

# Unsteady Thermo-Gasdynamic Processes in Rectangular Scramjet Combustion Chamber with Periodical Input of Cold Air

R.K. Seleznev<sup>1,2,3</sup>, S.T. Surzhikov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> – Institute for problems in mechanics Russian Academy of Sciences, Russia, Moscow, 119526

<sup>2</sup> – Dukhov Research Institute of Automatics, 22, Sushchevskaya str., Moscow 127055, Russia

<sup>3</sup> – Moscow Institute for Physics and Technology, Russia, Dolgoprudny, 141700

rkseleznev@gmail.com, surg@ipmnet.ru

## Abstract

Combustion of hydrogen-air mixture under a periodical perpendicular injection of cold air is modeled. Fields of chemical species concentrations, pressure, and temperature are calculated by two-dimensional computational model based on unsteady governing equations including Navier-Stokes equations, energy conservation and diffusion equations together with system of chemical kinetic equations. Two-dimensional temperature, pressure and velocity visualization are presented. Method of the numerical simulation and details of the problem are presented in [4].

Keywords: combustion, hydrogen, scramjet, chemical kinetics.



Fig. 1. Schematic of the physical experiment and geometry of the numerical simulation [1–3]

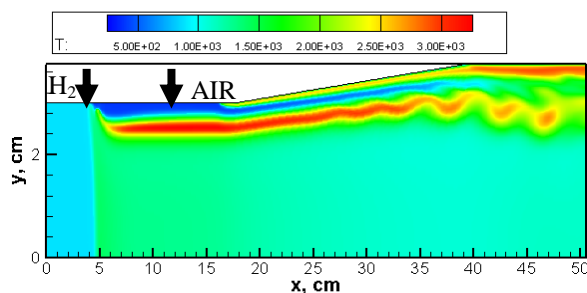


Fig. 2. Temperature in combustion chamber without perpendicular air injection [4]

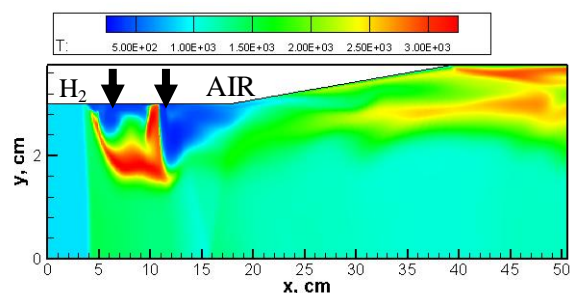


Fig. 3. Temperature in combustion chamber at the beginning of air injection [4]

## Video description

Results of previous studies [1–3] have shown the ability to control combustion modes in hypersonic ramjet engine (scramjet) using periodical injection of air downstream from the area of the ignition of fuel components.

The presented videos are the results of a two-dimensional numerical simulation of thermogasdynamics processes in a rectangular channel scramjet experimental setup [3] and illustrate flow regimes, observed in the experiments.

First phase of the calculations show the quasi-steady mode of burning in a stream of air with a temperature  $T = 889$  K, a pressure  $p = 0.896$  atm, at velocity  $M = 2.0$ . Molecular hydrogen supplied in the perpendicular direction at a distance of 50 mm from the beginning of the chamber, with the following parameters:  $M = 1.0$ ,  $p = 0.607$  atm,  $T = 242$  K (see  $H_2$  in fig.2 and fig.3). The hydrogen jet diameter is  $d = 4$  mm. At this stage the diffusion combustion is realized at a relatively low-intensity heat release in the main section of the combustion chamber (at a distance from 175 mm to 505 mm from the start of the combustion chamber).

When flap (see **AIR** in fig. 2 and fig. 3), through which the injected air stream with the parameters  $V_{in} = 62400$  cm/s,  $p = 1$  atm,  $T = 242$  K, activates, the combustion considerably intensifies, as evidenced by the increase in temperature in the initial section of the channel (from the beginning of the combustion chamber to 175 mm). When flap is deactivated the combustion mode switches from intensive to low intensity diffusion. Periodic combustion process is realized in a rectangular channel. Time of injection in the calculations was 0.5 ms, and the time between the injections was 1 ms. Details of the used numerical method are presented in [4,5].

Animation files give results of numerical simulation of thermo-gasdynamics processes in the combustion chamber with periodical cold air injection (index 2 in the filenames) and without the injection (index 1 in the filenames):

- 1) T\_1, T\_2i – the names of animation files for temperature (in K);
- 2) OH\_1, OH\_2 – the names of animation files for mass fraction of OH;
- 3) H2O\_1, H2O\_2 – the names of animation files for mass fraction of  $H_2O$ ;
- 4) M\_1, M\_2 – the names of animation files for Mach numbers;
- 5) Pres\_1, Pres\_2 – the names of animation files for pressure;
- 6) O\_1, O\_2 – the names of animation files for mass fraction of O;
- 7) N2\_1, N2\_2 – the names of animation files for mass fraction of  $N_2$ ;
- 8) H\_1, H\_2 – the names of animation files for mass fraction of H;
- 9) Vx\_1, Vx\_2 – the names of animation files for longitudinal velocity ( $V_x$ );
- 10) Vy\_1, Vy\_2 – the names of animation files for velocity ( $V_y$ );
- 11) Ro\_1, Ro\_2 – the names of animation files for pressure;
- 12) O\_1, O\_2 – the names of animation files for mass fraction of  $O_2$ ;

## References

1. Zabaykin, V.A., “Quality of High-Enthalpy Flow upon Electric-Arc Heating of Air in a Facility for Investigation Supersonic Combustion,” *Combustion, Explosion & Shock Waves*. 2003. Vol. 39, No. 1, Pp. 23–30
2. Zabaykin, V.A., Naumov, I.E., Tretyakov, P. K., “Change in the regimes of flow and combustion in a channel under external energy action,” *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2012. Vol.85. №6.
3. Tretyakov, P.K., “Organization of a pulsed mode of combustion in scramjets,” *Combustion, Explosion & Shock Waves*, 2012. Vol. 48. Issue 6. p.677
4. Surzhikov, S.T., Seleznev, R.K., Tretyakov, P.K., Zabaykin, V.A., “Unsteady Thermo-Gasdynamics Processes in Scramjet Combustion Chamber with Periodical Input of Cold Air,” *AIAA 2014-3917*. 50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 2014.

5. Surzhikov, S.T., Simulation of radiation-convective heating of model cameras of ramjets on hydrocarbon and hydrogen fuels. // Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics. 2014. V.15, issue 3. 35p. <http://chemphys.edu.ru/issues/2014-15-3/articles/230/>

УДК 533.6.08

# Нестационарные газодинамические процессы в прямоугольном канале ГПВРД с периодическим вдувом холодного воздуха

Р.К. Селезнев<sup>1,2,3</sup>, С.Т. Суржиков<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> – Институт проблем механики им. А.Ю.Илиинского РАН, Москва, 119526, проспект Вернадского 101-1

<sup>2</sup> – Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики имени Н. Л. Духова, Москва, 127055, Суцневская ул., д.22

<sup>3</sup> – Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, 141700, Институтский пер., 9

rkseleznev@gmail.com, surg@ipmnet.ru

## Аннотация

В работе моделируется процесс горения водородо-воздушной смеси при периодическом вдуве холодного воздуха поперек основного сверхзвукового потока. Поля концентраций химических компонент, давления и температуры рассчитываются с помощью двумерной вычислительной модели, основанной на нестационарных уравнениях Навье-Стокса, сохранения энергии, уравнений диффузии и системы уравнений химической кинетики. Представлена визуализация двумерных расчетов полей температуры, скорости, давления и концентраций химических компонент.

Ключевые слова: горение, водород, ГПВРД, химическая кинетика.



Рис. 1. Схема физического эксперимента и геометрия для численного моделирования [1-3]

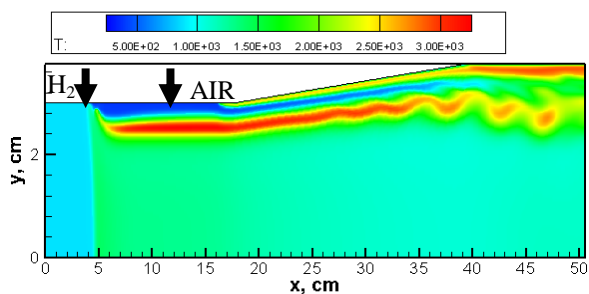


Рис. 2. Температура в камере сгорания без периодического вдува воздуха [4]

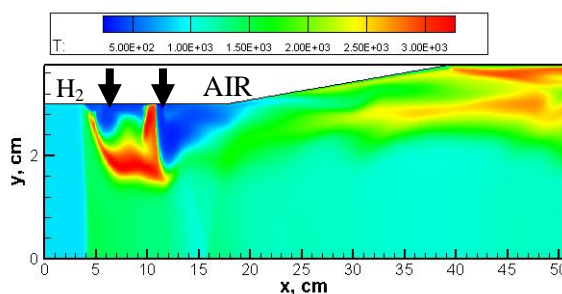


Рис. 3. Температура в камере сгорания в начале процесса периодического вдува воздуха [4]

## Описание видео

Результаты ранее выполненных исследований [1–3] показали возможность управления режимом горения в канале модельной энергетической установки типа гиперзвукового прямоточного воздушно-реактивного двигателя (ГПВРД) с использованием импульсно-периодического поперечного вдува воздуха ниже по течению от области воспламенения компонентов горючего.

Данное видео является результатом двумерного численного моделирования термогазодинамических процессов в прямоугольном канале ГПВРД экспериментальной установки [3] и иллюстрирует наблюдаемые в экспериментах режимы течения.

Первая фаза расчета состоит в определении квазистационарного режима горения в потоке воздуха с температурой  $T = 889$  К, давлением  $p = 0.896$  атм и скоростью  $M = 2.0$  молекулярного водорода, подаваемого в перпендикулярном направлении на расстоянии 50 мм от начала камеры, с параметрами  $M = 1.0$ ,  $p = 0.607$  атм,  $T = 242$  К. Диаметр водородной струи равен  $d = 4$  мм. На этом этапе реализуется диффузионный режим горения с относительно малоинтенсивным тепловыделением на основном участке камеры сгорания (на расстоянии от 175 мм до 505 мм от начала камеры сгорания).

При включении клапана (обозначение **AIR** на рис. 1 и рис. 2), через который инжектируется воздушная струя с параметрами  $V_{in} = 62400$  см/с,  $p = 1$  атм,  $T = 242$  К, горение заметно интенсифицируется, о чём свидетельствует повышение температуры на начальном участке канала (от начала камеры сгорания до 175 мм). При прекращении подачи воздуха из клапана режим горения переходит от интенсивного к диффузионному малоинтенсивному. Таким образом, реализуется периодический процесс горения в прямоугольном канале. Время вдува в расчетах составляло 0.5 мс, а время между вдувами 1 мс.

Детали численной методики изложены в [4,5].

Анимационные файлы показывают результаты численного моделирования термогазодинамических процессов в камере сгорания с периодическим вдувом холодного воздуха (индекс 2 в имени файла) и без него (индекс 1 в имени файла):

- 1) T\_1, T\_2 – имена анимационных файлов для температуры (в К);
- 2) OH\_1, OH\_2 – имена анимационных файлов для массовых долей OH;
- 3) H2O\_1, H2O\_2 – имена анимационных файлов для массовых долей H2O;
- 4) M\_1, M\_2 – имена анимационных файлов для числа Маха;
- 5) Pres\_1, Pres\_2 – имена анимационных файлов для давления;
- 6) O\_1, O\_2 – имена анимационных файлов для массовых долей O;
- 7) N2\_1, N2\_2 – имена анимационных файлов для массовых долей N2;
- 8) H\_1, H\_2 – имена анимационных файлов для массовых долей H;
- 9) Vx\_1, Vx\_2 – имена анимационных файлов для продольной скорости ( $V_x$ );
- 10) Vy\_1, Vy\_2 – имена анимационных файлов для поперечной скорости ( $V_y$ );
- 11) Ro\_1, Ro\_2 – имена анимационных файлов для плотности;
- 12) O2\_1, O2\_2 – имена анимационных файлов для массовых долей O2;

## Литература

1. Zabaykin V.A. Quality of High-Enthalpy Flow upon Electric-Arc Heating of Air in a Facility for Investigation Supersonic Combustion // Combustion, Explosion, & Shock Waves. 2003. Vol.39, No. 1, Pp. 23–30
2. Zabaykin V.A., Naumov I.E., Tretyakov, P. K. Change in the regimes of flow and combustion in a channel under external energy action // Journal of Engineering Physics and Thermophysics; 2012, Vol.85, № 6.
3. Tretyakov P.K. Organization of a pulsed mode of combustion in scramjets // Combustion, Explosion, & Shock Waves. 2012. Vol. 48 Issue 6, P.677

4. Surzhikov, S.T., Seleznev, R.K., Tretjakov, P.K., Zabaykin, V.A. Unsteady Thermo-Gasdynamic Processes in Scramjet Combustion Chamber with Periodical Input of Cold Air // AIAA 2014–3917, 50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 2014.
5. Суржиков С.Т. Моделирование радиационно-конвективного нагрева модельных камер ПВРД на водородном и углеводородном топливе. //Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2014. Т.15, вып.3. 35с. <http://chemphys.edu.ru/issues/2014-15-3/articles/230/>

Сообщение поступило в редакцию 28 октября 2015 г.