

УДК 532.46

## НЕКОТОРЫЕ ДАННЫЕ СВЕРХЗВУКОВОГО ГОРЕНИЯ НЕПЕРЕМЕШАННЫХ ГАЗОВ В РАСШИРЯЮЩИХСЯ КАНАЛАХ

У.К. Жапбасбаев\*, Е.П. Макашев\*\*

\*Казахстанско-Британский технический университет  
Алматы, [U.Zhasasbayev@kbtu.kz](mailto:U.Zhasasbayev@kbtu.kz)

\*\*Казахский национальный университет им. аль-Фараби  
Алматы, [Erlan.Makashev@kaznu.kz](mailto: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  $1^\circ$ ) 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.

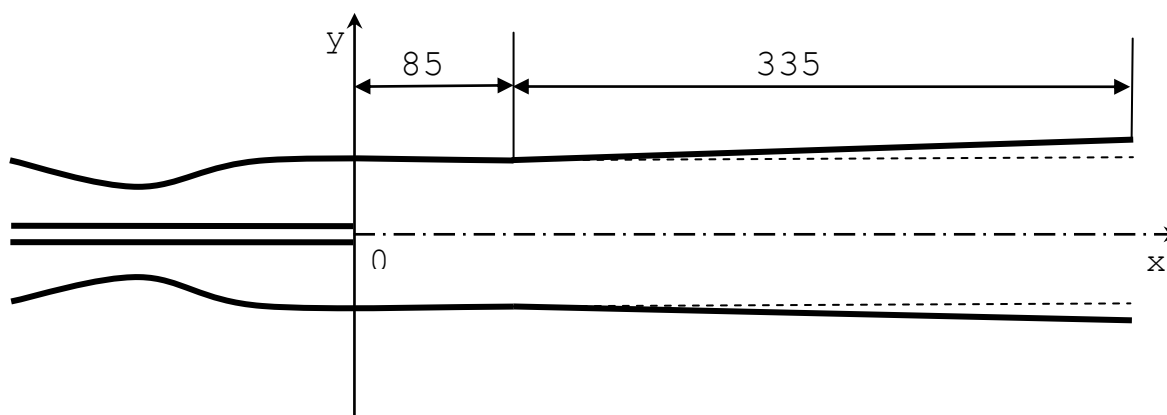


Рис.1 – Схема течения в канале с коническим расширением

**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 её 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]:

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

где  $j = 1$ ,

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

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

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

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

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

Для проведения расчета во всей расчетной области переходим от физических координат  $x, y$  к координатам в вычислительной плоскости  $\xi, \eta$ .

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:

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

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, H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> [9,27,28]. Азот, присутствующий в воздухе, инертен и не взаимодействует с остальными компонентами смеси.

Коэффициент турбулентной вихревой вязкости  $\nu_t$  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], которая 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 ( $M_1=2.0$ ,  $T_1=160K$ ,  $C_{H_2}^0=1.0$ ) и потока ( $M_2=2.0$ ,

$T_2=1200K$ ,  $C_{H_2O}^0=0.16$ ,  $C_{O_2}^0=0.2095$ ,  $C_{N_2}^0=0.6305$ ) 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 ( $M_1=2.0$ ,  $T_1=251K$ ,  $C_{H_2}^0=0.4$ ,  $C_{N_2}^0=0.6$ ), 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:  $T_2=980K$  для (рис. 3,а, с) и  $T_2=1270K$  для (рис. 3,б, d).

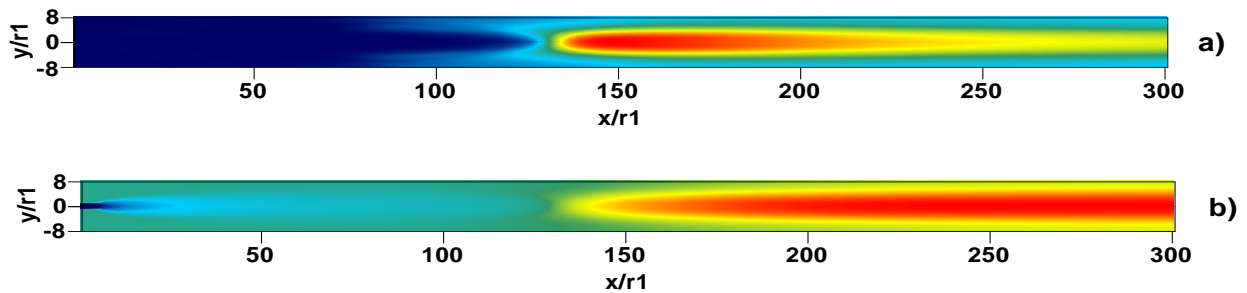


Рис. 2 – Поля концентрации радикала OH (a) и температуры T (b) при горении водорода в сверхзвуковом потоке

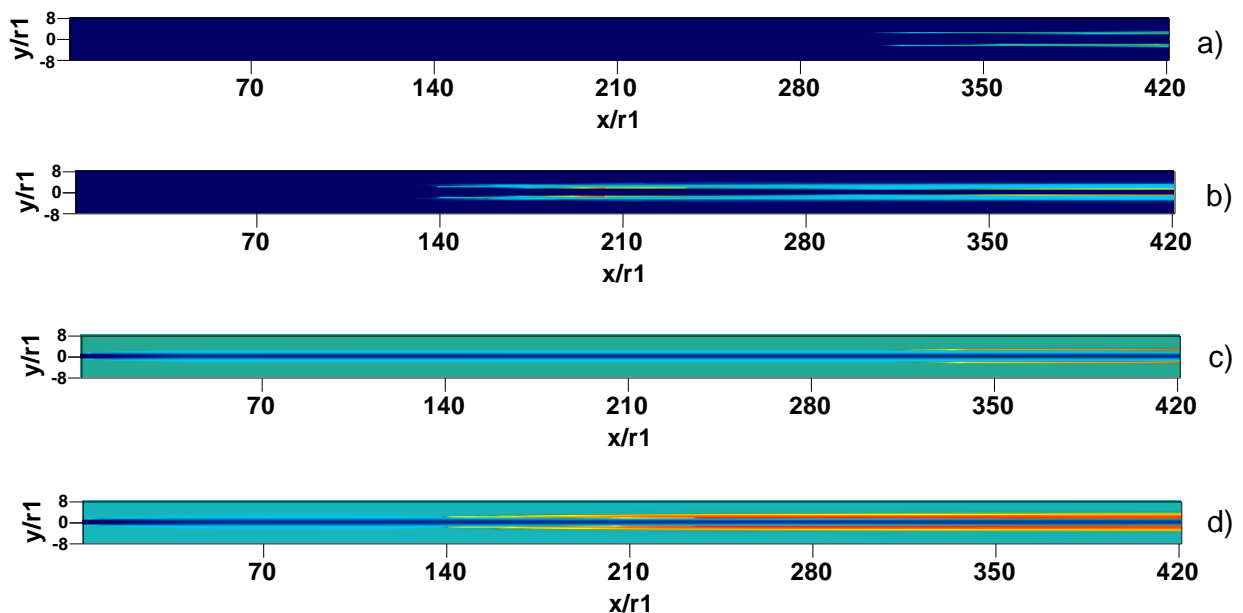


Рис. 3 – Поля концентрации радикала OH (a,b) и температуры T (c,d) при горении водорода в сверхзвуковом потоке: a,c –  $T_2=980\text{K}$ , b,d –  $T_2=1270\text{K}$

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,a,c,  $r_1$  – радиус струи,  $r_1=1\text{мм}$ ), а в канале ( $\varphi=0$ ) – на расстоянии  $x/r_1=250$  (рис.4,a,c).

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,a,c).

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,a,c).

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

В высокотемпературном потоке возникают радикалы O, OH (рис. 3,b) после теплового распада молекул  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ . Радикалы O, OH вызывают раннее воспламенение водорода (рис.4,b). Однако ускорение потока, снижает смешение реагирующей смеси (рис.3,b) и реализуется «вялое» диффузионное горение (рис.3,d).

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

держат пары воды.

Поэтому в следующей серии расчетов найдено влияние состава сверхзвукового потока. На рис. 5 приведены поля концентраций радикала OH и температуры T для режима: параметры струи ( $M_1=2.0$ ,  $T_1=251K$ ,  $C_{H_2}^0=0.4$ ,  $C_{N_2}^0=0.6$ ), 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:  $T_2=980K$  для случая (рис. 5, а, с) и  $T_2=1270K$  для случая (рис. 5, b, d).

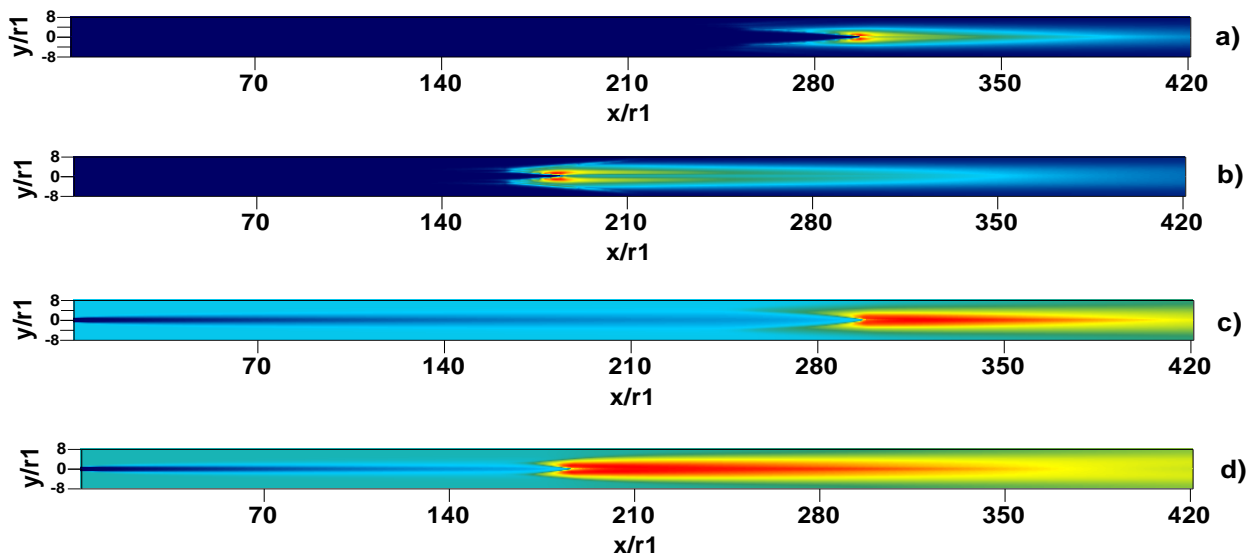


Рис. 4 – Поля концентрации радикала OH (a,b) и температуры T (c,d) при горении водорода в сверхзвуковом потоке: a,c –  $T_2=980K$ , b,d –  $T_2=1270K$

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.

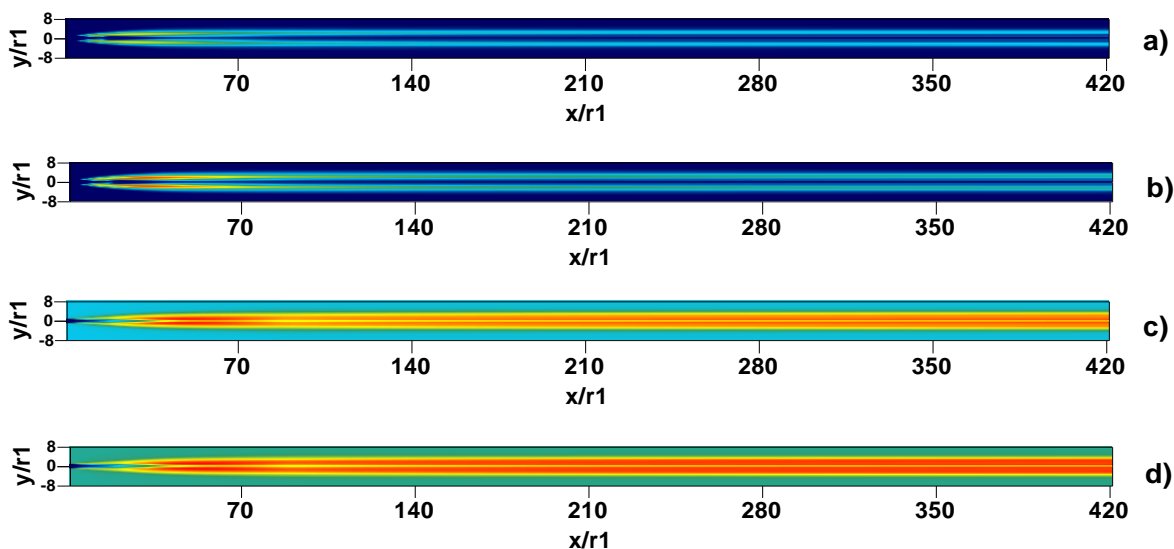


Рис. 5 – Поля концентрации радикала OH (a,b) и температуры T (c,d) при горении водорода в сверхзвуковом потоке: a,c –  $T_2=980K$ , b,d –  $T_2=1270K$

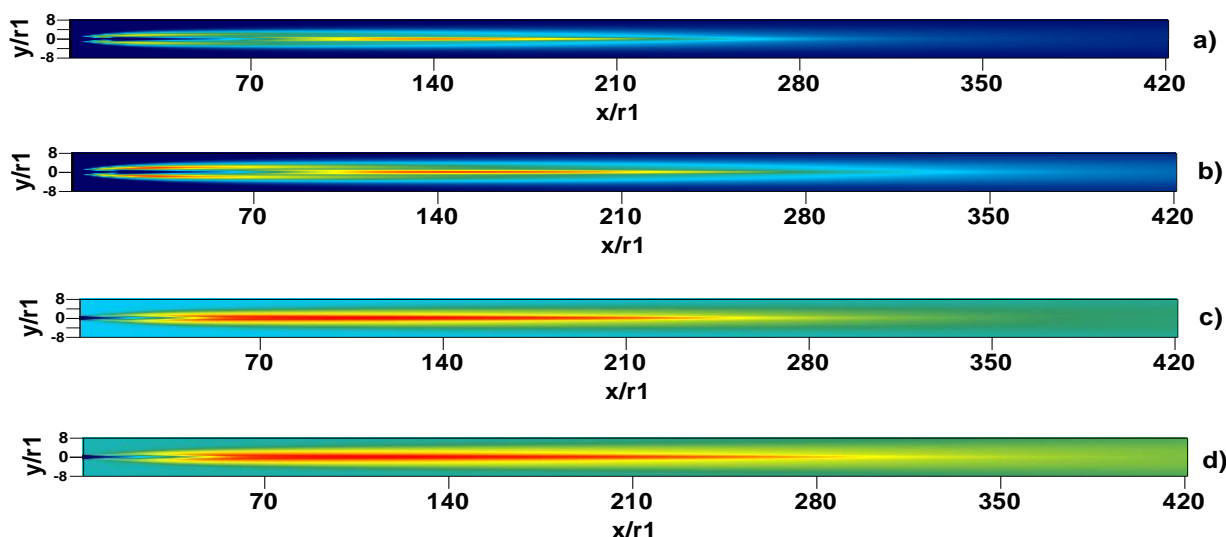


Рис. 6 – Поля концентрации радикала OH (a,b) и температуры  $T$  (c,d) при горении водорода в сверхзвуковом потоке: a,c –  $T_2=980\text{K}$ ; b,d –  $T_2=1270\text{K}$

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 само-

воспламенение 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 Kopchenov 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. Modeling 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 Zhapbasbayev 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 pp.*
- 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. Ecomas 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 VA, Tretyakov PK, Zabaykin VA (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 четвертого всесоюз. симпозиума по горению и взрыву, 1974г. 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 (Intern.) on Combustion. The Combustion Inst., Pittsburgh. 1969, p. 1115–1124.*
- 27 Dimitrow V.I. The Maximum Kinetic Mechanism and Rate Constants in the H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> 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 Dilational Terms in Compressible Turbulence // J. Fluid. Mech. –1991. -V. 227, -p. 473-493.

30 Spiegler E., Wolfsntein 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. – 367p.

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

---

### SOME DETAILS SUPERSONIC COMBUSTION NOT INTERMIXED GAS IN DIVERGENT CHANNEL

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

\* Kazakh-British Technical University in Almaty, U.Zhapasbayev@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.

---

### АРАЛАСПАҒАН ГАЗДАРДЫҢ ДЫБЫС ЖЫЛДАМДЫҒЫНАН ЖОҒАРҒЫ ЖАНУЫНЫҢ КЕЙБІР ДЕРЕКТЕРІ

Ұ.Қ. Жапбасбаев\*, Е.П. Мақашев\*\*

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

\*\* аль-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.