

УДК 533.6.011.5

ДЕТОНАЦИОННОЕ ГОРЕНИЕ РАЗРЕЖЕННОЙ МЕТАНОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В СОПЛЕ ЛАВАЛЯ

© 2011 г.

Ю.В. Туник

НИИ механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

tunik@imec.msu.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

Рассматривается детонационное горение водородовоздушной смеси, поступающей в осесимметричное конвергентно-дивергентное сопло со сверхзвуковой скоростью в условиях полета на малых и больших высотах. Исследования проводятся на базе двумерных газодинамических уравнений Эйлера для многокомпонентного реагирующего газа. Используется детальная модель химических превращений. Численно показана возможность стационарного детонационного горения водорода в расширяющейся части канала. Полученные режимы детонационного горения устойчивы по отношению к периодическим возмущениям концентрации водорода в набегающем потоке.

Ключевые слова: водородовоздушная смесь, сверхзвуковой поток, детонационное горение, неравновесные химические превращения, детальная кинетика, многокомпонентный газ, сопло Лавалья, стабильный режим, уравнения Эйлера.

Исследуется детонационное горение (ДГ) водородовоздушных смесей, поступающих со сверхзвуковой скоростью в осесимметричное сопло Лавалья, которое состоит из цилиндра на входе и цилиндра минимального радиуса, соединяющего конвергентную и дивергентную части канала. Расширение сужающегося участка рассчитано на число Маха $M_1 = 2.5$, дивергентного – на $M_2 = 5$. Радиус минимального цилиндра $r_0 = 10$ см. Длина входной цилиндрической части и цилиндра минимального радиуса равна r_0 , протяженность сужающегося участка $5r_0$, а расширяющегося – $13r_0$. Контур каждого из участков переменного сечения задается соответствующей синусоидой.

Постановка задачи и метод решения

В основе математической модели лежат двумерные газодинамические уравнения Эйлера для многокомпонентного реагирующего газа. Энтальпия каждого компонента рассчитывается с использованием аппроксимации соответствующей функции Гиббса из [1]. Кинетическая модель химических превращений включает в себя десять компонентов: H_2 , O_2 , O_3 , OH , HO_2 , H_2O , H_2O_2 , H , O , N_2 , участвующих в общей сложности в 116 обратимых химических реакциях.

При исследовании стационарного ДГ мо-

лярная доля водорода в набегающем потоке является постоянной на входе в сопло величиной и определяется коэффициентом избытка водорода ϕ : $\xi_e = 0.42\phi / (1 + 0.42\phi)$. Воспламенение моделируется импульсным подводом энергии в расчетную ячейку с максимальной температурой у оси симметрии при постоянной плотности газа.

В задаче об устойчивости ДГ возмущения молярной доли водорода на входе в сопло Δx задаются в виде бегущей волны $\Delta x / \xi_e = A \sin \{2\pi(ky/R_1 - \omega t)\}$. Здесь t – время, A – амплитуда, ω – частота возмущений, k – число длин волн на радиусе R_1 входного сечения. В частном случае при $k = 0$ возмущения в виде бегущей поперек потока волны вырождаются в продольные.

Давление, температура и скорость поступающего в камеру газового потока равны давлению p_0 , температуре T_0 и скорости набегающего воздушного потока, которая задается числом Маха M_0 до подмешивания водорода.

Задача решается численно методом С.К. Годунова первого порядка точности [2] на фиксированной сетке. Число ячеек поперек потока равно 30, длина ячейки вдоль оси абсцисс вдвое больше ее поперечного размера. Относительная погрешность, рассчитанная по величине полной энтальпии и расходу газа для установившегося потока, не превышает 3%.

Детонационное горение водорода на уровне земной поверхности

В условиях, характерных для атмосферы на уровне земной поверхности, стационарное детонационное горение водородовоздушной смеси в рассматриваемом сопловом канале получено при числе Маха M_0 от 5.5 до 9. На рис. 1 показаны температура (T/T_0) и линии тока в установившемся потоке с детонационным фронтом CD при $M_0 = 7$ и $\phi = 1$. При $M_0 \geq 7$ эти режимы ДГ формируются в стехиометрической смеси. При меньших значениях M_0 концентрацию водорода приходится уменьшать.

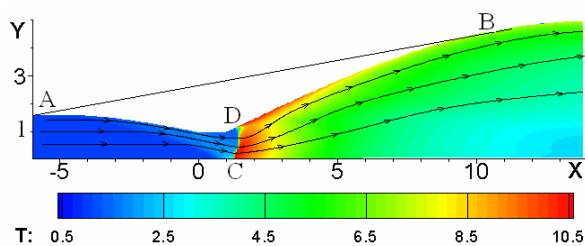


Рис. 1

На рис. 2 изображены зависимости силы тяги (кривая 1) и силы сопротивления (кривая 2) от числа Маха набегающего потока M_0 . Сила тяги F сравнивается с силой сопротивления F_d конической капсулы АВ (см. рис. 1), содержащей сопло. В отличие от идеального прямооточного воздушно-реактивного двигателя [3], кривая 1 на рис. 2 имеет максимум. Тяга превосходит сопротивление при $M_0 \leq 7$.

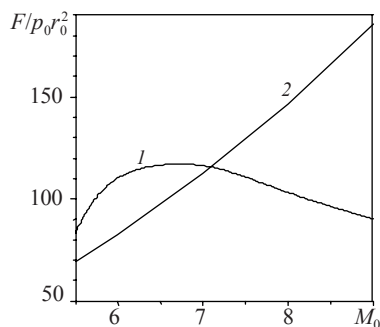


Рис. 2

Полученные стационарные режимы ДГ устойчивы по отношению к периодическим возмущениям концентрации водорода в набегающем потоке при невысокой амплитуде возмущений, а также в случае высокочастотных или коротковолновых возмущений с амплитудой порядка единицы. Срыв ДГ происходит в результате воздействия низкочастотных и длинноволновых возмущений с высокой амплитудой из-за длительного отсутствия достаточного количества водорода в зоне

воспламенения. К потере устойчивости приводит и выход детонации в конвергентную часть сопла, обусловленный неоптимальным выбором состава смеси, что говорит о трудностях реализации пульсирующих режимов в рассматриваемом сопловом канале.

Влияние высоты на параметры детонационного горения водорода

Изменение высоты полета H в расчетах моделируется изменениями давления p_0 и температуры T_0 . Необходимые данные опубликованы в Интернете (на рис. 3 кривые 1 и 2 соответственно: p_N и T_N – давление и температура у поверхности Земли). При $M_0 = 7$ стационарное ДГ стехиометрической смеси реализуется практически на всех высотах вплоть до 20 км. На высоте 12 и 14 км для стабилизации детонационного горения приходится уменьшать параметр ϕ на 10 и 5% соответственно. До 9 км тяга, отнесенная к произведению $p_0 r_0^2$, увеличивается более чем на 30%, а затем меняется менее заметно (рис. 3, кривая 3).

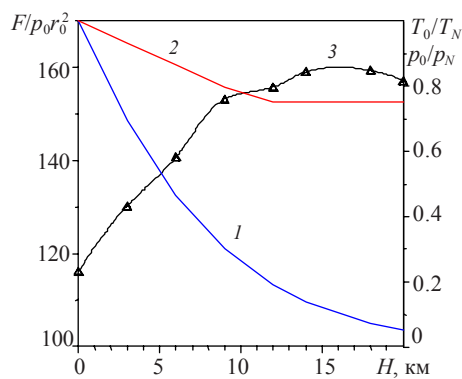


Рис. 3

На рис. 4 изображены температура (T/T_0) и линии тока в установившемся потоке с центральной областью детонационного горения DC и пристеночной ударной волной SW при $M_0 = 9$ и $\phi = 1$ на высоте $H = 24$ км.

На этой высоте детонационное горение стабилизируется при $M_0 \geq 8$, то есть при значениях числа Маха, когда сила сопротивления F_d превосхо-

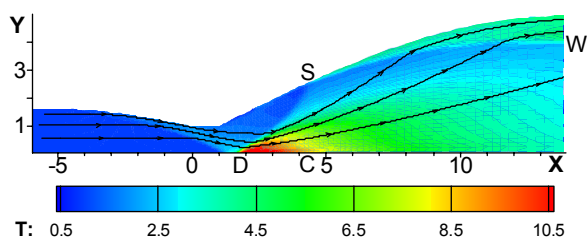


Рис. 4

дит тягу. При этом в ДГ участвует только центральная часть потока *ДС*.

Таким образом, ДГ водородовоздушной смеси в рассматриваемом сопловом канале может использоваться для обеспечения полетов с числом Маха более 5 на высотах до 20 км.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 10-08-00519а) и Правительства РФ (грант НШ-8424.2010.1).

Список литературы

1. Гурвич Л.В., Вейц И.В., Медведев В.А. и др. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: Справочник. Т.1. Кн. 2. М.: Наука, 1978. 327 с.
2. Годунов С.К., Забродин А.И., Иванов М.Я. и др. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976. 400 с.
3. Черный Г.Г. Газовая динамика. М.: Наука, 1988. 424 с.

DETONATIVE COMBUSTION OF A RAREFIED HYDROGEN-AIR MIXTURE IN LAVAL NOZZLE

Yu. V. Tunik

Detonative combustion of hydrogen-air mixture incoming into an axisymmetric convergent-divergent nozzle with the supersonic velocity at low and high altitudes is considered. The investigations are fulfilled on the base of two-dimension Euler gas dynamic equations for multi-component reacting gas. A detailed model of chemical transformations is used. Possibility of stationary detonative combustion of hydrogen in the divergent nozzle part is shown numerically. The obtained regimes of detonative combustion are stable with respect to the periodical concentration perturbations of the inlet hydrogen.

Keywords: hydrogen-air mixture, supersonic flow, detonative combustion, non-equilibrium chemical transformations, detail kinetics, multi-component gas, Laval nozzle, stable regime, Euler equation.