

УДК 533.6.011.5

ДЕТОНАЦИОННОЕ ГОРЕНИЕ ВОДОРОДА В ОСЕСИММЕТРИЧНОМ КАНАЛЕ С ЦЕНТРАЛЬНЫМ ТЕЛОМ

Ю. В. Туник

Научно-исследовательский институт механики Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, 119192 Москва, Россия
E-mail: tunik@imec.msu.ru

Решается задача инициирования и стабилизации детонационного горения водородно-воздушной смеси, поступающей в осесимметричный канал с центральным телом конечной длины в потоке с числом Маха $M_0 = 5 \div 9$. Численно показано, что наличие центрального тела как в конвергентно-дивергентном сопле, так и в расширяющемся канале обеспечивает стабилизацию детонационного горения стехиометрической водородно-воздушной смеси при числах Маха набегающего потока $M_0 > 7$. Проведено сравнение различных конфигураций канала в зависимости от величины тяги, возникающей в результате детонационного горения стехиометрической водородно-воздушной смеси.

Ключевые слова: конвергентно-дивергентное сопло, сверхзвуковой поток, водородно-воздушная смесь, детонационное горение.

DOI: 10.15372/PMTF20160601

Введение. В работе [1] исследована возможность стабилизации детонационного горения водородно-воздушной смеси, поступающей с большой сверхзвуковой скоростью в осесимметричное конвергентно-дивергентное сопло с коаксиально расположенным внутренним цилиндром при числе Маха набегающего потока $M_0 = 7$. Установлено, что торможение потока в сужающейся части канала (диффузоре) приводит к уменьшению потерь полного давления в зоне горения [2]. Сходящийся к оси симметрии поток формирует область с большими значениями температуры и давления, что способствует инициированию детонационного горения. При наличии дивергентной части сопла горение стабилизируется. В осесимметричном сопле без центрального тела при втекании в него высокоскоростного сверхзвукового потока вблизи оси симметрии формируется диск Маха [3], за которым происходит спонтанное воспламенение водородно-воздушной смеси, что приводит к выходу волны детонационного горения в конвергентную часть канала при $M_0 \leq 7$ [1]. Наличие центрального цилиндра обеспечивает регулярное отражение наклонной ударной волны, возникающей в диффузоре, предотвращая тем самым спонтанное воспламенение водорода.

В настоящей работе численно исследуется возможность инициирования стационарного детонационного горения стехиометрической водородно-воздушной смеси в осесимметричном канале с центральным телом, имеющим конфигурацию конус — цилиндр — конус или цилиндр — конус в диапазоне значений числа Маха набегающего потока воздуха $M_0 = 5 \div 9$.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 13-08-00440а).

© Туник Ю. В., 2016

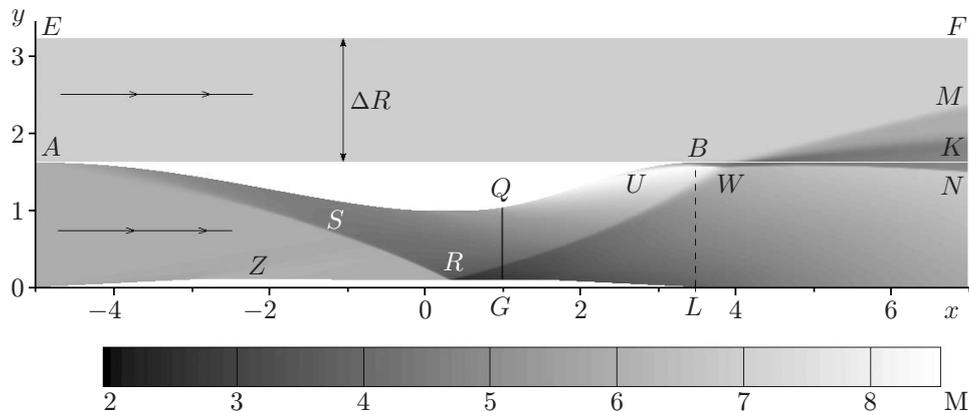


Рис. 1. Распределение числа Маха во внешнем потоке воздуха и в потоке водородно-воздушной смеси в полости сопла с центральным телом конус — цилиндр — конус до воспламенения ($M_0 = 7$)

1. Постановка задачи и метод решения. Движение газа исследуется на основе двумерных уравнений Эйлера для осесимметричного течения многокомпонентной реагирующей смеси [1]. Химические процессы, происходящие при горении водорода, детально описывает кинетическая модель [4], которая включает 9 компонентов, участвующих в 33 неравновесных обратимых реакциях. Теплоемкость и энтальпия смеси рассчитываются по приведенной энергии Гиббса газовых компонентов [5].

Сужающийся участок сопла расположен в интервале $-5 \leq x < 0$, расширяющийся — в интервале $0,5 \leq x < 3,5$ (рис. 1). Между ними имеется цилиндрический участок длиной 0,5 (длины и расстояния отнесены к радиусу минимального сечения сопла r_0). В расчетах с учетом химических реакций $r_0 = 10$ см. Расширение конвергентной и дивергентной секций сопла задается числами Маха M_1 и M_2 соответственно, с учетом того что число Маха в минимальном сечении равно единице при показателе адиабаты, равном 1,4. Во всех расчетах полагалось $M_2 = 2,5$. В случае конвергентно-дивергентного сопла считается, что $M_1 = M_2$. При этом радиусы сечения на входе и выходе равны: $R_1 = R_2 \approx 1,63$. Касательные к контуру сопла во входном и выходном сечениях параллельны оси симметрии. Образующие диффузора и расширяющегося участка гладко сопрягаются с цилиндрическим участком канала. Их форма задается функцией \sin с показателем степени $\alpha > 1$, при этом контур сужающейся части имеет перегиб в точке с абсциссой $x = -2$, а расширяющейся — в точке с абсциссой $x = 2$. Сопловый канал встроен во внешнее цилиндрическое тело с образующей AB (см. рис. 1).

Расчетная область включает области внутреннего и внешнего течений. Ее верхняя граница задается прямой EF , которая параллельна образующей AB и смещена от нее по вертикали на расстояние ΔR (см. рис. 1). Нижняя граница совпадает с осью симметрии сопла и поверхностью центрального тела. Слева расчетная область ограничена вертикальной прямой $x = -5$, совпадающей с входным сечением. Правая граница задается прямой $x = 7$. Прямая AB и контур сопла разбивают расчетную область на две части: верхнюю и нижнюю.

Начальное распределение параметров как внутреннего, так и внешнего течения определяется в результате решения задачи о сверхзвуковом запуске сопла с учетом взаимодействия потоков за его срезом BL [1]. Во внутренней полости сопла реализуется стационарное сверхзвуковое течение с регулярным отражением наклонной ударной волны SR от центрального тела (см. рис. 1). За срезом сопла BL возникает сложная картина взаимодействия внешнего воздушного потока с истекающей из сопла водородно-воздушной сме-

стью. Отраженная волна RW пересекается с пристенной ударной волной UW , в результате чего формируются ударные волны WM , WN и поверхность контактного разрыва WK . В действительности эта контактная поверхность является двухслойной. Она образована линиями тока, проходящими через комбинации трех ударных волн: UW , WM и WN .

После запуска сопла начиная с момента времени $t = 0$ в канал втекает водородно-воздушная смесь, а вне его движется воздушный поток. Оба потока направлены параллельно оси симметрии и имеют одинаковые скорости, давление p_0 и температуру T_0 . При этом число Маха M_0 и плотность набегающего воздушного потока ρ_0 больше, чем в потоке водородно-воздушной смеси. На правой границе расчетной области в точках поперечного сечения, где число Маха меньше единицы, задается давление p_0 . На поверхности внешнего и центрального тел, а также на стенке сопла и оси симметрии ($y = 0$) ставятся условия непротекания. Верхней границей расчетной области является прямая EF , на которую сносятся параметры из этой области. В расчетах использовались следующие значения параметров набегающего потока: $p_0 = 0,101\ 325$ МПа, $T_0 = 300$ К, $\rho_0 = 1,172$ кг/м³.

Задача решается численно с использованием конечно-разностной схемы Годунова первого порядка точности [6], адаптированной для расчета течений газа при наличии неравновесных химических реакций [7]. Используется фиксированная расчетная сетка, полученная путем разбиения области вертикальными прямыми и ломаными линиями в продольном направлении. В нижней части расчетной области отрезки вертикальных прямых разбиты на N равных ячеек ($N \geq 180$), в верхней части все ячейки имеют вертикальный размер $\Delta Y = R_1/N$, равный размеру ячеек на входе в канал. Расстояние Δx между вертикальными прямыми, образующими расчетную сетку, увеличивается по мере удаления от минимального сечения пропорционально радиусу соплового канала. В минимальном сечении $\Delta x = 1/N$. В установившемся потоке относительная погрешность расчетов полной энтальпии составляет приблизительно 1 %, погрешность расчетов расхода газа не превышает 0,5 %.

Расчеты проводятся с использованием суперкомпьютера “Ломоносов”.

2. Сопло с центральным телом конус — цилиндр — конус. В расчетах [1] установившееся детонационное горение стехиометрической водородно-воздушной смеси получено для сопла с внутренним цилиндром, наличие которого предотвращает образование диска Маха, дестабилизирующего детонационное горение. В данном пункте в качестве центрального тела рассматривается цилиндр конечной длины с двумя присоединенными к нему конусами (см. рис. 1). При обтекании центрального тела сверхзвуковым потоком первый конус обеспечивает формирование наклонной ударной волны, что предотвращает спонтанное воспламенение водорода, второй конус способствует расширению продуктов детонационного горения. На рис. 1 показана структура течения в сопле с центральным телом конус — цилиндр — конус, установившегося после замещения воздуха водородно-воздушной смесью, при $M_0 = 7$. Абсцисса носка центрального тела $x_0 = -5$, длина головного и хвостового конусов $L_h = L_b = 2$, длина цилиндра $L_{cyl} = 4,5$, радиус $r_{cyl} = 0,1$. В отличие от случая неограниченного коаксиального цилиндра [1] в конвергентной части сопла появляются присоединенная к головному конусу ударная волна Z и веер волны разрежения. Однако в данном случае ее влияние на взаимодействие наклонной ударной волны SR с центральным телом незначительно. Самовоспламенения смеси за отраженной ударной волной не происходит.

Детонационное горение инициируется подводом энергии E_0 . В расчетах предполагается, что в узкой области QG (см. рис. 1), расположенной за точкой отражения R , мгновенно увеличиваются давление и температура при постоянной плотности и неизменном составе газа. Если температура превышает 3900 К, то в области QG , как и в любой другой области течения, рассчитываются равновесные значения температуры, давления и массовые

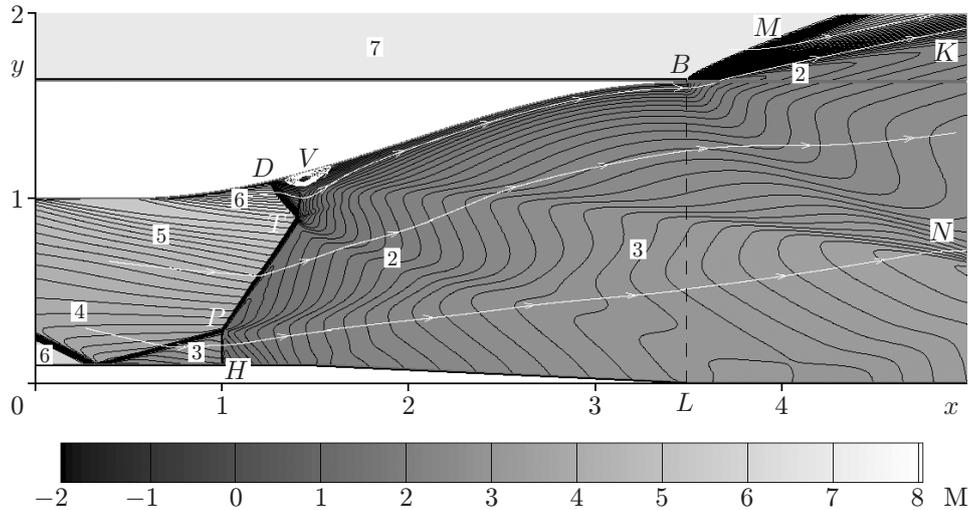


Рис. 2. Распределение числа Маха в установившемся потоке в сопле с центральным телом конус — цилиндр — конус при $M_0 = 7$, $E_0 = 50$ Дж

доли компонентов газа. Иницирование горения приводит к формированию за головным фронтом детонационного горения *ДТРН* стационарного течения со сложной структурой, включающей ударные волны и контактные разрывы (рис. 2). Как и в случае неограниченного центрального цилиндра [1], вблизи стенки сопла формируется вихревая область *V* с высокой температурой. За срезом сопла *BL* взаимодействие продуктов детонационного горения с внешним воздушным потоком происходит с образованием контактного разрыва *BK* и ударных волн *VM* и *VN*. При этом тяга выходит на постоянное значение (кривая 1 на рис. 3,а).

При $M_0 = 9$ интенсивность отраженной ударной волны оказывается достаточной для иницирования детонационного горения стехиометрической водородно-воздушной смеси в сопле с рассматриваемым центральным телом. Точка *R*, в которой отражается наклонная ударная волна, смещается в дивергентную часть сопла, что способствует расширению продуктов детонационного горения и как следствие его стабилизации. При этом тяга отсутствует, поскольку область горения оказывает влияние только на небольшой, практически горизонтальный участок стенки вблизи выхода. Тяга отсутствует и в случае принудительного иницирования детонационного горения (кривая 2 на рис. 3,а).

Следует отметить, что на практике “мгновенное” иницирование означает использование источника энергии, мощность которого порядка нескольких десятков мегаватт. При этом возникает проблема оптимизации подвода энергии, иницирующего детонационное горение в сопле с центральным телом конус — цилиндр — конус.

3. Сопло с центральным телом цилиндр — конус. При использовании центрального тела цилиндр — конус иницирование детонации происходит в результате воспламенения газа за отошедшей ударной волной перед торцом. Подобное иницирование стационарной детонации, заполняющей сечение канала, реализовано в экспериментах [8] при полете цилиндрического тела со сферическим затуплением в стехиометрической водородно-воздушной смеси со скоростью, превышающей скорость детонации Чепмена — Жуге. В [9] экспериментально показано, что кинетическая энергия потока может быть использована для иницирования детонации в метановоздушных смесях в канале постоянного сечения при взаимодействии падающей ударной волны с центральным телом сложной формы.

Однако воспламенение за ударной волной не гарантирует стабилизацию детонационного горения в каналах переменного сечения. Так, в осесимметричном конвективно-дивергентном сопле без центрального тела в потоке формируется диск Маха, за кото-

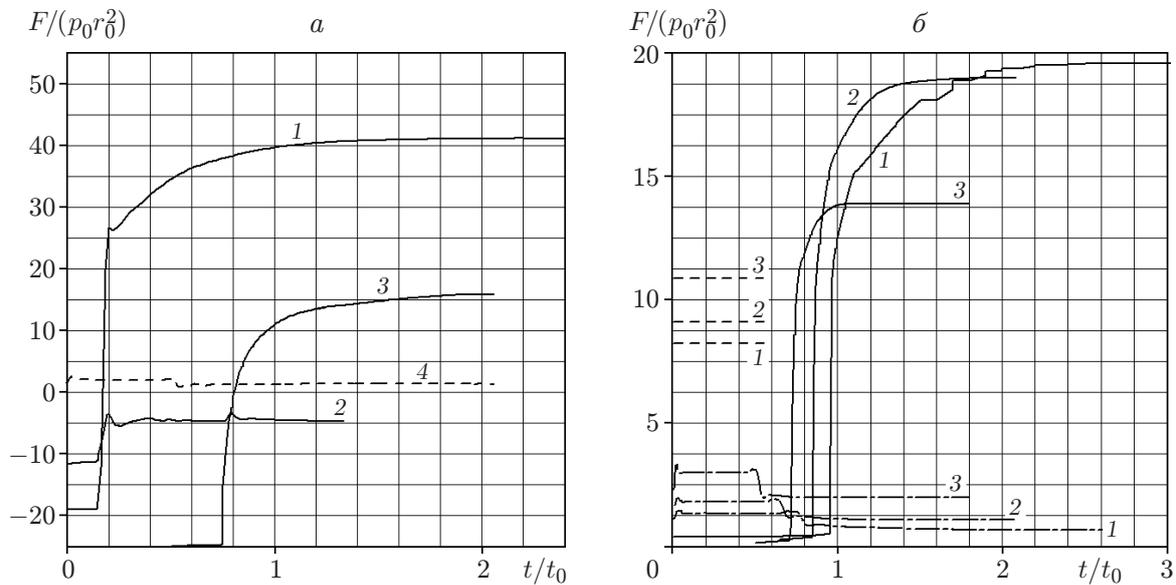


Рис. 3. Зависимости тяги (сплошные линии), аэродинамического сопротивления внешнего (штриховые) и центрального (штрихпунктирные линии) тел от времени в процессе стабилизации детонационного горения:

a — в сопле (1, 2 — с центральным телом конус — цилиндр — конус (1 — $M_0 = 7$, 2 — $M_0 = 9$), 3, 4 — с центральным телом цилиндр — конус при $M_0 = 9$), *б* — в расширяющемся канале с центральным телом цилиндр — конус (1 — $M_0 = 6$, 2 — $M_0 = 7$, 3 — $M_0 = 9$)

рым при $M_0 = 7$ происходит воспламенение стехиометрической водородно-воздушной смеси. Иницируемая таким образом волна детонационного горения оказывается пересжатой вследствие наличия сходящегося в конвергентной части потока. Поэтому, несмотря на то что число Маха в потоке больше числа Маха детонации Чепмена — Жуге в стехиометрической водородно-воздушной смеси, детонационное горение выходит в диффузор [1]. Такой же процесс происходит и в сопле с центральным телом цилиндр — конус. Волна детонационного горения выходит в конвергентную часть сопла, когда поток воспламеняющейся смеси начинает взаимодействовать с центральным телом как за точкой формирования диска Маха, так и перед ней (рис. 4). Таким образом, при использовании рассматриваемого сопла с центральным телом цилиндр — конус стабилизации детонационного горения стехиометрической водородно-воздушной смеси при $M_0 \leq 7$ не происходит.

При $M_0 = 9$ самовоспламенение водорода за ударной волной перед торцом центрального тела приводит к стабилизации детонационного горения (рис. 5). В областях дозвукового течения за ударной волной DT вблизи стенки сопла и за отошедшей ударной волной PH вблизи поверхности центрального тела формируются вихревые структуры. Контактный разрыв PK отделяет продукты горения, образовавшиеся за отошедшей ударной волной PH , от газа, прошедшего через наклонный фронт TP . Ударная волна W , идущая из вихревой области, вызывает увеличение давления вблизи стенки сопла и тем самым способствует появлению тяги (кривая 3 на рис. 3, *a*). При этом аэродинамическое сопротивление центрального тела цилиндр — конус не превышает 4,5 % полученного значения тяги (кривая 4 на рис. 3, *a*).

В рассматриваемом случае вертикальный отрезок, продолжающий торцевую стенку, является границей двух подобластей расчетной сетки с различным числом ячеек в направлении оси Y . Над центральным телом их меньше на то количество, которое размещается вдоль радиуса цилиндрического участка центрального тела r_{cyl} .

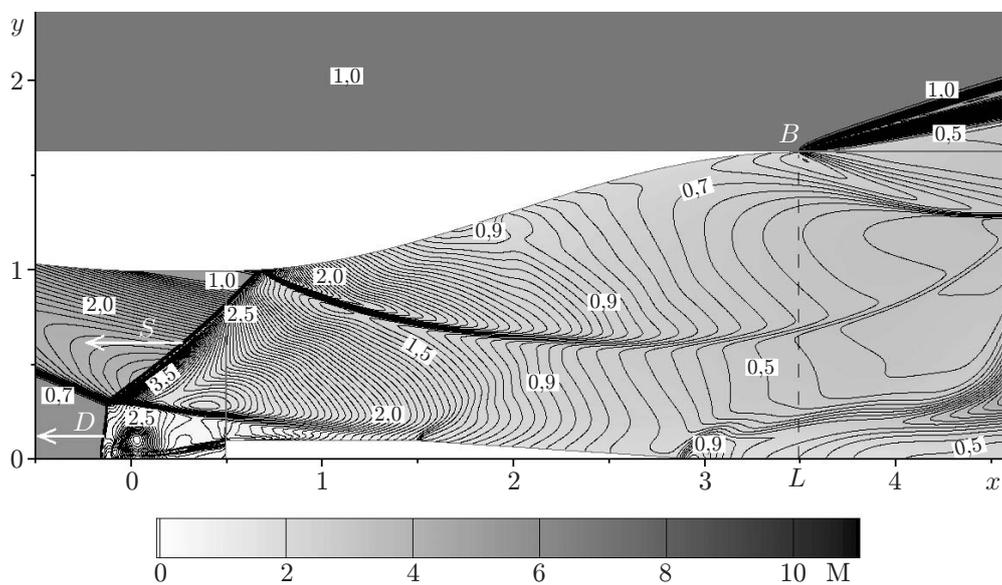


Рис. 4. Изолинии плотности ρ/ρ_0 и распределение числа Маха в сопле с центральным телом цилиндр — конус при $M_0 = 7$

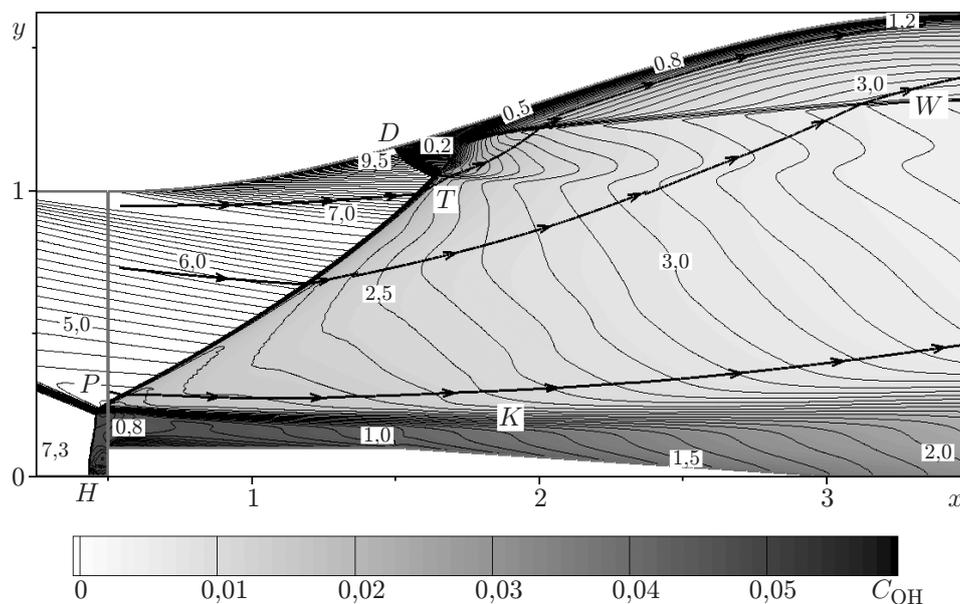


Рис. 5. Линии тока, линии постоянных значений числа Маха и распределение массовой доли C_{OH} в сопле с центральным телом цилиндр — конус при $M_0 = 9$

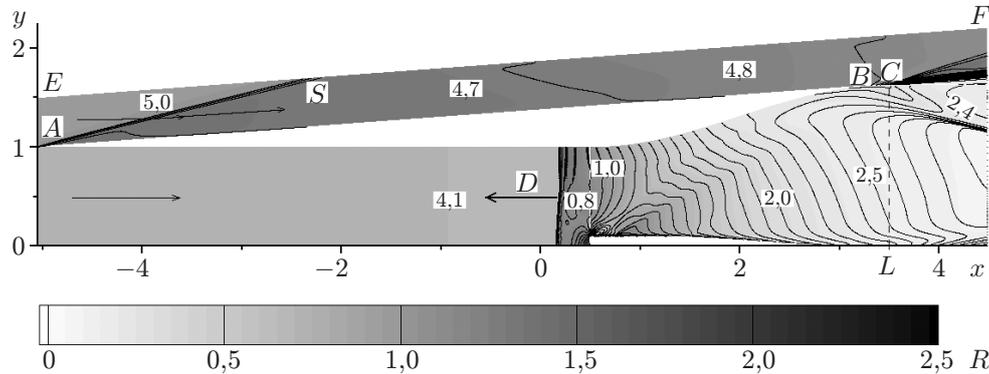


Рис. 6. Линии постоянных значений числа Маха и распределение плотности газа ρ/ρ_A в расширяющемся канале с центральным телом цилиндр — конус при $M_0 = 5$, $M_1 = 1$, $M_2 = 2,5$

4. Расширяющийся канал с центральным телом цилиндр — конус. Для расширяющегося канала с центральным телом цилиндр — конус сходящийся поток, способствующий формированию пересжатой детонации, отсутствует (рис. 6). Возникают более благоприятные условия для стабилизации детонационного горения при $M_0 \leq 7$.

Расчет параметров внутреннего течения можно проводить без учета наличия цилиндрического участка. Однако, как показано в [1], в этом случае невозможно корректно описать взаимодействие истекающего газа с внешним потоком, а значит, и процесс стабилизации детонационного горения в канале. В расчетах считалось, что длина цилиндрического участка равна длине сужающейся части рассмотренного выше конвергентно-дивергентного сопла. Положение центрального тела цилиндр — конус относительно дивергентного участка канала не меняется. При такой форме канала внешнее тело состоит из двух гладко сопряженных частей: усеченного осесимметричного конуса с наклонной образующей AB и короткого участка расширяющегося сопла BC (см. рис. 6). Внешняя граница расчетной области задается прямой EF , параллельной образующей AB . Нижняя часть расчетной области остается без изменений, но разделяется на две подобласти прямой, проходящей через торец центрального тела.

В отличие от процесса обтекания осесимметричного конуса бесконечной длины [10] обтекание рассматриваемого внешнего тела набегающим гиперзвуковым потоком не может быть описано автомодельным решением, поскольку, в частности, в число определяющих параметров входит радиус начального сечения R_1 . Во внешнем течении к передней кромке диффузора присоединяется слабоискривленная ударная волна AS (см. рис. 6), а к участку BC примыкает волна разрежения.

При $M_0 = 5$ число Маха в набегающем потоке стехиометрической водородно-воздушной смеси равно $M = 4,1$. Число Маха детонации Чепмена — Жуге $M_d \approx 4,9$. Как следствие волна детонационного горения, формирующаяся в результате воспламенения газа вблизи торца центрального тела, движется вверх по потоку. В этом случае возникновение тяги, превышающей аэродинамическое сопротивление внешнего тела, возможно только до момента выхода детонации из канала.

При $M_0 \geq 6$ значение числа Маха в потоке водородно-воздушной смеси превышает 4,9. Волна детонационного горения не движется вверх по потоку, а воспламенение газа перед торцом центрального тела предотвращает вынос ударного фронта DH (рис. 7) и как следствие всей области детонационного горения за пределы сопла. Детонационное горение стабилизируется.

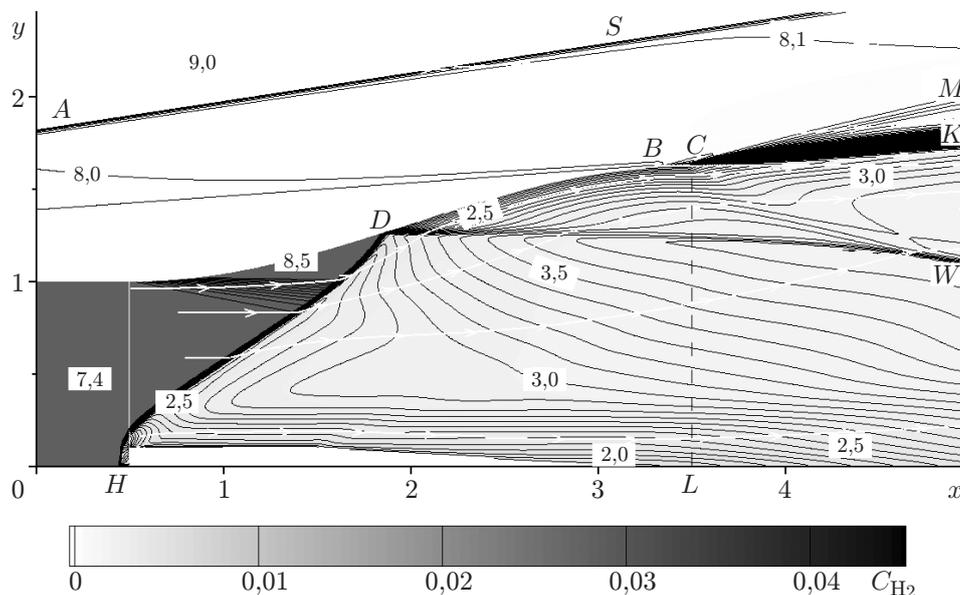


Рис. 7. Линии тока, линии постоянных значений числа Маха и распределение массовой доли водорода C_{H_2} в расширяющемся канале с центральным телом цилиндр — конус при $M_0 = 9$

С увеличением M_0 точка D смещается к выходу из сопла, что приводит к уменьшению длины участка стенки, на который оказывает влияние детонационное горение. Кроме того, при наличии экзотермических реакций горения с ростом M_0 потери полного давления увеличиваются (см., например, [2]). В результате тяга уменьшается, аэродинамическое сопротивление как внешнего, так и центрального тела увеличивается, эффективность горения снижается (см. рис. 3,б). Однако тяга в расширяющемся канале с центральным телом цилиндр — конус сравнима с тягой в конвергентно-дивергентном сопле при $M_0 = 9$ (см. рис. 3).

Следует отметить, что для рассматриваемой конфигурации канала уменьшение длины участка с постоянным сечением приводит к уменьшению эффективности работы камеры сгорания вследствие увеличения аэродинамического сопротивления внешнего тела в гиперзвуковом потоке.

Заключение. Таким образом, в работе показано, что наличие центрального тела как в конвергентно-дивергентном сопле, так и в расширяющемся канале обеспечивает стабилизацию детонационного горения стехиометрической водородно-воздушной смеси при числах Маха набегающего потока $M_0 \geq 7$. В сопле при $M_0 = 7$ необходимо использовать центральное тело конус — цилиндр — конус и обеспечить инициирование детонационного горения, а при $M_0 = 9$ эффективным оказывается воспламенение за ударной волной перед центральным телом конус — цилиндр.

При $M_0 = 6, 7$ использование расширяющегося канала с центральным телом цилиндр — конус оказывается более предпочтительным по сравнению с конвергентным соплом. С увеличением числа Маха набегающего потока эффективность детонационного горения стехиометрической водородно-воздушной смеси снижается: уменьшается тяга, увеличивается аэродинамическое сопротивление внешнего тела. При $M_0 = 9$ значения тяги в расширяющемся канале и конвергентно-дивергентном сопле сопоставимы, но в рассматриваемой геометрии в случае использования сопла внешнее тело не имеет аэродинамического сопротивления.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Туник Ю. В.** Детонационное горение водорода в сопле Лавалья с центральным коаксиальным цилиндром // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2014. № 5. С. 142–148.
2. **Седов Л. И.** Механика сплошной среды: В 2 т. М.: Наука, 1970. Т. 2.
3. **Зубин М. А., Туник Ю. В.** Запуск осесимметричного сопла Лавалья в гиперзвуковом потоке // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2014. № 4. С. 155–160.
4. **Азатян В. В., Андрианова З. С., Иванова А. Н.** Моделирование ингибирования распространения пламени в водородовоздушной среде // Кинетика и катализ. 2010. Т. 51, № 4. С. 483–491.
5. **Гурвич Л. В.** Термодинамические свойства индивидуальных веществ: Справ.: В 4 т. / Л. В. Гурвич, И. В. Вейц, В. А. Медведев и др. М.: Наука, 1978. Т. 1, кн. 2.
6. **Годунов С. К.** Численное решение многомерных задач газовой динамики / С. К. Годунов, А. В. Забродин, М. Я. Иванов и др. М.: Наука, 1976.
7. **Туник Ю. В.** Стабилизация детонационного горения в высокоскоростном потоке водород-кислородной смеси // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2008. № 6. С. 130–135.
8. **Черный Г. Г., Чернявский С. Ю., Баулин Н. Н.** Движение с большой скоростью тел в смеси водорода с воздухом // Докл. АН СССР. 1986. Т. 290, № 1. С. 44–47.
9. **Фролов С. М., Шамшин И. О., Медведев С. Н., Дубровский А. В.** Инициирование детонации в трубе с профилированным центральным телом // Докл. АН. 2011. Т. 438, № 5. С. 1–4.
10. **Черный Г. Г.** Газовая динамика. М.: Наука, 1988.

Поступила в редакцию 15/1 2015 г.
