

УДК 532.46

НЕКОТОРЫЕ ДАННЫЕ СВЕРХЗВУКОВОГО ГОРЕНИЯ НЕПЕРЕМЕШАННЫХ ГАЗОВ В РАСШИРЯЮЩИХСЯ КАНАЛАХ

У.К. Жапбасбаев*, Е.П. Макашев**

*Казахстанско-Британский технический университет, Алматы, Казахстан
U.Zhapasbayev@kbtu.kz

**Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан
Erlan.Makashev@kaznu.kz

Аннотация

Приводятся результаты расчетных исследований самовоспламенения и горения водорода в сверхзвуковом потоке в круглом канале с коническим расширением. В расчетах показаны влияние угла конусности на воспламенение и горение неперемешанных газов в перерасширенном режиме истечения водородной струи.

Ключевые слова: самовоспламенение, горение, водород, газ, пламя, камера сгорания

Введение

Камеры сгорания гиперзвуковых прямоточных воздушно-реактивных двигателей (ГПВРД) состоят из цилиндрической части, заканчивающейся диффузором [1-3]. Поэтому круглый канал с коническим расширением моделирует в некоторой степени камеру сгорания ГПВРД, что определяет практическую важность результатов исследований. Горение водорода в каналах проводилось расчетно-теоретическими методами с привлечением RANS [4-12] и LES [13] моделей турбулентности. Экспериментальные исследования показывают задержку воспламенения [14-19], интенсивное горение водорода в псевдоскачко-вых режимах [20-23]. Малые углы расширения

(порядка 1°) отрицательно влияют на пламя – снижают интенсивность горения и даже способствуют его прекращению [24–26]. Наблюдаемое при расширении каналов ухудшение процесса горения является следствием двух факторов: резкого падения статического давления и температуры. Это ведет к увеличению характерных времен горения, а также снижению интенсивности перемешивания вследствие неблагоприятного градиента давления. Тепловыделение при горении не компенсирует падения давления и температуры при расширении сверхзвукового потока, что может привести к полному прекращению химических реакций. Недостаточно исследованы перерасширенный режим истечения водородной струи и влияние состава высокоэнтальпийного потока на воспламенение и горение.

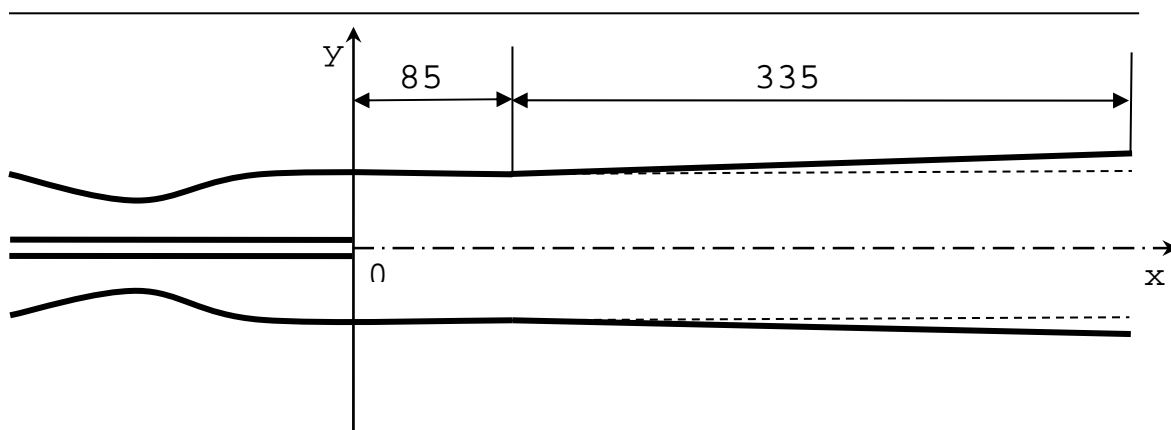


Рис. 1 – Схема течения в канале с коническим расширением

Математическая модель

Рассматривается развитие круглой сверхзвуковой струи водорода в коаксиальном сверхзвуковом потоке воздуха (рис. 1). Диаметры струи и потока равны $d_1 = 2$ мм, $d_2 = 16$ мм, соответственно. Длина цилиндрической части канала равнялась $L_1 = 85$ мм, угол конусности – $\varphi = 2^\circ$, а ее длина – $L_2 = 335$ мм.

Струя холодного водорода с температурой T_1 истекает в поток горячего воздуха с температурой T_2 и имеет место их смешения. Будем считать, что пограничные слои на стенках сопла и канала очень тонкими из-за больших скоростей газов.

Зона смешения начинается от кромки сопла, образуется реагирующая смесь, которая самовоспламеняется и происходит диффузионное горение не перемешанных газов струи водорода и коаксиального потока воздуха в канале. Течение предполагается сверхзвуковым по направлению оси цилиндрической камеры, газ считается вязким, теплопроводным, химически реагирующим, а режим течения – турбулентным.

Для описания течения воспользуемся системой параболизированных уравнений Навье-Стокса осредненных по Рейнольдсу, и записанных в дивергентной форме [9,10]:

$$\frac{\partial \bar{F}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{G}}{\partial y} + j \frac{\bar{R}}{y} - \frac{1}{y^j} \frac{\partial y^j (\bar{S} + \bar{H})}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

где $j = 1$,

$$\bar{F} = \bar{F} [\rho u, \rho u^2 + p, \rho uv, (e + p)u],$$

$$\bar{G} = \bar{G} [\rho v, \rho uv, \rho + \rho v^2, (e + p)v],$$

$$\bar{S} = \bar{S} \left[0, \mu_t \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{4}{3} \mu_t \frac{\partial v}{\partial y}, \frac{\gamma \mu_t}{Pr_t} \frac{\partial E}{\partial y} \right],$$

$$\bar{H} = \bar{H} \left[0, 0, 0, \frac{\mu_t}{2} \frac{\partial u^2}{\partial y} + \frac{2}{3} \mu_t \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\mu_t}{Sc_t} (1 - Le_t) \sum_i^K h_i \frac{\partial c_i}{\partial y} \right],$$

$$\bar{R} = \bar{R} \left[\rho v, \rho uv, \rho v^2 + \frac{4}{3} \mu_t \frac{v}{y} + \frac{2}{3} \left(\frac{\partial}{\partial y} (\mu_t v) - \mu_t \frac{\partial v}{\partial y} \right), (e + p)v + \frac{2}{3} \frac{\partial (\mu_t v^2)}{\partial y} \right].$$

Для проведения расчета во всей расчетной области переходим от физических координат x, y к координатам в вычислительной плоскости ξ, η .

Преобразование, связывающее физическую и вычислительную области, задается следующим образом:

$$\xi = x, \quad \eta = y / b(\xi)$$

где функция $b(\xi)$ равна 1,0 в цилиндрической части канала, а в конической части –

$$b(\xi) = 1,0 + \operatorname{tg}(\varphi) \cdot \xi$$

и является уравнением конусной части стенки канала.

В новой системе координат уравнения (1) примут вид:

$$\frac{\partial \bar{F}}{\partial \xi} - \eta \frac{\operatorname{tg} \varphi}{b(\xi)} \frac{\partial \bar{F}}{\partial \eta} + \frac{1}{b(\xi)} \frac{\partial \bar{G}}{\partial \eta} + j \frac{\bar{R}}{b(\xi)\eta} - \frac{1}{\eta^j} \frac{\partial \eta^j (\bar{S} + \bar{H})}{b(\xi) \partial \eta} = 0 \quad (2)$$

В преобразованных координатах векторы \vec{F} , \vec{G} не изменяются, а векторы \vec{S} , \vec{H} , \vec{R} имеют вид:

$$\vec{S} = \vec{S} \left[0, \frac{\mu_t}{b(\xi)} \frac{\partial u}{\partial \eta}, \frac{4}{3} \frac{\mu_t}{b(\xi)} \frac{\partial v}{\partial \eta}, \frac{\gamma}{Pr_t} \frac{\mu_t}{b(\xi)} \frac{\partial E}{\partial \eta} \right],$$

$$\vec{H} = \vec{H} \left[0, 0, 0, \frac{\mu_t}{2b(\xi)} \frac{\partial u^2}{\partial \eta} + \frac{2}{3} \frac{\mu_t}{b(\xi)} \frac{\partial v^2}{\partial \eta} + \frac{\mu_t}{Sc_t} (1 - Le_t) \sum_i^k \frac{h_i}{b(\xi)} \frac{\partial c_i}{\partial \eta} \right]$$

$$\vec{R} = \vec{R} \left[\rho v, \rho uv, \rho v^2 + \frac{4}{3} \frac{\mu_t}{b(\xi)} \frac{v}{\eta} + \frac{2}{3b(\xi)} \left(\frac{\partial}{\partial \eta} (\mu_t v) - \mu_t \frac{\partial v}{\partial \eta} \right), (e + p)v + \frac{2}{3b(\xi)} \frac{\partial (\mu_t v^2)}{\partial \eta} \right].$$

Скорость горения водорода в воздухе описывается по многостадийному механизму, включающую 9 химических реакций, в которых участвуют концентрации шести активных веществ H, O, OH, H₂O, O₂, H₂ [9,27,28]. Азот, присутствующий в воздухе, инертен и не взаимодействует с остальными компонентами смеси.

Коэффициент турбулентной вихревой вязкости ν_t находится по $(k - \varepsilon)$ - модели турбулентности для сжимаемых течений [29].

Влияние турбулентности на скорость химических реакций учитывалось с помощью модели не смешанности [9,10,30,31], которое приближенно определяет демпфирующее воздействие пульсаций концентрации веществ на скорость химических реакций.

Граничные условия системы уравнений в начальном сечении струи и потока задаются в виде постоянных значений искомых переменных.

На оси камеры сгорания справедливы условия симметрии.

Граничные условия на стенке камеры сгорания определяются из условий отражения и закона стенки [9,10].

Система уравнений совместно с граничными условиями решается численным методом [32-36].

Для верификации математической модели и метода решения были использованы данные по горению водородной, круглой сверхзвуковой струи в канале с коническим расширением [11].

Расчеты проводились при следующих режимных параметрах струи ($M_1 = 2.0$, $T_1 = 160$ К, $C_{H_2}^0 = 1.0$) и потока ($M_2 = 2.0$, $T_2 = 1200$

К, $C_{H_2O}^0 = 0.16$, $C_{O_2}^0 = 0.2095$, $C_{N_2}^0 = 0.6305$) и были соблюдены равенства геометрических размеров канала, струи и потока [11].

Давления струи и потока были одинаковы ($P_1 = P_2$) и степень нерасчетности равнялась ($n=1$).

На рис. 2 показаны поля концентрации радикала OH и температуры T.

В цилиндрической части канала имеет место смешение водорода с воздухом, самовоспламенение реагирующей смеси начинается в конусной части канала и интенсивное горение происходит с расстояния $x/r_1 = 150$.

Аналогичные результаты по задержке самовоспламенения и горению приводятся в [11].

Расчеты концентрационных, тепловых и динамических характеристик находятся в хорошем качественном согласии с данными [11].

Обсуждение результатов исследования

На рис. 3 приведены поля концентраций радикала OH и температуры T в круглом канале с коническим расширением ($\varphi = 2^\circ$) для режимных параметров: струи ($M_1 = 2.0$, $T_1 = 251$ К, $C_{H_2}^0 = 0.4$, $C_{N_2}^0 = 0.6$), потока ($M_2 = 2.2$, $C_{O_2}^0 = 0.232$, $C_{N_2}^0 = 0.768$).

Степень нерасчетности истечения струи – $n = 0.7$, коэффициент избытка воздуха – $\alpha = 4.6$.

Температуры потока были разные: $T_2 = 980$ К для (рис. 3,а,с) и $T_2 = 1270$ К для (рис. 3,б, д).

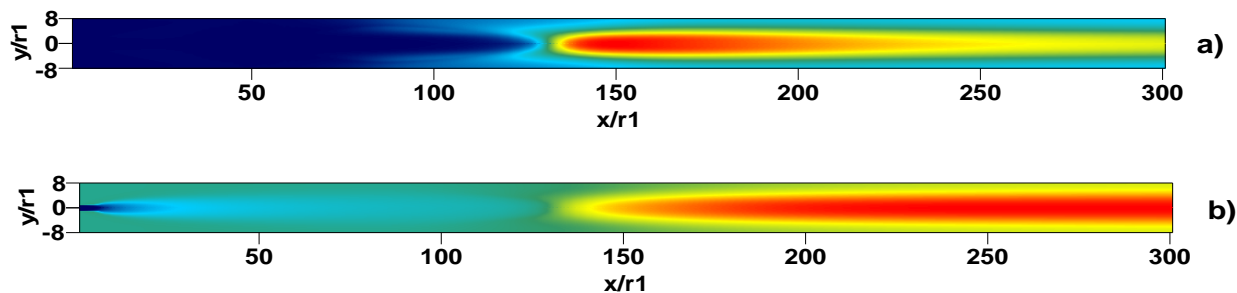


Рис. 2 – Поля концентрации радикала OH (а) и температуры T (b) при горении водорода в сверхзвуковом потоке

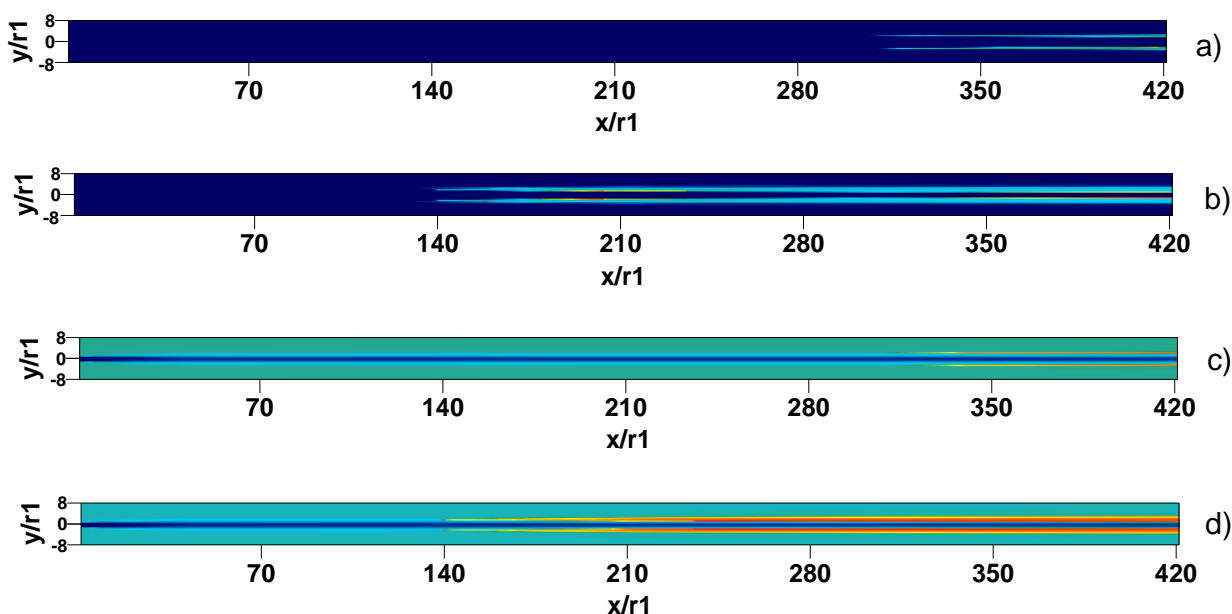


Рис. 3 – Поля концентрации радикала OH (а, б) и температуры T (с, d) при горении водорода в сверхзвуковом потоке: а, с – $T_2 = 980$ К, б, d – $T_2 = 1270$ К

Для сравнения на рис. 4 приведены при тех же режимных параметрах расчетные данные, полученные в круглом канале ($\varphi = 0^\circ$).

В круглом канале с коническим расширением ($\varphi = 2^\circ$) самовоспламенение начинается на расстоянии $x/r_1 = 300$ (рис. 3,а,с, r_1 – радиус струи, $r_1 = 1$ мм), а в канале ($\varphi = 0$) – на расстоянии $x/r_1 = 250$ (рис. 4,а,с).

Горение продолжается по длине расчетной области $x/r_1 = 420$ канала с коническим расширением, тогда как в канале выгорание водородной струи заканчивается на расстоянии $x/r_1 = 400$ (рис. 4,а,с).

Коническое расширение канала приводит к ускорению течения и снижению интенсивности смешения водородной струи с воздушным потоком.

Поэтому выгорание водорода не завершается в пределах расчетной области (рис. 3,а,с).

Повышение температуры потока $T_2 = 1270$ К приводит к тому, что самовоспламенение водорода начинается на расстоянии $x/r_1 = 250$ (рис. 3,б) в канале с расширением, а в канале с постоянным сечением – на расстоянии $x/r_1 = 160$ (рис. 4,б).

В высокотемпературном потоке возникают радикалы O, OH (рис. 3,б) после теплового распада молекул O_2 , H_2O . Радикалы O, OH вызывают раннее воспламенение водорода (рис. 4,б). Однако ускорение потока, снижает смешение реагирующей смеси (рис. 3,б) и реализуется «вялое» диффузионное горение (рис. 3,д).

В некоторых экспериментальных исследованиях [2,4,8,9,13,19,21,23] высокотемпературный поток образуется продуктами сгорания, которые обогащаются кислородом и содержат пары воды.

Поэтому в следующей серии расчетов найдено влияние состава сверхзвукового потока. На рис. 5 приведены поля концентраций радикала ОН и температуры Т для режима: параметры струи ($M_1 = 2.0$, $T_1 = 251$ К, $C_{H_2}^0 = 0.4$, $C_{N_2}^0 = 0.6$), параметры потока ($M_2 = 2.2$,

$C_{O_2}^0 = 0.232$, $C_{H_2O}^0 = 0.281$, $C_{N_2}^0 = 0.487$). Степень нерасчетности истечения струи – $n = 0.7$, угол конусности – $\varphi = 2^\circ$, коэффициент избытка воздуха – $\alpha = 16.6$. Температура потока равна: $T_2 = 980$ К для случая (рис. 5, а, с) и $T_2 = 1270$ К для случая (рис. 5, б, д).

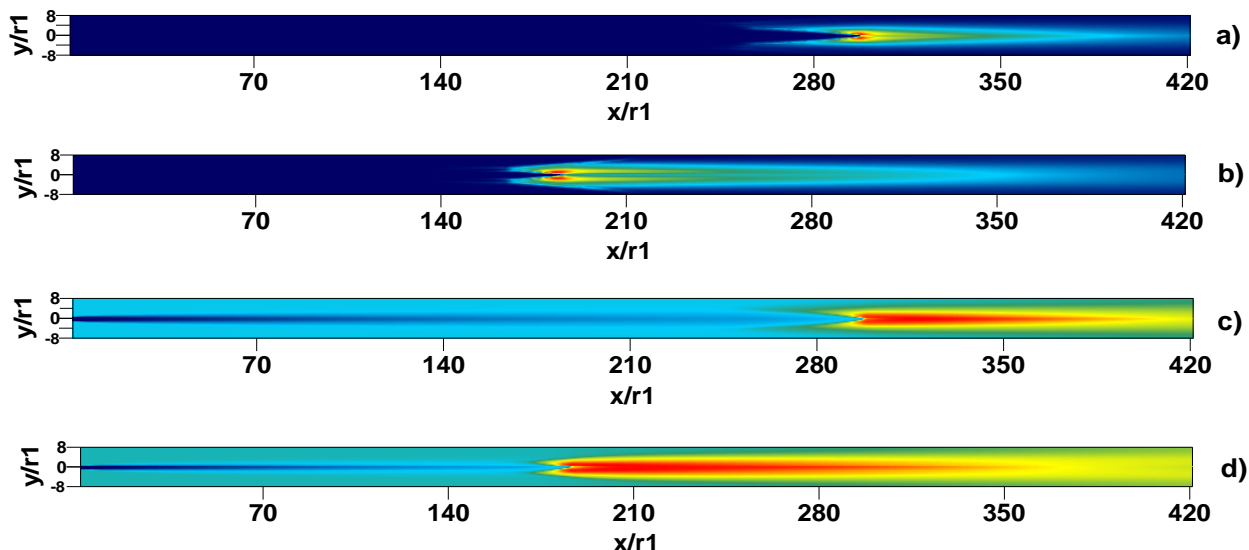


Рис. 4 – Поля концентрации радикала ОН (а,б) и температуры Т (с,д) при горении водорода в сверхзвуковом потоке: а,с – $T_2=980$ К, б,д – $T_2 = 1270$ К

Наличие паров воды в составе потока приводит к тому, что длина задержки воспламенения реагирующей смеси сокращается до $x/r_1 = 7$ для обоих значений температуры потока, т.е. независимо от величины температуры

потока самовоспламенение водорода происходит в одном и том же месте вблизи внешней границы зоны смешения.

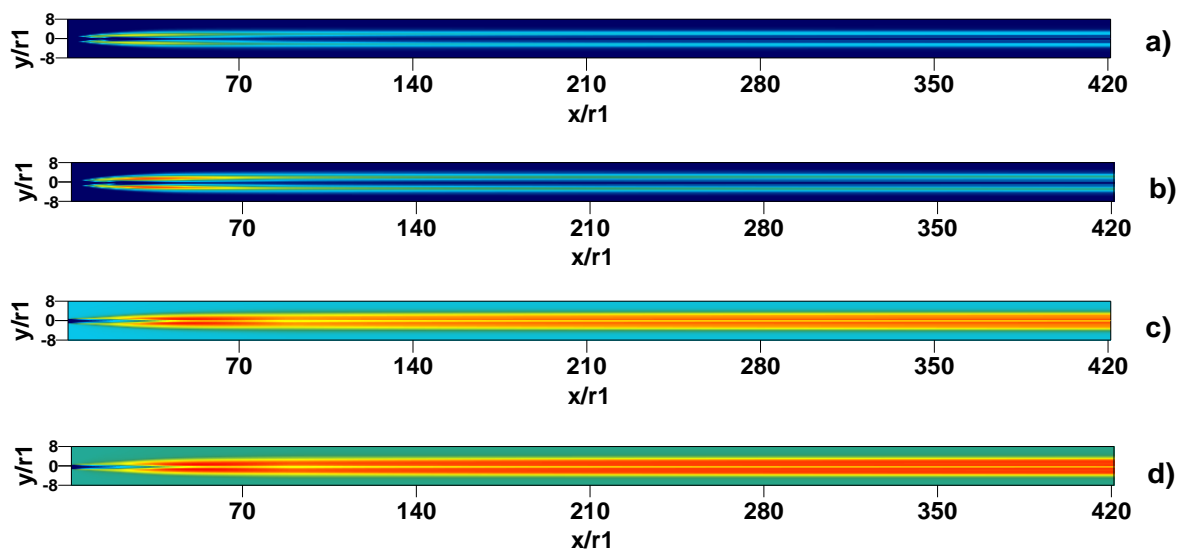


Рис. 5 – Поля концентрации радикала ОН (а,б) и температуры Т (с,д) при горении водорода в сверхзвуковом потоке: а,с – $T_2 = 980$ К, б,д – $T_2 = 1270$ К

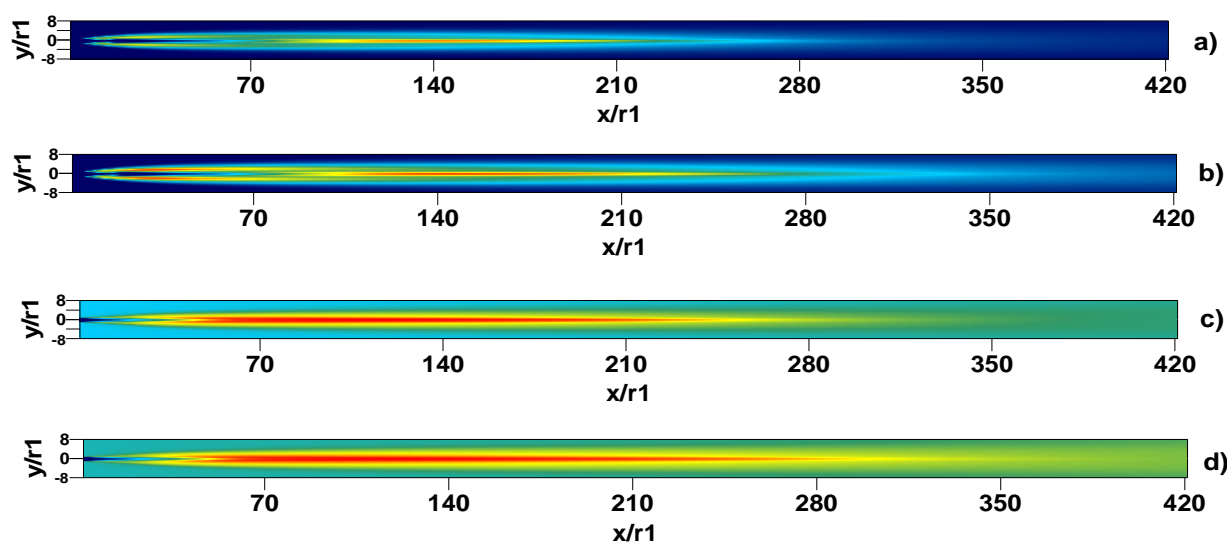


Рис. 6 – Поля концентрации радикала OH (a,b) и температуры T (c,d) при горении водорода в сверхзвуковом потоке: a,c – $T_2 = 980$ К; b,d – $T_2 = 1270$ К

Холодная водородная струя начинает смешиваться с горячим потоком окислителя, и химические реакции протекают «вяло» во внешней зоне смешения. Горение водорода протекает «вяло» по всей рассматриваемой области (рис. 5).

Заключение

Разработана математическая модель горения неперемешанных газов в сверхзвуковом потоке в канале с коническим расширением при перерасширенных режимах истечения водородной струи. Расчеты определили закономерности самовоспламенения и горения водорода в коаксиальном сверхзвуковом потоке, структуру пламени в зависимости от режимных параметров. Расчетные данные определили влияние угла конусности на диффузионное горение круглой водородной струи в сверхзвуковом коаксиальном потоке.

Было установлено, что даже небольшое расширение канала с углом конусности $\varphi = 2^\circ$ приводит к росту длины задержки воспламенения и фронта пламени.

Повышение скорости реагирующей смеси вызывает уменьшение времени индукции реагирующей смеси, вследствие чего происходит ухудшение смешения топлива с окислителем и наблюдается «вялое» диффузионное горение неперемешанных газов.

Наличие в составе газа потока паров воды и активных радикалов обеспечивает самовос-

пламенение с самого начала истечения. Однако диффузионный режим горения лимитируется смешением водородной струи с коаксиальным потоком.

Литература

- 1 Curran, E.T. and Murthy, S.N. Scramjet Propulsion // Progress in Astronautics and Aeronautics. – 2000. – Vol. 189. – P.1293.
- 2 Walter, C., Holland, S.D. and Charles, E. Scramjet Concept Evaluation // Journal of Spacecraft and Rockets. – 2006. – Vol.38, №6. – P. 803-810.
- 3 Баев В.К., Головичев В.И., Третьяков П.К. и др. Горение в сверхзвуковом потоке. Новосибирск: Наука. 1984.
- 4 Korchenov V.L., Lomkov K.E. The enhancement of the mixing and combustion processes applied to scramjet engine // AIAA – Paper. – NY., 1992. – №3428. – 13p.
- 5 Golovitchev V.I., Bruno C. Modelling of parallel injection supersonic combustion // ISTS 94-a-08. Yokohama, Japan, 1994.
- 6 Гуськов О.В., Копченков В.И. Численное исследование структуры течения в канале при сверхзвуковых условиях на входе // Аэромеханика и газовая динамика. – 2001. – №1. – С. 28-39.
- 7 Kasal P., Gerlinger P., Walther R. and et al. Supersonic Combustion: Fundamental Investigations of Aerothermodynamic Key Problems // AIAA-Paper – 2002. № 5119. 8 pp.

- 8 Eklund D. R., Stouffer S.D., Northam G.B. Study of a supersonic combustor employing swept ramp fuel injectors // *J. Propulsion Power*. 1997. V.13, No 6. P. 697-704.
- 9 Zhabbasbayev U.K., Makashev Ye.P., Samuratov Ye.B. Combustion Hydrogen in Supersonic Stream at Coaxial Input of Fuel and Oxidizer in Cylindrical Chamber // *Proc. XIII Int. Conf. On the Methods of Aerophysical Research*. – Novosibirsk, 2007. – Part I. – P. 216-220.
- 10 Жапбасбаев У.К., Макашев Е.П., Самуратов Е.Б. Некоторые эффекты влияния температуры и состава газа сверхзвукового потока на кинетику горения водорода // *Доклады НАН и МОН РК*. – 2007. №7, с. 17-27.
- 11 George, E. and Magre P. and Sabel'nikov V. Numerical Simulations of Self-Ignition of Hydrogen Hydrocarbons Mixtures in a Hot Supersonic Airflow // *AIAA- Paper* – 2006. № 4611, 9 p.
- 12 George, E. and Magre P. and Sabel'nikov V. Large Eddy Simulations and Experimental Study of Self-Ignition of Supersonic Hydrogen and Methane-Hydrogen Jets in a Vitiated Confined Supersonic Air Stream // *Proc. Eccomas Thematic Conf. Computational Combustion 2007*. – Delft, 2007, 18 pp.
- 13 Аннушкин Ю.М., Маслов Г.Ф. Экспериментальное исследование горения водородно-керосинового топлива в воздушно-прямоточном канале // *Физика горения и взрыва*. – 1982. – Т. 18, № 2. – С. 30-36.
- 14 Зимонт В.Л., Левин В.М., Мещеряков Е.А., Сабельников В.А. Особенности сверхзвукового горения не перемешанных газов в каналах // *Физика горения и взрыва*. – 1983. – Т. 19, № 4. – С. 75-78.
- 15 Строкин В.Н. Результаты экспериментального исследования стабилизации горения и выгорания водорода в модельных камерах сгорания ГПВРД // *Фундаментальные и прикладные проблемы космонавтики*. – 2000. №2. – С. 33-40.
- 16 Глотов Г.Ф., Гурылева Н.В., Иванькин М.А. Экспериментальное исследование газотермодинамики течений в модельных каналах прямоточных двигателей // *Проблемы аэрокосмической науки и техники*. – 2000. – № 1. – С. 51-61.
- 17 Забайкин В.А., Третьяков П.К. Исследование процессов горения применительно к гиперзвуковому прямоточному воздушно-реактивному двигателю // *Химическая физика*. – 2004. – Т. 23, №4. – С. 47-51.
- 18 Masuya Goro, Chinzei Nobuo, Kudo Kenji, Murakami Atsuo, Konuro Tomoyuki, Ishii Shinichi. Supersonic Mode Combustors // *Technical Report of National Aerospace Laboratory*. – 1983. – № 756. – P. 1-19.
- 19 Desevaux, P., Lanzetta, F. Computational Fluid Dynamic Modeling of Pseudoshock Inside a Zero-Secondary Flow Ejector // *AIAA Journal*. – 2004. – Vol. 42, №. 7. – P. 1480-1485.
- 20 Ichikawa N., Choi B., Nakajima T., Masuya G. and Takita K. Behavior of Pseudoshock Wave Produced by Heat Addition and Combustion. *AIAA Paper*. – 2002. № 5245, pp 12.
- 21 Magre P., Sabelnikov V.A., Tretyakov P.K., Zabaykin V.A. (2004). On the Possible Mechanisms of Intensifications of the Combustion in the Channel with the Supersonic Stream. *Inter. Conf. on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR-2004): Proc. Novosibirsk. Part 2.* pp 130-136.
- 22 Третьяков П.К. Псевдоскачковый режим горения // *Физика горения и взрыва*. – 1993, Т.29, № 6, с.33-38.
- 23 Зимонт В.Л., Иванов В.И., Мироненко В.А., Солохин Э.Л. Экспериментальное исследование механизма горения в сверхзвуковом потоке при спутной подачи горючего и окислителя. В кн.: *Горение и взрыв. Материалы 4-го Всесоюзного симпозиума по горению и взрыву, 1974 г. М.: Наука, 1977, с. 388-393.*
- 24 Drewry J.E. Supersonic mixing and combustion of confined coaxial hydrogen-air streams. *AIAA/SAF 8th Joint Propulsion Specialist Conference*. 1972, № 72-1178.
- 25 Masuya Goro, Chinzei Nobuo, Kudo Kenji, Murakami Atsuo, Konuro Tomoyuki, Ishii Shinichi. Supersonic Mode Combustors. *Technical Report of National Aerospace Laboratory*. 1983, № 756, p. 1-19.
- 26 Cookson R.A., Flanagan P., Penny G.S. A study of free-jet and enclosed supersonic diffusion flames. *Twelfth Symposium (Int.) on Combustion. The Combustion Inst., Pittsburgh*. 1969, p. 1115-1124.
- 27 Dimitrow V.I. The Maximum Kinetic Mechanism and Rate Constants in the H₂-O₂ System // *React. Kinetic. Catal. Lett.* – 1977. – V.7, №.1. – p. 81-86.
- 28 Li J., Zhao Zh., Kazakov A. and Dryer F.L.

An Updated Comprehensive Kinetic Model of Hydrogen Combustion // Inter. Journal of Chemical Kinetic. –2004. –V.36, – p. 566-575.

29 Sarkar S, Erlebacher G, Hussani MY and Kreiss HO. The Analysis and Modelling of Dilatational Terms in Compressible Turbulence // J. Fluid. Mech. –1991. – V. 227, – p. 473-493.

30 Spiegler E., Wolfshtein M., and Manheimer-Timnat Y. A model of Unmixedness for Turbulent Reacting Flows // Acta Astronautica. – 1976. – V.3, No.3-4. – P. 265-280.

31 Громов В.Г., Ларин О.Б., Левин В.А. Турбулентное горение водорода в пристенной струе, истекающей в спутный сверхзвуковой поток воздуха // Физика горения и взрыва. – 1987. – Т.23, №6. – С.3-9.

32 Steger J.L. and Warming R.F. Flux

Vector Splitting of the Inviscid Gas Dynamics Equations with Application to Finite Difference Methods // Journal of Computational Physics. – 1981. – V.40, April. – P.263.

33 Coakley T.Y. Implicit Upwind Methods for the Compressible Navier-Stokes Equations // AIAA Journal. – 1985. – V. 23, №13. – P. 67-83.

34 Thomas J.L., Walters R.U. Relaxation schemes with the differences against the stream for Navie-Stocks equations // AIAA Journal. – 1988. – No. 2. – P.45-53.

35 Anderson D.A., Tannehil J.C., Pletcher R.H. Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer. – N.Y.: McGraw-Hill, 1984. – 367 p.

36 Chung T.J. Computational Fluid Dynamics: Cambridge University Press, 2002. – 787 p.

SOME DETAILS SUPERSONIC COMBUSTION NOT INTERMIXED GAS IN DIVERGENT CHANNEL

U.K. Zhapbasbayev*, E.P. Makashev**

*Kazakh-British Technical University in Almaty, U.Zhapbasbayev@kbtu.kz

**Kazakh National University Al-Farabi Almaty, Erlan.Makashev@kaznu.kz

Abstract

The results of computational modeling of self-ignition and combustion of hydrogen in a supersonic flow in a circular channel with a conical extension. In the calculations show the influence of the cone angle of the ignition and combustion gases unmixed overexpanded modes of hydrogen jet.

Keywords: self-ignition, combustion, hydrogen, gas, flame, combustion chamber

АРАЛАСПАҒАН ГАЗДАРДЫҢ ДЫБЫС ЖЫЛДАМДЫҒЫНАН ЖОҒАРҒЫ ЖАНУЫНЫҢ КЕЙБІР ДЕРЕКТЕРІ

Ұ.Қ. Жапбасбаев*, Е.П. Мақашев**

*Қазақ-Британ техникалық университеті, Алматы, U.Zhapbasbayev@kbtu.kz

**әль-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Erlan.Makashev@kaznu.kz

Аннотация

Құбырдың кеңейтілген конустық бөлігіндегі дыбыс жылдамдығынан жоғары ағыстағы сутегінің тұтану және жануының есептеу нәтижелері келтірілген. Сутегі ағынының кеңейтілген режимдегі араласпаған газдардың тұтануы мен жануына конус бұрышының әсері көрсетілген.

Түйін сөздер: жану, сутегі, газ жалын, жану камерасы