

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ ВОДОРОДОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В КАНАЛЕ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ

М.Р. Коршунова

mayya\_korshunova\_95@mail.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

Проведено исследование различных механизмов химической кинетики окисления водорода с использованием математических моделей разного уровня. Рассмотрены модели замкнутого адиабатического реактора, одномерного и двумерного проточных реакторов. На основании этого выбраны механизмы химической кинетики, интегрированные в программу газодинамических расчетов. Выполнено моделирование процессов течения и горения в канале переменного сечения. Исследовано влияние геометрических параметров проточного тракта на протекающие в нем газодинамические процессы. Проведен расчет течения в канале по одномерной методике с использованием равновесной термодинамики. Полученные результаты демонстрируют влияние различных механизмов химической кинетики на интегральные характеристики течения и теплообмена в канале переменного сечения. Выявлены газодинамические особенности, влияющие на процессы горения и воспламенения. Проведенное сравнение с одномерной методикой показало удовлетворительное соответствие интегральных параметров.

### Ключевые слова

Горение, водородовоздушная смесь, газодинамический расчет, моделирование горения в канале, реакторный подход

Поступила в редакцию 17.05.2017

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

---

**Введение.** Физико-математическое моделирование поведения газовых реакционноспособных смесей под ударно-волновой нагрузкой является важной и актуальной проблемой, особенно, в связи с необходимостью рассмотрения вопросов, протекающих в воздушно-реактивных двигателях. Представляется возможным использование некоторых достаточно простых кинетических моделей процессов воспламенения и последующего сверхзвукового горения газовых смесей, которые дают достоверную информацию о динамике превращений по мере развития реакции и адекватно описывают процесс, как на стадии воспламенения, так и на стадии горения. К числу основных параметров, по которым можно судить об адекватности моделирования стадии воспламенения, относятся пределы воспламенения и время задержки воспламенения (период индукции) [1, 26–33]. При моделировании течений с горением водорода стоит вопрос о выборе кинетического механизма его горения.

**Постановка задачи.** В модели двумерного проточного канала рассматривается задача об истечении и горении сверхзвуковой водородовоздушной струи в спутном сверхзвуковом потоке воздуха в осесимметричном канале переменного поперечного сечения. Для моделирования стационарного развитого турбулентного неравновесного течения используется система уравнений Навье—Стокса (осредненная по числу Рейнольдса) [2]:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial t} + j \frac{\mathbf{R}}{y} = 0, \quad (1)$$

где  $\mathbf{U}$  — вектор консервативных переменных;  $\mathbf{F}$ ,  $\mathbf{G}$  — векторы потоков, включающие в себя вязкие члены.

Уравнение турбулентной вязкости имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho v_t}{\partial t} + \frac{\partial \rho u v_t}{\partial x} + \frac{\partial \rho v v_t}{\partial y} + j \frac{\rho v v_t}{y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \rho (c_1 v_t + v) \frac{\partial v_t}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \rho (c_1 v_t + v) \frac{\partial v_t}{\partial y} \right] + \\ + j \frac{\rho (c_1 v_t + v) \frac{\partial v_t}{\partial y}}{y} + c_2 \rho v_t G + c_3 v_t \left( u \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) - c_4 \rho v_t^2 \frac{G^2}{a^2} - \rho \frac{c_5 v_t^2 + c_6 v v_t^2}{S^2}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\rho$  — плотность;  $v$  — кинематический коэффициент вязкости;  $v_t$  — турбулентная вязкость;  $u$  — скорость;  $S$  — минимальное расстояние до стенки.

Здесь

$$G^2 = 2 \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + j \left( \frac{v}{y} \right)^2.$$

Значения коэффициентов для уравнения турбулентной вязкости модели Baldwin—Lomax:  $c_1 = 2$ ;  $c_2 = 0,2$ ;  $c_3 = 0,7$ ;  $c_4 = 5$ ;  $c_5 = 3$ ;  $c_6 = 50$ .

Замыкание приведенной системы уравнений в случае многокомпонентного газа проводится с помощью калорического и термического уравнений состояния [3].

Калорическое уравнение состояния:

$$h = \sum_i c_i h_i, h_i = \int C_{p,i} dT + h_i^0, \quad (4)$$

где  $h_i$  — энтальпия компонентов;  $h_i^0$  — энтальпия образования.

Предполагается, что удельная теплоемкость каждого компонента является линейной функцией от температуры. Соответственно энтальпия аппроксимируется квадратичным полиномом [4].

Термическое уравнение состояния:

$$P = \frac{\rho RT}{\mu}; \quad \frac{1}{\mu} = \sum_i \frac{c_i}{\mu_i}, \quad (5)$$

где  $\mu_i$  — молекулярная масса компонентов;  $\mu$  — молекулярная масса смеси.

На рис. 1 представлена геометрическая модель проточного тракта канала сложной формы. Двумерная модель канала включает в себя медленно расширяющийся участок и участок постоянного сечения. Через треугольной формы пилон подается водород с массовым расходом, соответствующим стехиометрическому соотношению компонентов. На входе в канал задается воздушный поток со сверхзвуковыми условиями течения.

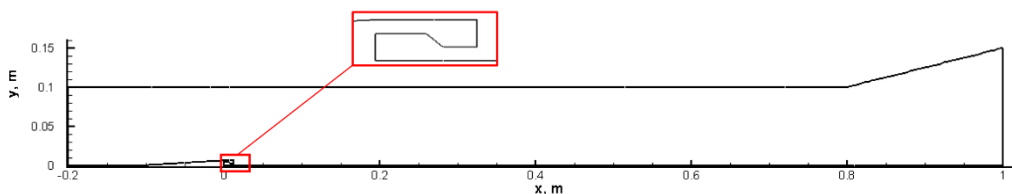


Рис. 1. Геометрия расчетного канала

Для представленной геометрической модели построена расчетная сетка (рис. 2), состоящая из примерно 66 000 гексагональных элементов, адаптированная к поверхностям расчета для разрешения гидродинамических явлений в пограничном слое.

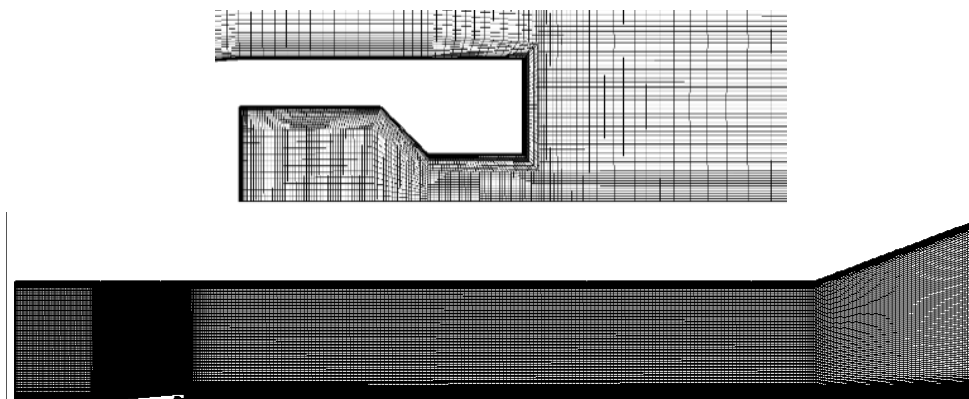


Рис. 2. Расчетная сетка

Рассматривали нестационарное вязкое турбулентное течение воздушно-водородной смеси. При этом использовали модель химической кинетики R. Hanzons.

Начальные и граничные условия следующие:

- на входе в ВЗУ  $M = 3$ ,  $p = 50$  кПа,  $T = 300$  К;
- на стенке  $T = \text{const} = 1\,000$  К.

Процедура расчета состояла из трех этапов. На первом этапе устанавливали течение воздушного потока в проточном тракте канала сложной формы. Затем осуществляли подачу водорода. Температуры торможения воздушного потока недостаточно для инициации процессов горения в рассматриваемом канале. После подачи водорода в проточный тракт через пилон подавали высокотемпературные продукты сгорания водородо-воздушной смеси при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha = 1$ . После воспламенения через пилон снова подавался водород

и горение уже не прекращалось. На третьем этапе рассматривали собственно процесс горения.

На рис. 3, 4 представлены полученные в результате проведенных расчетов поля давлений и температур. Характерной особенностью является «слоистое» температурное течение, которое может быть обусловлено горением смеси преимущественно в слое смешения [6]. Профиль скорости, представленный на рис. 5, более вытянут к нижней стенке канала, что способствует неравномерному перемешиванию и сгоранию. Поле концентраций водорода представлено на рис. 6.

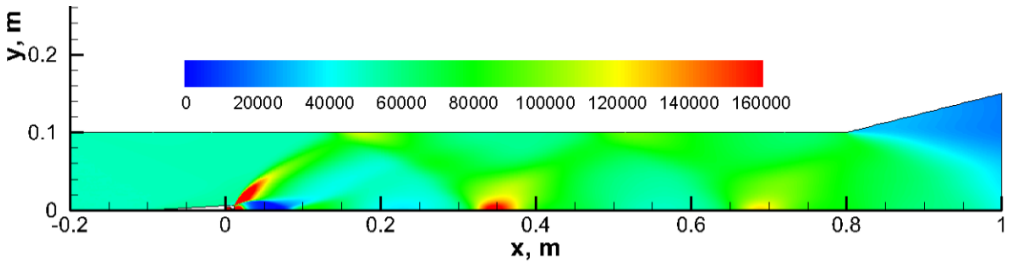


Рис. 3. Поле давлений

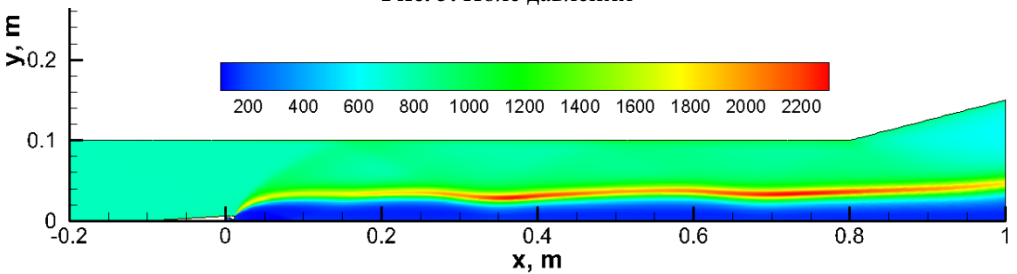


Рис. 4. Поле температур

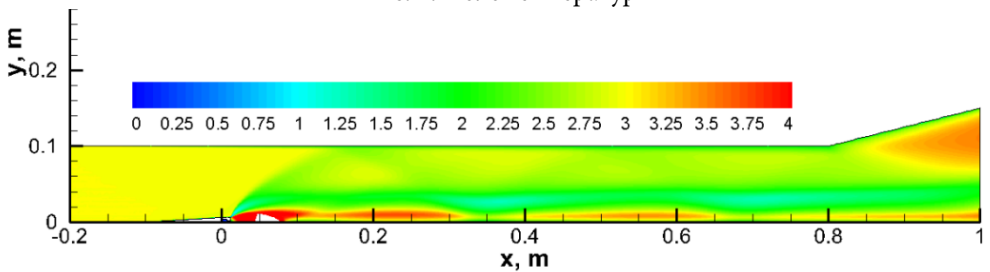


Рис. 5. Поле числа Маха (поле скоростей)

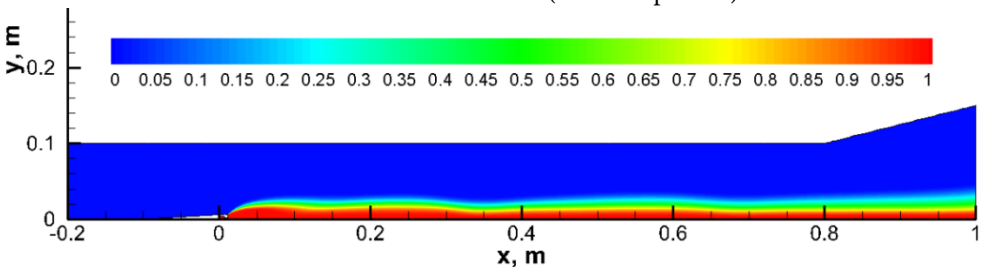


Рис. 6. Поле концентраций водорода

В результате расчета течения химически реагирующего потока в канале получен тепловой поток на стенку канала (рис. 7). Неоднородный характер тепловых потоков обусловлен сложной установившейся гидродинамической структурой потока.

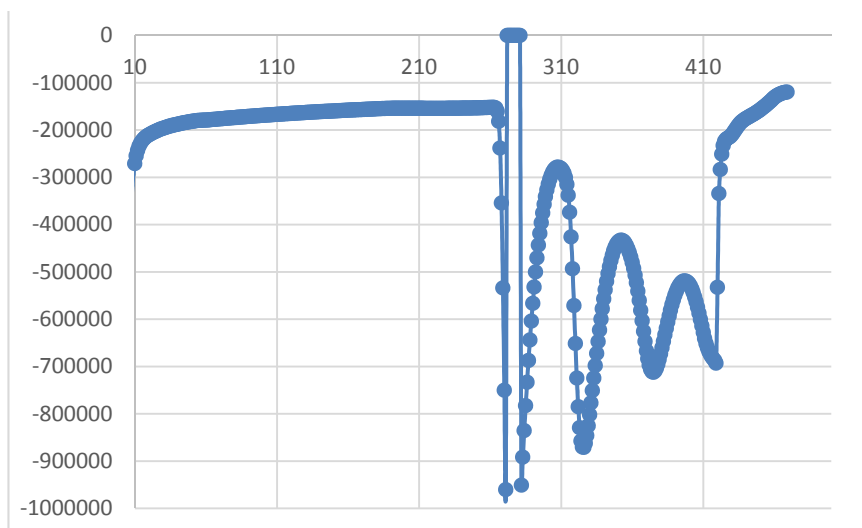


Рис. 7. Тепловой поток на стенке

## Литература

- [1] Бедарев И.А., Федоров А.В. Сравнительный анализ трех математических моделей воспламенения водорода. *Физика горения и взрыва*, 2006, т. 42, № 1, с. 26–33.
- [2] Авдудевский В.С., Кошкин В.К. *Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике*. Москва, Машиностроение, 1992, 528 с.
- [3] Щетинков Е.С. *Физика горения газов*. Москва, Наука, 1965, 739 с.
- [4] Нечаев Ю.Н., Федоров Р.М. *Теория авиационных газотурбинных двигателей*. В 2 ч. Москва, Машиностроение, 1977–1978, ч. 1 – 312 с., ч. 2 – 335 с.
- [5] Крюков В.Г., Наумов В.И. Математическое моделирование реагирующих течений на базе реакторного подхода. *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*, 2004, № 2. URL: <http://chemphys.edu.ru/issues/2004-2/articles/65/>.
- [6] Платонов И.М. Решение задачи горения водорода в сверхзвуковом потоке с помощью модуля Ansys CFX. *Труды МАИ*, 2015, № 82. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=58562>.
- [7] Дешко А.Е. О выборе кинетической модели горения водорода в численном моделировании сверхзвукового неравновесного течения. *Техническая механика*, 2014, № 1, с. 37–45.

**Коршунова Майя Ручириовна** — студентка кафедры «Теплофизика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Научный руководитель** — Французов М.С., ассистент кафедры «Теплофизика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

## NUMERICAL SIMULATION OF COMBUSTION PROCESSES FOR HYDROGEN-AIR MIXTURE IN A VARIABLE CROSS-SECTION PIPE

M.R. Korshunova

mayya\_korshunova\_95@mail.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

### Abstract

We used mathematical models of different orders to investigate various mechanisms of hydrogen oxidation kinetics. We considered the models of a closed adiabatic reactor, and one- and two-dimensional flow reactors. We accordingly selected chemical kinetic mechanisms from the list of those integrated in our hydrocode. We simulated flow and combustion processes in a variable cross-section pipe. We studied the effect the geometric parameters of the flow duct have on the gas dynamics inside it. We used thermodynamic equilibrium methods to compute a one-dimensional flow in the pipe. The results show that various mechanisms of chemical kinetics affect the integral characteristics of the flow and heat transfer in a variable cross-section pipe. We detect certain features of gas dynamics that affect combustion and ignition processes. A comparison to the one-dimensional technique shows a satisfactory agreement of the integral parameters.

### Keywords

Combustion, hydrogen-air mixture, gas dynamic computation, simulation of combustion in a pipe, reactor-based approach

© Bauman Moscow State Technical University, 2017

### References

- [1] Bedarev I.A., Fedorov A.V. Comparative analysis of three mathematical models of hydrogen ignition. *Fizika gorennya i vzryva*, 2006, vol. 42, no. 1, pp. 26–33. (Eng. version: *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2006, vol. 42, no. 1, pp. 19–26).
- [2] Avduevskiy V.S., Koshkin V.K. *Osnovy teploperedachi v aviatsionnoy i raketno-kosmicheskoy tekhnike* [Heat transport fundamentals in aerotechnics and rocket and space equipment]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1992. 528 p.
- [3] Shchetinkov E.S. *Fizika gorennya gazov* [Gas combustion physics]. Moscow, Nauka publ., 1965. 739 p.
- [4] Nechaev Yu.N., Fedorov R.M. *Teoriya aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigateley*. V 2 ch. [Theory of aeronautic gas-turbine engines]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1977–1978. Pt. 1 – 312 p., pt. 2 – 335 p.
- [5] Kryukov V.G., Naumov V.I. Reacting flotation mathematical simulation based on reactor approach. *Fiziko-khimicheskaya kinetika v gazovoy dinamike* [Physical-chemical kinetics in gas dynamics], 2004, no. 2. Available at: <http://chemphys.edu.ru/issues/2004-2/articles/65/>.
- [6] Platonov I.M. Modeling Hydrogen combustion in a hypersonic flow using Ansys CFX. *Trudy MAI*, 2015, no. 82. Available at: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=58562>.
- [7] Dshko A.E. On the selection of kinetic model for hydrogen burning in numerical simulation of supersonic non-equilibrium flow. *Tekhnicheskaya mekhanika*, 2014, no. 1, pp. 37–45.

**Korshunova M.R.** — student, Department of Thermal Physics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Scientific advisor** — M.S. Frantsuzov, Assistant, Department of Thermal Physics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.