до 1,1 в основном канале и от 0,03

до 0,11 в щелевом канале. Эксперименты проводились при инъекции топлива в основной и щелевой каналы одновременно или только в основной канал.

### Численное моделирование

Расчеты проводились с помощью программного комплекса ANSYS CFD 12,0 [12]. В большинстве вычислений было использовано два уравнения модели турбулентности  $k-\omega$  SST [13]. Плотность решателя была выбрана по схеме [14] третьего порядка аппроксимации. В этих расчетах использовалось упрощение расчетной области (рис. 3), где часть сопла и изолятор были заменены на плоский канал эквивалентной длины.

Расчетная область была ограничена входным и выходным сечениями, жесткими стенками основного канала, а также внутренними жесткими стенками щелевого мини-канала. Для получения начальной толщины пограничного слоя, определенной в эксперименте, сначала рассчитывался прямоугольный канал длиной 800 мм, расчетная сетка для которого содержала 1 000 узлов в направлении  $x$  и 350 узлов в направлении  $y$ . На выходе из канала записывались профили числа Маха, статического давления и температуры, а также турбулентных параметров. После чего данные профили ставились в качестве граничных условий на вход в расчетную область. В расчетной области была построена четырехугольная сетка, содержащая 700–800 узлов в направлении  $x$  и 350–400 узлов в направлении  $y$ . Температура стенок во всех рассчитываемых случаях была фиксированной и составляла  $T_w = 300$  К.

Численное моделирование было проведено при числе Маха  $M_{вх} = 3,7$  (статическое давление на входе в основной канал  $P = 1$  атм., полная температура  $T_0 = 1\,960$  К), и при  $M_{вх} = 5,8$  ( $P = 0,34$  атм.,  $T_0 = 2\,050$  К). В обоих случаях толщина пограничного слоя составляла 10 мм.

### Результаты и обсуждение

Расчетные исследования структуры течения в основном и в щелевом каналах были выполнены для определения возможного положения зон воспламенения топлива и

областей его подачи. При числе Маха  $M_{вх} = 3,7$  расчеты были выполнены для конфигурации щелевого канала без геометрического горла.

Расчетные исследования показали, что за обратным уступом реализуется интенсивный отрыв (рис. 4), который занимает большую часть области разворота основного потока перед входом в щелевой канал. На нижней стенке щелевого канала сразу за его входом образуется локальный отрыв. В результате возникает сужение для линий тока внутри щелевого канала, которое приводит к разгону течения до сверхзвуковой скорости. Течение остается сверхзвуковым по всей длине щелевого канала на уровне примерно  $M \approx 2$ . Струя на выходе из щелевого канала имеет бочкообразную структуру с образованием дозвуковых зон в области соответствующих донных срезов. Струя со сверхзвуковой скоростью около  $M \approx 2$  прослеживается до выхода из расчетной области. Взаимодействие с ней высокоскоростного основного потока приводит к появлению структуры, состоящей из двух последовательных ударных волн. За ними основной поток снижает скорость, что несколько компенсирует разгон вследствие расширения нижней стенки основного канала. Можно предположить, что достаточно сложная структура течения в этой области должна способствовать тепло- и массообмену между выхлопной струей щелевого канала и основным потоком.

Интенсивный отрыв перед входом в щелевой канал приводит к существенному росту статической температуры в этой области (с 600 до 1 200 К) в сравнении с основным потоком (рис. 5). Эта температура существенно превышает температуру воспламенения водорода. Поэтому можно утверждать, что тепловой энергии воздушного потока достаточно для самовоспламенения водорода

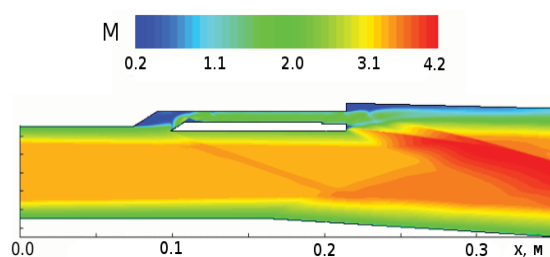


Рис. 4. Поле чисел Маха при  $M_{вх} = 3,7$



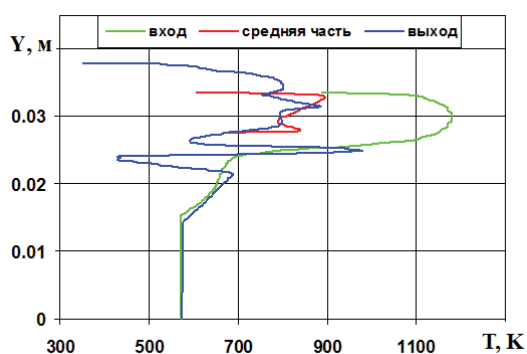


Рис. 5. Статическая температура в трех поперечных сечения щелевого канала при  $M_{вх} = 3,7$

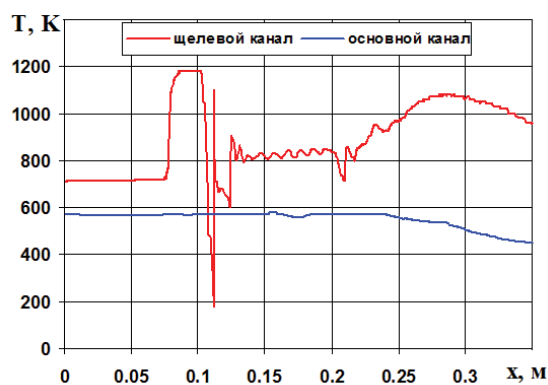


Рис. 6. Распределение статической температуры вдоль канала модели при  $M_{вх} = 3,7$

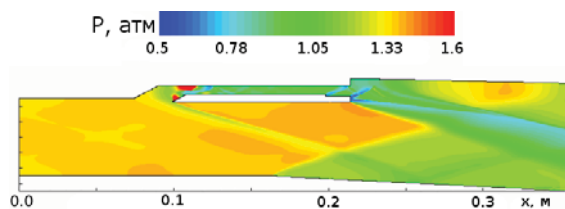


Рис. 7. Поле статического давления при  $M_{вх} = 3,7$

и развития процесса горения с учетом теплоемкости топлива (подача водорода комнатной температуры). С учетом меньшего числа Маха в щелевом канале статическая температура в нем в 1,4 раза превышает температуру в основном канале, достигая уровня примерно 800 К. Можно ожидать, что самовоспламенение водорода будет происходить не только перед входом, но и внутри щелевого канала. Такой уровень статической температуры остается и вихлупной струе щелевого канала за его выходом.

Статическое давление в отрывной области за обратным уступом перед входом щелевого канала несколько снижается по сравнению с уровнем в потоке основного канала. Тем не менее его уровень остается достаточно высоким, чтобы можно было утверждать, что параметры воздушного потока перед входом в щелевой канал при  $M_{вх} = 3,7$  удовлетворяют условиям самовоспламенения водорода. Статическое давление внутри щелевого канала имеет характерное для сверхзвукового течения пилообразное распределение по длине. Уровень давления примерно в два раза ниже, чем в ядре потока основного канала. Этот результат, по всей видимости, вызван достаточно большими потерями полного давления в отрывной зоне за обратным уступом и на входе в щелевой канал.

Расширение вихлупной струи щелевого канала, и ее взаимодействие с потоком основного канала приводит к сложной структуре течения с существенной неравномерностью давления и температуры (рис. 6, 7). Здесь следует обратить внимание на то, что за замыкающим скачком ( $x \sim 0,25$  м) стати-

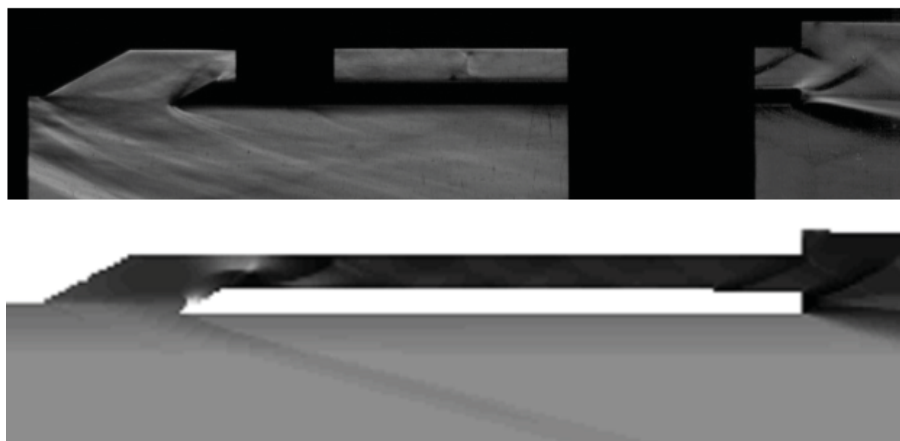


Рис. 8. Теневая и расчетная визуализация поля плотности при  $M_{вх} = 3,7$

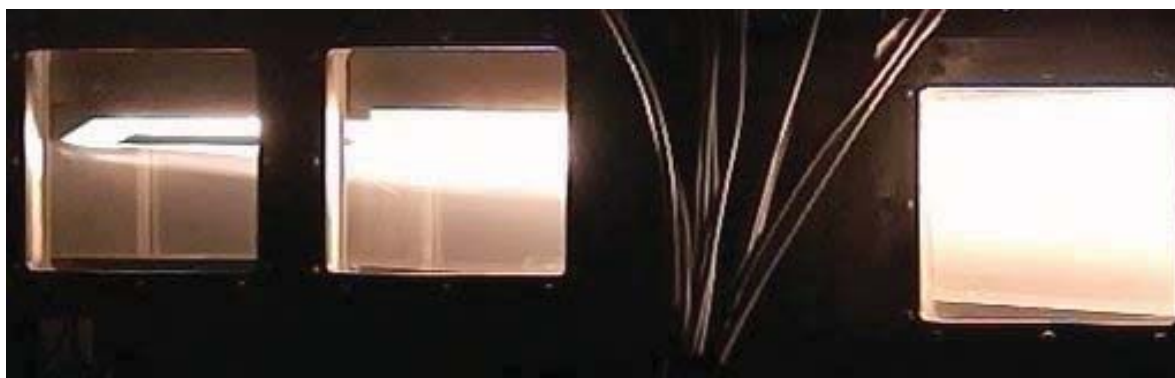


Рис. 9. Горение водорода в эксперименте при  $M_{вх} = 3,7$

ческие параметры (давление и температура) растут вблизи верхней стенки. Так, статическая температура в этой области превышает 1 000 К. При этом статическое давление близко к уровню давления в ядре потока на входе в основной канал.

В результате можно утверждать, что течение перед входом в щелевой канал, на всей его длине и до  $x \sim 0,35$  м реализуется с параметрами, удовлетворяющими условиям самовоспламенения водорода.

Сравнение поля распределения плотности по данным расчетного моделирования с экспериментальными данными теневой визуализации показало (рис. 8), что структура течения на входе и выходе из канала имеет похожую картину расположения ударных волн и волн разрежения в расчетных и экспериментальных исследованиях. Снижение числа Маха в щелевом канале ведет к повышению статической температуры и соответственно к увеличению возможности самовоспламенения водорода. В результате проведенных экспериментальных исследований было установлено, что во всем диапазоне изменения параметров на входе в канал модели реализуется самовоспламенение водорода.

Причем даже при отсутствии дополнительной подачи топлива в щелевом канале реализуется горение за счет того, что часть топлива основной подачи попадает в щелевой канал. При числе Маха  $M_{вх} = 3,7$  наблюдалось достаточно интенсивное горение водорода (рис. 9). Пламя занимало весь щелевой канал. Кроме того, по-видимому, происходил тепло- и массообмен между внутренним и внешним течениями в области обратного уступа перед входом в щеле-

вой канал. На рис. 9 видно, что имеется область горения в основном канале вблизи стенки, отделяющей его от щелевого канала. На выходе из щелевого канала эта область объединяется с горячей выхлопной струей и распространяется по длине основного канала с увеличением своего поперечного размера. На расстоянии примерно 10–12 высот входа в основной канал пламя занимает практически все его поперечное сечение.

Таким образом, предложенная концепция щелевого канала как «теплового генератора» обеспечила самовоспламенение водорода и последующую стабилизацию горения при числе Маха  $M_{вх} = 3,7$  на входе в основной канал.

При увеличении полетного числа Маха растет среднее число Маха на входе в камеру сгорания. Это приводит к уменьшению времени нахождения топлива в тракте двигателя, что требует дополнительных усилий по организации самовоспламенения топлива и стабилизации горения. Поэтому при числе Маха  $M_{вх} = 5,8$  расчеты были выполнены для двух вариантов щелевого канала с геометрическим критическим сечением и без него. Предполагалось, что наличие геометрического горла приведет к снижению скорости потока в щелевом канале (увеличению времени пребывания топлива) и соответствующему увеличению статических параметров в рассматриваемых сечениях.

В варианте без геометрического горла реализуется структура течения, близкая к таковой при числе Маха  $M_{вх} = 3,7$ . В области разворота потока в угловой конфигурации перед входом в щелевой канал образуется обширная рециркуляционная зона. Структура локальных отрывов на внутрен-

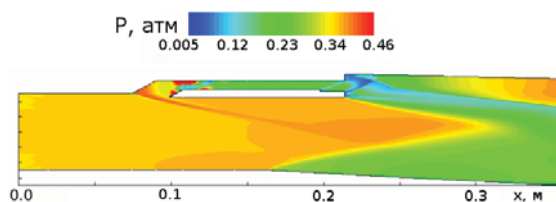


Рис. 10. Поле статического давления ( $M_{вх} = 5,8$ , без геометрического горла)

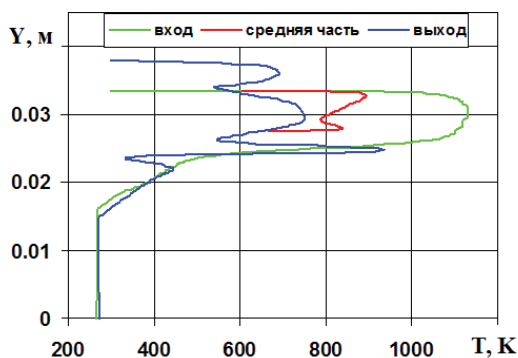


Рис. 11. Статическая температура в трех поперечных сечениях щелевого канал ( $M_{вх} = 5,8$ , без геометрического горла)

них стенках щелевого канала такова, что проходное сечение в области входа изменяется таким образом, что происходит ускорение потока до сверхзвуковой скорости. Поскольку внутренний тракт щелевого канала имеет постоянную площадь поперечного течения, среднее число Маха уменьшается по длине канала примерно от 2,5 до 2,1 за счет нарастания пограничного слоя. Уменьшение числа Маха происходит в системе скачков уплотнения, что подтверждается характерной пилообразной формой распределения статического давления на этом участке щелевого канала. На выходе из щелевого канала характерная «бочка» Маха имеет больший размер, а зоны дозвукового возвратного течения за верхним и нижним донными срезами имеют меньший размер, чем при числе Маха  $M_{вх} = 3,7$ . Выхлопная струя щелевого канала далее по длине основного канала приобретает слоистый характер течения с выраженными переходами по скорости в поперечном сечении. Ударная волна, вызванная взаимодействием основного потока с выхлопной струей щелевого канала, с ростом числа Маха имеет меньший угол наклона. И в сравнении с  $M_{вх} = 3,7$  в области

увеличения поперечного сечения основного канала поток ускоряется более интенсивно.

В целом при общей схожести качественной картины течения для двух чисел Маха следует отметить более интенсивный при  $M_{вх} = 5,8$  скачок уплотнения в области угловой конфигурации перед входом в щелевой канал (рис. 10). Более интенсивный скачок уплотнения возникает вследствие более высокого относительного статического давления в отрывной области на входе в щелевой канал, которое приводит к большему растеканию за переднюю кромку нижней стенки щелевого канала. Соответственно можно предположить, что этот факт будет способствовать смешению топлива (подаваемого в щелевой канал) с воздухом в потоке основного канала, и в область выхлопной струи щелевого канала должна поступать более подготовленная смесь.

Дозвуковой характер течения в области разворота основного потока (рециркуляционная зона перед входом в щелевой канал) приводит к существенному увеличению статической температуры на входе в щелевой канал (рис. 11). С учетом низкой статической температуры при  $M_{вх} = 5,8$  на входе в основной канал наблюдается четырехкратный рост температуры (от 270 до 1130 K). Статическое давление в этой области не ниже, чем в ядре потока. Поэтому следует предположить, что и при  $M_{вх} = 5,8$  в этой области возможно самовоспламенение водорода.

По длине щелевого канала уровень температур ниже. С учетом близких полных температур потока на входе в основной канал при числах Маха  $M_{вх} = 3,7$  и 5,8 абсолютное значение статической температуры во внутреннем тракте щелевого канала в среднем несколько меньше 800 K при  $M_{вх} = 5,8$ . Абсолютное значение статического давления внутри щелевого канала примерно в два раза меньше, чем при числе Маха  $M_{вх} = 3,7$ . Иначе говоря, как и следовало ожидать, с ростом числа Маха на входе в основной канал статические параметры внутреннего течения щелевого канала снижаются. Тем не менее их уровень остается достаточным для возможного самовоспламенения водорода. Непосредственно на выходе щелевого канала статическая температура имеет общий уровень менее 700 K с двумя минимумами в области верхнего и нижнего донного срезов (~ 550 K). За при-



Рис. 12. Горение водорода в эксперименте ( $M_{\text{вх}} = 5,8$ , без геометрического горла)

соединенным скачком уплотнения на дистанции  $x = 0,25-0,35$  м статическая температура снова возрастает и находится в пределах  $800-940$  К в пристенной области, что позволяет говорить об этой зоне, как о возможной области самовоспламенения водорода.

Можно утверждать, что с увеличением числа Маха также на всей длине щелевого канала и за ним на расстоянии до  $x \sim 0,35$  м реализуются условия для самовоспламенения водорода. Кроме области разворота потока за обратным уступом перед входом в щелевой канал, общий уровень статических параметров течения в щелевом канале ниже (особенно давление) в сравнении с  $M_{\text{вх}} = 3,7$ .

Возможность самовоспламенения была проверена в экспериментах с подачей водорода. Было установлено, что в диапазоне изменения полных температур на входе в основной канал ( $1\ 900-2\ 600$  К) происходит самовоспламенение в щелевом канале. Но длительность и интенсивность горения была ниже соответствующих значений при числе Маха  $M_{\text{вх}} = 3,7$ . На рис. 12 можно видеть, что во всей области, рассмотренной в расчетных исследованиях, где предполагались условия для самовоспламенения водорода, наблюдается достаточно интенсивное горение, реализованное при максимальной полной температуре ( $2\ 600$  К) на входе в основной канал. Также видно, что при увеличении числа Маха горение в меньшей степени распространяется в поток основного канала, и пламя занимает меньшую площадь поперечного сечения камеры сгорания в сравнении с  $M_{\text{вх}} = 3,7$ . Тем не менее было получено самовоспламенение водорода при числе Маха  $M_{\text{вх}} = 5,8$  и статической температуре на входе в основной канал существенно ниже температуры самовоспламенения.

В варианте с геометрическим горлом в щелевом канале при числе Маха  $M_{\text{вх}} = 5,8$  численное исследование показало, что канал запирается, и от входа до критического сечения реализуется дозвуковое течение (рис. 13). В щелевом канале давление возрастает в 6 раз (в щелевом канале без критического сечения уменьшается примерно в полтора-два раза) в сравнении с ядром основного потока. Рециркуляционная зона в области разворота потока в угловой конфигурации имеет такую конфигурацию, что образуется веер волн разрежения в первой точке разворота потока, а затем на обечайке щелевого канала – ударная волна. Наличие веера волн приводит к тому, что в этом случае общий уровень статического давления в основном потоке ниже, чем в варианте без геометрического горла.

Тем не менее представляют интерес результаты расчета статической температуры (рис. 14). В области рециркуляционной зоны в угловой конфигурации перед входом в щелевой канал температура достигает значения  $1\ 400$  К, внутри щелевого канала  $1\ 500$  К. Непосредственно на выходе из щелевого канала с геометрическим горлом статическая температура более резко снижается по сравнению с вариантом без геометрического горла как относительно внутриканального значения, так и в абсолютных значениях.

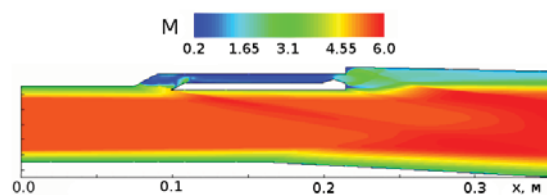


Рис. 13. Поле чисел Маха ( $M_{\text{вх}} = 5,8$ , с геометрическим горлом)



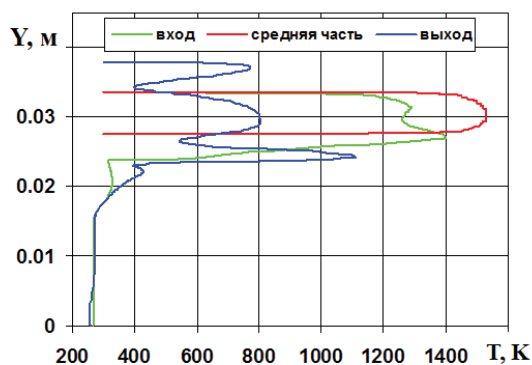


Рис. 14. Статическая температура в трех поперечных сечениях щелевого канала ( $M_{вх} = 5,8$ , с геометрическим горлом)

Далее на дистанции  $x = 0,25-0,35$  м статическая температура растет до уровня примерно 900–960 К. Причем на расстоянии  $x = 0,35$  статическая температура для варианта с геометрическим горлом выше на 100 К варианта без геометрического горла. Существенная разница распределения статической температуры по длине щелевого канала для этих двух вариантов предопределила разный характер воспламенения и развития горения в экспериментальных исследованиях.

По формальным признакам – наличие высоких статических параметров (температуры и давления) – можно было предположить возможность самовоспламенения водорода при числе Маха  $M_{вх} = 5,8$  с геометрическим критическим сечением в щелевом канале. Проверка этого предположения в эксперименте показала (рис. 15), что воспламенение водорода происходило, и горение даже распространялось в основной

поток. Вместе с тем видно, что щелевой канал заперт, и горение на выходе из него отсутствует. Горение в основном канале развивается со стороны щелевого канала вблизи стенки, их разделяющей. По видимому, водород воспламеняется в зоне с высокими статическими параметрами (область за обратным уступом перед входом в щелевой канал), и, поскольку щелевой канал заперт, высокое местное давление «выбрасывает» продукты сгорания в основной поток. Последующая стабилизация происходит в области присоединенной ударной волны за щелевым каналом. На расстоянии 5–6 высот входа в основной канал пламя занимает даже большую площадь поперечного сечения, чем в варианте без геометрического горла. Но при этом общая интенсивность горения заметно меньше.

Полученные экспериментальные данные при числе Маха  $M_{вх} = 5,8$  подтверждают возможность использования щелевого канала предложенной схемы для обеспечения самовоспламенения водорода и стабилизации горения.

### Выводы

Численное моделирование течения в канале камеры сгорания показало, что в щелевом канале происходит торможение воздушного потока и наблюдается существенное повышение статической температуры и тепловых потоков.

В зависимости от наличия или отсутствия геометрического критического сечения в щелевом канале реализуется сверхзвуковое или дозвуковое течение. В обоих случаях повышение температуры совместно с достаточно высоким уровнем статического



Рис. 15. Горение водорода в эксперименте ( $M_{вх} = 5,8$ , с геометрическим горлом)

давления приводит к самовоспламенению топлива в щелевом канале и распространению горения в ядро потока основного канала, что подтверждается экспериментальными результатами.

Механизм стабилизации в этих двух случаях различен. В первом случае реализуется горячая струя продуктов сгорания из сопла щелевого канала, которая приводит к распространению горения в основной канал за областью ударной волны. Во втором случае запыряние щелевого канала приводит к выбросу продуктов сгорания на его входе. В результате тепло- и массообмен между основным и щелевым потоками интенсифицируется и последующая стабилизация горения начинается в области присоединенной ударной волны за рециркуляционной зоной и за входом щелевого канала.

### Список литературы

1. Аннушкин Ю. М., Маслов Г. Ф. Исследование диффузионного горения высокоэнергетических газовых топлив в турбулентном спутном и встречном воздушном потоке // Физика горения и взрыва. 1980. Т. 16, № 1. С. 26–36.
2. Billig F. S., Dugger G. L., Orthwert R. C., Waltrup P. J. Direct-connect test of hydrogen-fueled supersonic combustors // Sixteenth Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute. Pittsburgh, 1976. P. 1619–1629.
3. Баев В. К., Головичев В. И., Третьяков П. К., Гаранин А. Ф., Константиновский В. А., Ясаков В. А. Горение в сверхзвуковом потоке. Новосибирск: Наука, 1984.
4. Davis D. L., Bowersox R. D. W. Stirred Reactor Analysis of Cavity Flame-Holders for Scramjets // AIAA-97-3274. 1997.
5. Vinogradov V. A., Shikhman Y. M., Albegov R. V., Vedeshkin G. K. About possibility of

effective methane combustion in high speed airflow // AIAA-02-5206. 2002.

6. Сабельников В. А., Иванюшкин А. К., Коронцевит Ю. Ф. и др. Экспериментальное исследование стабилизации горения в сверхзвуковом потоке с использованием свободных рециркуляционных зон // Фундаментальные и прикладные проблемы космонавтики. 2000. № 2. С. 27–32.

7. Northam G. B., Byington C. S., Greenberg I. Evaluation of parallel injector configurations for supersonic combustion // AIAA-89-2525. 1989.

8. Gruber M. R., Baurle R. A., Mathur T., Hsu K.-Y. Fundamental studies of cavity-based flammability concepts for supersonic combustors // Journal of Propulsion and Power. 2001. № 17, P. 146–153.

9. Bogdanoff D. W. Advanced injection and mixing techniques for scramjet combustor // Journal of Propulsion and Power. 1994. № 2. P. 183–190.

10. Seiner J. M., Dash S. M., Kenzakowski D. C. Historical survey on enhanced mixing in scramjet engines // Journal of Propulsion and Power. 2001. № 6. P. 1273–1286.

11. Виноградов В. А., Гольдфельд М. А., Старов А. В. Исследование воспламенения и горения водорода в канале при высоких сверхзвуковых скоростях потока на входе в канал // Физика горения и взрыва. 2013. Т. 49, № 4. С. 3–11.

12. ANSYS Academic Research CFD. Custom number № 531496.

13. Menter F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering application // AIAA Journal. 1994. № 8. P. 1598–1605.

14. Liou M.-S., Steffen C. J. A new flux splitting scheme // J. Comp. Phys. 1993. № 107. P. 23–39.

Материал поступил в редколлегию 13.11.2015

**M. A. Goldfeld, Yu. V. Zakharova, A. V. Starov, K. Yu. Timofeev**

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

*starov@itam.nsc.ru*

### SLOTTED CHANNEL AS A GASDYNAMICAL SOURCE OF IGNITION AND FLAME STABILIZATION IN THE SUPERSONIC COMBUSTION CHAMBER

The original scheme of flame stabilization in the channel at close to cocurrent fuel supply for the fuel combustion at a high supersonic speed has been designed. Such solution provides high tem-

perature of a stream in a zone of fuel-air mixture formation. Computational and experimental investigations of self-ignition and combustion of hydrogen were carried out in the model of combustor chamber with slotted channel (gasdynamical source of ignition) at Mach numbers 3.7 and 5.8 at the entrance. Tests have been performed in hot-shot wind tunnel IT-302M of ITAM SB RAS in a mode of the attached pipe. Numerical study has been performed on the basis of solving the full averaged Navier-Stokes equations, supplemented  $k-\omega$  SST turbulence model. Configuration of the slotted channel has been designed with two variants of exit nozzle: with and without geometrical throat. It has been established that at the channel entrance two vortexes with high temperature have been appeared. Temperature has been keeping high in the channel with geometrical throat and at blocking of the slotted channel without throat. It was found that uniform subsonic stream in the channel with geometrical throat has been realized. The stream in the slotted channel without geometrical throat keeps supersonic but Mach number was lower than in the main channel. The structure of the flow at the slotted channel exit is significantly differs for this both cases.

*Keywords:* supersonic speed, channel, self-ignition, flame stabilization