

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ВОДОРОДА В КАНАЛЕ МОДЕЛЬНОГО ГПВРД

А.А. Горбунов<sup>1</sup>, Р.К. Селезнев<sup>1,2</sup><sup>1</sup> *Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук  
Москва, 119526, пр-т Вернадского, д.101-1*<sup>2</sup> *Московский физико-технический институт (государственный университет)  
Московская область, Долгопрудный, 141700, Институтский пер., 9*

## Аннотация

Рассматривается течение, обусловленное горением водорода в воздухе, в канале модельного ГПВРД. Представлены результаты численного моделирования на основе двумерных уравнений Навье–Стокса на структурированной разностной сетке. Получены распределения концентраций компонентов газовой смеси, давления и температуры. Параметры модельного канала соответствуют параметрам реального эксперимента. Используется модель химической кинетики, предложенная в [3].

NUMERICAL SIMULATION OF COMBUSTION OF A HYDROGEN  
IN A CHANNEL OF MODEL SCRAMJETА.А. Gorbunov<sup>1</sup>, R.K. Seleznev<sup>1,2</sup><sup>1</sup> *Institute for Problems in Mechanics Russian Academy of Sciences, Russia, Moscow, 119526*<sup>2</sup> *Moscow Institute of Physics and Technology, Russia, Moscow, 141700*

This work is devoted to a consideration of flow and combustion of a hydrogen-air mixture in a channel modeling a section of a supersonic combustion scramjet. In this paper we present results of solving 2-D Navier–Stokes equations on structured grid. Fields of concentrations, pressure, and temperature are obtained. The parameters of the calculation described in this article correspond to the real parameters of the model of a hypersonic aircraft. Model of chemical kinetics suggested by Frenklach is used.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время газодинамические расчеты в областях сложной формы имеют большое практическое и научное значение. Особенно остро тема связана с попытками создания Гиперзвуковых Прямоточных Воздушно-Реактивных Двигателей (ГПВРД) [1]. В данной работе исследование проводилось на основе кода NERAT [2], созданного в лаборатории радиационной газовой динамики ИПМех РАН.

2. ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ  
МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ

## 2.1. Определяющие дифференциальные уравнения

Рассматривается двумерная система уравнений неразрывности, Навье–Стокса, сохранения массы химических компонент и сохранения энергии, имеющая вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{V}) &= 0, \\ \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho u \mathbf{V}) &= -\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} (\mu \cdot \operatorname{div} \mathbf{V}) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right), \\ \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho v \mathbf{V}) &= -\frac{\partial p}{\partial y} - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial y} (\mu \cdot \operatorname{div} \mathbf{V}) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial y} \right), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \operatorname{div} \rho_i \mathbf{V} &= -\operatorname{div} \mathbf{J}_i + \dot{\omega}_i, \quad i=1, 2, \dots, N_s, \\ \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p \mathbf{V} \operatorname{grad} T &= \chi \frac{\partial p}{\partial t} + \chi \mathbf{V} \operatorname{grad} p + \\ &+ \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + Q_v - \sum_{i=1}^{N_s} h_i \dot{\omega}_i + \\ &+ \sum_{i=1}^{N_s} \rho c_{p,i} D_i (\operatorname{grad} Y_i \cdot \operatorname{grad} T), \end{aligned}$$

где  $x, y$  – декартовы координаты;  $\mathbf{V} = (u, v)$  – скорость потока и ее проекции на оси  $x$  и  $y$ ;  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости;  $\rho, p$  – плотность и давление;  $T$  – температура;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $c_p$  – удельная теплоемкость при постоянном давлении;  $c_p = \sum_i^{N_s} Y_i c_{p,i}$ ;  $Y_i$  – массовая доля  $i$ -го компонента смеси;  $c_{p,i}, h_i, \rho_i$  – удельная теплоемкость при постоянном давлении, энтальпия и плотность  $i$ -го компонента смеси;  $\dot{\omega}_i$  – массовая скорость химических превращений для  $i$ -го компонента смеси;  $D_i$  – эффективный коэффициент диффузии для  $i$ -го компонента смеси;  $\mathbf{J}_i$  – плотность диффузионного потока  $i$ -го компонента;  $\mathbf{J}_i = \rho D_i \operatorname{grad} Y_i$ ;  $N_s$  – число химических компонентов смеси газов;  $Q_v$  – мощность тепловыделения, обусловленная диссипативными процессами и нагревом от внешних источников энергии.

В данной работе используется кинетическая схема горения водорода в кислороде [3]. Эта кинетическая схема включает в себя 9 компонент и 25 обратимых реакций.

**2.2. Реализация параллельных вычислений**

Геометрия канала ГПВРД [4] и расчетная сетка приведены на рис. 1. В воздухозаборнике по вертикали сетка содержит 25 узлов, по горизонтали – 43 узла. В камере сгорания по вертикали сетка содержит 35 узлов, по горизонтали – 247 узлов. Вся расчетная сетка по горизонтали разбита на 66 блоков. При расчетах каждому блоку сопоставлен процесс многомашинного вычислительного комплекса МВК 2 ИПМех РАН. Обмен данными между процессами осуществляется при помощи протокола MPI.

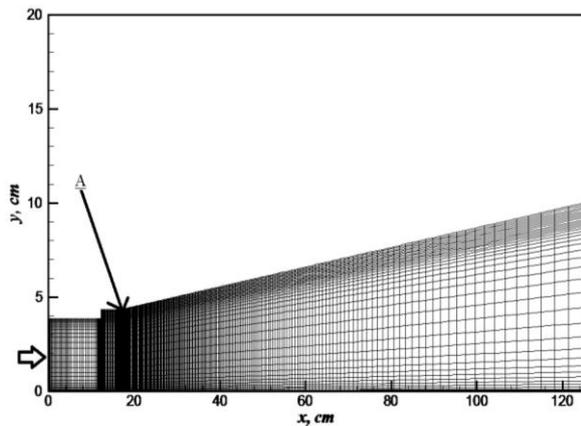


Рис. 1. Геометрия и расчетная сетка канала модельного ГПВРД

На вход в камеру со скоростью  $v_0 = 128149.4$  см/с подается воздушная смесь азота (78%) и кислорода (22%) при давлении  $p_0 = 980260.6$  эрг/см<sup>3</sup> и температуре  $T_0 = 1015.556$  К. В точке А, под углом 15 градусов к скорости потока с той же скоростью ( $v_w = v_0$ ) производится вдув смеси водорода (50%) и кислорода (50%) с давлением  $p_w = 0.3 \times p_0$  при температуре  $T_w = 500$  К.

**3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ**

На рис. 2 и 3 приведены распределения концентраций H<sub>2</sub>O и OH в канале модельного ГПВРД [4] соответственно.

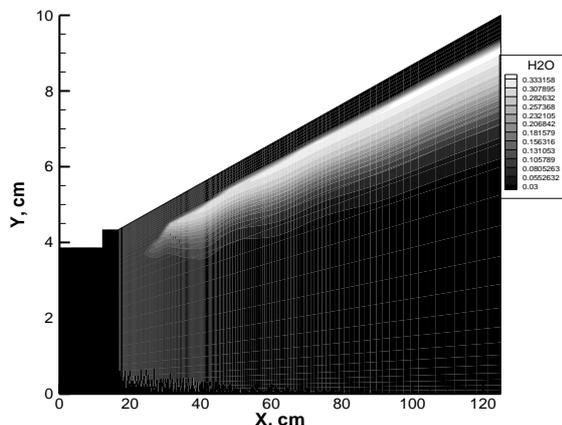


Рис. 2. Распределение концентрации воды в канале модельного ГПВРД

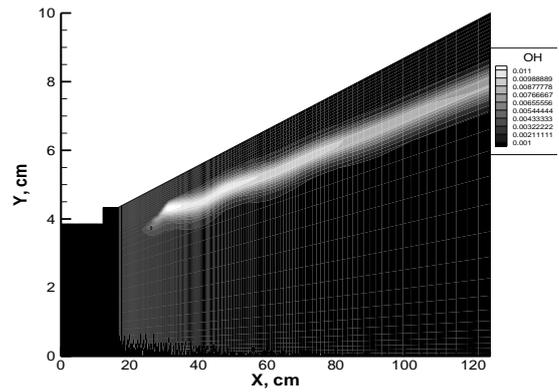


Рис. 3. Распределение концентрации OH в канале модельного ГПВРД

На рис. 4, 5, 6 и 7 приведены поля плотности, числа Маха, давления и температуры, полученные в данном расчете соответственно.

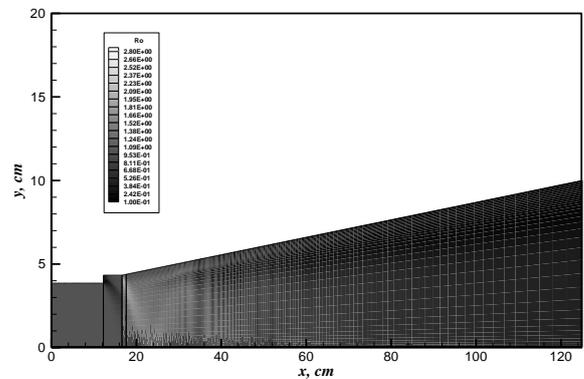


Рис. 4. Плотность

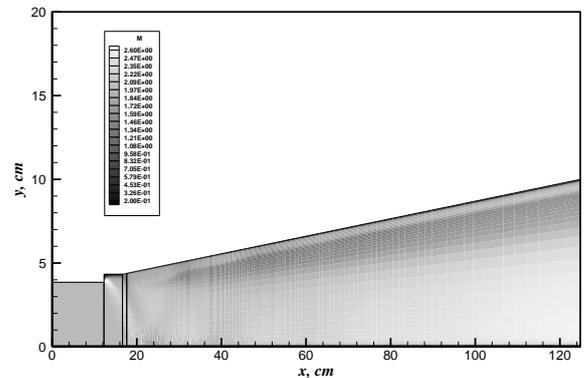


Рис. 5. Число Маха

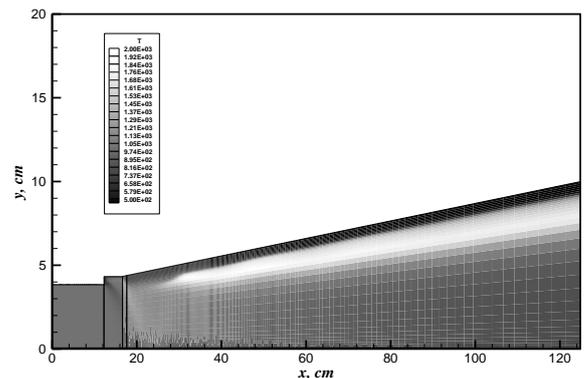


Рис. 6. Температура

Представленные распределения свидетельствуют о воспламенении и горении водорода в воздухе, хотя шлейф пламени распределен вдоль верхней стенки сопла. На рис. 4 и 6 можно различить ударные волны, которые отражаются от стенок камеры.

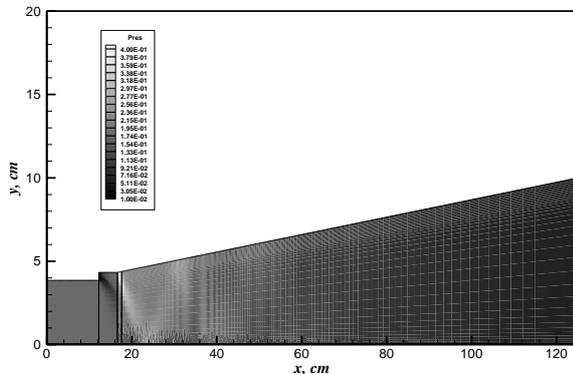


Рис. 7. Давление

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе кода NERAT [2], реализованы параллельные вычисления для многомашинного комплекса МВК 2 ИПМех РАН, моделирующие воспламенение и горение водорода в воздухе в камере сгорания модельного ГПВРД. Данная работа является продолжением исследований, выполненных в лаборатории радиационной газовой динамики ИПМех РАН [5-24] в области создания компьютерных моделей аэротермодинамики гиперзвуковых летательных аппаратов.

Работа выполнена в рамках программы фундаментальных исследований РАН.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- $x, y$  – декартовы координаты  
 $V$  – скорость потока  
 $u, v$  – проекции скорости на оси  $x, y$   
 $\mu$  – динамический коэффициент вязкости смеси  
 $\rho$  – плотность смеси  
 $p$  – давление смеси  
 $T$  – температура  
 $\lambda$  – коэффициент теплопроводности смеси  
 $c_p$  – удельная теплоемкость смеси при постоянном давлении,  
 $Y_i$  – массовая доля  $i$ -го компонента смеси  
 $c_{p,i}$  – удельная теплоемкость при постоянном давлении  $i$ -го компонента смеси  
 $h_i$  – энтальпия  $i$ -го компонента смеси  
 $\rho_i$  – плотность  $i$ -го компонента смеси,  
 $\dot{\omega}_i$  – массовая скорость химических превращений для  $i$ -го компонента смеси  
 $D_i$  – эффективный коэффициент диффузии для  $i$ -го компонента смеси  
 $J_i$  – плотность диффузионного потока  $i$ -го компонента  
 $N_s$  – число химических компонентов смеси  
 $Q_v$  – мощность тепловыделения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ЦИАМ 2001-2005. Основные результаты научно-технической деятельности. Том I/Колл. авторов/Под общей научной редакцией В.А. Скибина, В.И. Солонина, М.Я. Иванова. – М.: ЦИАМ, 2005. – 472 с. ISBN 5-94049-016-6.

2. Суржиков С.Т. Актуальные проблемы механики. Физико-химическая механика жидкостей и газов. М.: Наука. 2010. 350 с.
3. Michael Frenklach, Hai Wang, Martin J. Rabinowitz. Optimization and analysis of large chemical kinetic mechanisms using the solution mapping method—combustion of methane // Progress in Energy and Combustion Science. 1992. V. 18. № 1. Pp. 47–73.
4. A.D. Cutler, P.M. Danehy, R.R. Springer, S.O', Byrne, D.P. Capriotti, and R. Deloach. Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopic Thermometry in a Supersonic Combustor // AIAA Journal. 2003. V. 41. № 12, Pp. 2451–2459.
5. Железнякова А.Л., Суржиков С.Т. Расчет дозвукового обтекания локальной области тепловыделения // Физико-химическая кинетика в газовой динамике, 2008. Т.7. <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2008-09-01-034.pdf>
6. Железнякова А.Л., Суржиков С.Т. Численное моделирование гиперзвукового обтекания цилиндра // Физико-химическая кинетика в газовой динамике, 2008. Т.7. <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2008-09-01-035.pdf>
7. Железнякова А.Л., Суржиков С.Т. Поле течения около космического аппарата Fire II под углом атаки. // Физико-химическая кинетика в газовой динамике, 2010. Т.9. <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2010-01-12-020.pdf>
8. Железнякова А.Л., Суржиков С.Т. Численное моделирование гиперзвукового обтекания модели летательного аппарата X-43. // Физико-химическая кинетика в газовой динамике, 2011. Т.11. <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2011-02-01-030.pdf>
9. Железнякова А.Л., Суржиков С.Т. Построение двумерных неструктурированных сеток методом молекулярной динамики. // Физико-химическая кинетика в газовой динамике, 2011. Т.11. <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2011-02-01-031.pdf>
10. Железнякова А.Л. Метод расщепления по физическим процессам для решения задач гиперзвуковой аэродинамики на неструктурированных сетках // Физико-химическая кинетика в газовой динамике, 2013. Т.15. <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2013-04-29-10.pdf>
11. Иванов И.Э., Крюков И.А., Тимохин М.Ю. Численное моделирование ударно-волновых течений с помощью моментных уравнений // Физико-химическая кинетика в газовой динамике, 2011, Т.11. <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2011-02-01-010.pdf>
12. Глушко Г.С., Иванов И.Э., Крюков И.А. Моделирование турбулентности в сверхзвуковых струйных течениях // Физико-химическая кинетика в газовой динамике, 2010, Т.9. <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2010-01-12-023.pdf>
13. Глушко Г.С., Иванов И.Э., Крюков И.А. Численное моделирование отрывных течений в соплах // Физико-химическая кинетика в газовой динамике, 2010, Т.9. <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/010-01-12-024.pdf>
14. Ермаков М.К. Исследование возможностей матричных методов для решения уравнений Навье–Стокса // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2010. Т.9. <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2010-01-12-031.pdf>
15. Котов М.А., Кузенов В.В. Создание сложных поверхностей гиперзвуковых летательных аппаратов системами САПР // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2010. Т.9. <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2010-01-12-039.pdf>
16. Суржиков С.Т. Перспективы многоуровневого подхода к задачам компьютерной аэрофизики // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2008. Т. 7. <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2008-09-01-002.pdf>
17. Суржиков С.Т. Методы Монте-Карло в задачах расчета направленной излучательной способности струи продуктов сгорания // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2008. Т.7. <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2008-09-01-008.pdf>

18. Дикалюк А.С., Суржиков С.Т. Применение прогонки четвертого порядка точности для решения двумерного уравнения Пуассона // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2008. Т.7. <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2008-09-01-036.pdf>
19. Суржиков С.Т. Расчет обтекания модели космического аппарата MSRO с использованием кодов NERAT-2D и NERAT-3D // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2010. Т.9. <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2010-01-12-003.pdf>
20. Дикалюк А.С., Суржиков С.Т. Сравнение прогонки четвертого и второго порядков точности на примере задачи, имеющей аналитическое решение // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2010. Т.9. <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2010-01-12-037.pdf>
21. Французов М.С., Кузенов В.В. Модификация метода коррекции потоков для задач газовой динамики // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2008. Т.7. <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2008-09-01-041.pdf>
22. Моисеев К.В., Кузенов В.В. Численный анализ одномерной задачи Стефана при лазерном воздействии на металлические преграды // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2008. Т.7. <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2008-09-01-042.pdf>
23. Кузенов В.В., Филипский М.В. Численное моделирование отдельных теплофизических параметров лазерной плазмы // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2010. Т.9. <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2010-01-12-021.pdf>
24. Кузенов В.В. Использование регулярных адаптивных сеток для анализа импульсных сверхзвуковых струй плазмы // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2008. Т.7. <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2008-09-01-016.pdf>