



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 97 за 2017 г.



ISSN 2071-2898 (Print)
ISSN 2071-2901 (Online)

**Власенко В.В., Жуков В.Т.,
Новикова Н.Д., Феодоритова О.Б.**

Численное моделирование
характерных режимов
работы камеры сгорания
высокоскоростного
летательного аппарата

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Численное моделирование характерных режимов работы камеры сгорания высокоскоростного летательного аппарата / В.В.Власенко [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2017. № 97. 32 с. doi:[10.20948/prepr-2017-97](https://doi.org/10.20948/prepr-2017-97)
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2017-97>

Ордена Ленина
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В. Келдыша
Российской академии наук

В.В. Власенко, В.Т. Жуков, Н.Д. Новикова, О.Б. Феодоритова

Численное моделирование
характерных режимов работы камеры сгорания
высокоскоростного летательного аппарата

Москва – 2017

Власенко В.В., Жуков В.Т., Новикова Н.Д., Феодоритова О.Б.

Численное моделирование характерных режимов работы камеры сгорания высокоскоростного летательного аппарата

В работе рассматриваются течения в модельной камере сгорания прямоточного воздушно-реактивного двигателя со сверхзвуковым потоком на входе. На основе уравнений Навье-Стокса реагирующей многокомпонентной среды исследуются режимы горения в зависимости от расхода углеводородного топлива. Расчеты проведены в двумерной постановке с помощью пакета OpenFOAM с использованием суперкомпьютера К-100. Получено, что в зависимости от расхода топлива возможны стационарные и колебательные режимы горения. Результаты качественно согласуются с известными расчетными и экспериментальными данными.

Ключевые слова: математическое моделирование, высокоскоростная камера сгорания, углеводородное топливо, OpenFOAM

Vladimir Victorovich Vlasenko, Victor Timofeevich Zhukov, Natalia Dmitrievna Novikova, Olga Borisovna Feodoritova

Numerical simulation of different regimes of high-speed combustion chamber

The flows in a model combustion chamber of a ramjet/scramjet engine with supersonic flow at the inlet are considered. The influence of the hydrocarbon fuel consumption on the combustion processes is studied based on Navier-Stokes equations of a reacting multicomponent flows. Numerical 2D simulation is performed on the K-100 supercomputer by means of OpenFOAM. It is obtained that depending on the fuel consumption the stationary and pulsating combustion processes are possible. The results agree qualitatively with known calculated and experimental data.

Key words: mathematical simulation, high-speed combustor; hydrocarbon fuel, OpenFOAM

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-71-30014).

Введение

Проблема численного моделирования процессов горения топлива в прямоточных воздушно-реактивных двигателях актуальна в связи с перспективами развития гиперзвуковых летательных аппаратов. В данной работе рассматривается модельная камера сгорания, представляющая собой канал с переменным поперечным прямоугольным сечением. Первый участок канала – воздухозаборник (изолятор), затем после небольшого ступенчатого расширения идет участок собственно камеры сгорания постоянного поперечного сечения. В камеру подается углеводородное топливо в газовой фазе. Экспериментальные исследования камеры проведены в ЦАГИ [1] – [2], а расчеты в разных постановках и с помощью различных численных моделей представлены в [3] – [9]. Данная работа продолжает расчетные исследования [5] – [9] данной камеры на основе открытого пакета OpenFoam.

На входе в канал задается сверхзвуковой поток подогретого воздуха, содержащий продукты сгорания углеводородного топлива. Число Маха в ядре потока $M \sim 2.5$. В середине изолятора располагаются инжекторы углеводородного топлива. Для обеспечения зажигания смеси использовано кратковременное запираение канала потоком сжатого воздуха, подача которого осуществляется поперек основного потока с помощью пневмодросселя.

В экспериментах варьировались значения интегрального коэффициента избытка окислителя α с помощью регулирования расхода топлива, и при различных значениях параметра α получалась или стабилизация горения, или происходил срыв горения и уход пламени вниз по потоку. Предлагаемая работа посвящена моделированию и анализу режимов работы модельной камеры сгорания в зависимости от значений интегрального коэффициента избытка воздуха.

Для проведения численных экспериментов использован открытый пакет OpenFOAM (версия 2.3.1) [10]. Предварительно нами проанализированы возможности этого программного комплекса для моделирования

высокоскоростных течений в задачах внешних и внутренних течений в двумерной и трехмерной постановках [5] – [7], моделирования течений реагирующих многокомпонентных сред с верификацией двумерных расчетов демонстрацией сходимости приближенных решений при измельчении сетки [8]. Для достижения соответствия принятой математической постановке в оригинальный код внесены некоторые модификации и изменения, как на макроуровне языка OpenFoam, так и на уровне языка C++. Подробнее со сделанными дополнениями можно ознакомиться в работе [9].

Результаты расчетов с помощью OpenFoam показывают принципиальную возможность его использования для расчетов высокоскоростных течений как не реагирующих, так и реагирующих многокомпонентных смесей. В настоящей работе фактически приведена работоспособная численная методология на основе OpenFoam, с указанием необходимых модулей (решателей), последовательности их применения и требований к качеству и уровню измельчения сетки.

Расчеты проведены в двумерной постановке на многопроцессорном суперкомпьютере K-100 [11], использованы средства для работы с графикой Paraview, а также библиотека MPI для коммуникации между вычислительными узлами. Расчетная методология является трехэтапной (последовательно выполняются однокомпонентный, многокомпонентный «холодный» расчеты до установления и только затем расчет с горением углеводородного топлива). Даже двумерные расчеты являются трудными и продолжительными, время счета исчисляется неделями. Трехмерные расчеты потребуют гораздо больше времени.

1. Математическая модель

Расчеты течений газовой смеси проводятся на основе системы осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса с введением дополнительных членов и уравнений для учета эффектов турбулентности,

переноса химических компонентов и горения [12] (ниже по повторяющимся индексам предполагается суммирование):

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} &= 0, \\
\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} &= -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\tau_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \right), \\
\frac{\partial(\rho h_s)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j h_s)}{\partial x_j} + \frac{\partial(\rho K)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j K)}{\partial x_j} - \frac{\partial p}{\partial t} &= \\
&= \frac{\partial(u_j \tau_{ij})}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\chi \frac{\partial h_s}{\partial x_j} \right) + \sum_{m=1}^{N_s} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\chi h_{s,m} \frac{\partial Y_m}{\partial x_j} \right) + S_h, \\
\frac{\partial(\rho Y_m)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j Y_m)}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\mu + \mu_t) \frac{\partial Y_m}{\partial x_j} \right) + \dot{\omega}_m,
\end{aligned} \tag{1}$$

(m – индекс компонента смеси, $m = 1, \dots, N_s$).

Система уравнений (1) представляет законы сохранения массы, импульса, полной энергии и переноса химических компонентов. Для описания турбулентности использована SST-модель Ментера, включающая два дифференциальных уравнения для транспорта удельной кинетической энергии турбулентности k и удельной скорости диссипации турбулентной энергии ω . Эта модель хорошо известна и описана в литературе [13] - [14], поэтому мы не приводим здесь сами уравнения.

В уравнениях (1) обозначено: $\vec{u} = \{u_i\}$ – вектор скорости осредненного течения; ρ – плотность; p – давление; K – кинетическая энергия, τ_{ij} – компоненты тензора диффузионных потоков импульса. Эти компоненты могут быть записаны в виде

$$\tau_{ij} = (\mu + \mu_t) \left[(\partial u_i / \partial x_j + \partial u_j / \partial x_i) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \partial u_k / \partial x_k \right],$$

где δ_{ij} – символ Кронекера, μ и μ_t – коэффициенты молекулярной и турбулентной вязкости соответственно.

Для описания химического состава смеси используются следующие обозначения: N_s – количество компонентов в смеси; Y_m – массовая доля компонента сорта m смеси, т.е. $Y_m = \rho_m / \rho$, где ρ_m – парциальная плотность.

Справедливо равенство

$$\sum_{m=1}^{N_s} Y_m = 1. \quad (2)$$

Закон сохранения полной энергии в системе (1) записан относительно энтальпийной функции

$$h_s = \sum_{m=1}^{N_s} Y_m h_{s,m}(T), \quad (3)$$

где s – символ (от английского sensible), а не целочисленный индекс. Полная энтальпия смеси h записывается в виде

$$h = e + \frac{p}{\varrho} = \sum_{m=1}^{N_m} Y_m h_m$$

и ее можно представить как $h = h_s + h_c$, где

$$h_c = \sum_{m=1}^{N_s} Y_m h_{c,m}, \quad (4)$$

причем в (3) $h_{s,m} = h_{s,m}(T)$ – функция, а в формуле (4) $h_{c,m}$ – числовой параметр, это удельная энтальпия образования m – го компонента при стандартной температуре $T_0 = 298^\circ \text{K}$. Здесь c – символ (от английского chemical).

Использование понятия энтальпии облегчает решение задачи расчета многокомпонентных химически реагирующих систем, так как задает уровень отсчета энергии.

Правая часть энтальпийного уравнения содержит вязкий, тепловой и диффузионный потоки, а также источник S_h . Коэффициент

$$\chi = C_V((1.32 + 1.77 R/C_V)\mu + \mu_t/Pr_t) \quad (5)$$

используется для задания коэффициента теплопроводности смеси и коэффициентов диффузии компонентов; в формуле (5) обозначено:

$$\mu = 1.46 \cdot 10^{-6} T^{1.5}/(T + 122)$$

– динамическая вязкость воздуха, зависящая от температуры по закону Сазерленда; Pr_t – турбулентное число Прандтля (можно считать, что $Pr_t=1$); R – универсальная газовая постоянная; C_V – удельная теплоемкость при постоянном объеме, $(1.32 + 1.77 R/C_V)$ – модифицированная поправка Эйкена к коэффициенту теплопроводности для смеси многоатомных газов.

Система уравнений (1) дополняется уравнением состояния для смеси идеальных газов

$$p = (\sum_{m=1}^{N_s} Y_m R/W_m)\rho T,$$

где W_m – молярная масса [кг/моль] m – го компонента, и калорическими уравнениями состояния для удельной энтальпии $h_{s,m}$ каждого из m компонент смеси:

$$h_{s,m}(T) = \int_{T_0}^T C_{p,m} dT.$$

Здесь $C_{p,m}(T)$ – парциальная изобарная (при постоянном давлении) теплоёмкость m – го компонента. Удельная теплоемкость смеси имеет вид

$$C_p = \sum_{m=1}^{N_s} Y_m C_{p,m}(T).$$

В систему уравнений (1) входит источниковый член $\dot{\omega}_m$, представляющий собой интенсивность производства частиц (атомов, молекул, радикалов) сорта m за счет химических реакций:

$$\dot{\omega}_m = W_m \sum_{j=1}^{N_r} \dot{\omega}_{mj};$$

Здесь N_r – общее количество реакций, $\dot{\omega}_{mj}$ – стехиометрические коэффициенты вещества сорта m в j -ой реакции. Эти коэффициенты положительны для продуктов реакции, отрицательны для реагентов и имеют вид:

$$\dot{\omega}_{mj} = (v''_{mj} - v'_{mj}) f(M_j) \left(k_{fj} \prod_{t=1}^{N_s} \left(\frac{\rho Y_t}{W_t} \right)^{v'_{tj}} - k_{bj} \prod_{t=1}^{N_s} \left(\frac{\rho Y_t}{W_t} \right)^{v''_{tj}} \right), \quad (6)$$

где v'_{mj}, v''_{mj} – молярные стехиометрические коэффициенты реакций в используемой кинетической схеме, k_{fj}, k_{bj} – коэффициенты скорости прямой и обратной реакции соответственно, $f(M_j)$ – коэффициент, учитывающий наличие дополнительной частицы M_j . Если в реакции, кроме химически реагирующих компонентов присутствует такая дополнительная частица, которая не меняется в ходе превращения, но участвует в энергетическом балансе реакции (что, например, характерно для реакций диссоциации и рекомбинации), тогда множитель $f(M_j)$ равен молярно-объемной концентрации компонента M_j : $f(M_j) = [M_j]$. Тогда уравнение реакции записывается в виде

$$\sum_{m=1}^{N_s} v'_{mj} C_m \rightleftharpoons \sum_{m=1}^{N_s} v''_{mj} C_m + M_j,$$

где символы C_m , как и M_j , обозначают наименования химических компонентов (O_2, H_2, CO, H и т.п.), а выражение в квадратных скобках вида $[C_m]$ обозначает молярно-объемную концентрацию компонента, [моль/м³]. Для компонента M_j концентрация вычисляется согласно правилу

$$[M_j] = \sum_{k=1}^{N_s} \gamma_{kj} [C_k].$$

Коэффициенты γ_{kj} являются составной частью кинетической схемы. Если в реакции нет дополнительной частицы, то в формуле (6) $f(M_j) = 1$.

Так как во всех химических реакциях полная масса не изменяется, то

$$\sum_{m=1}^{N_s} \dot{\omega}_m = 0. \quad (7)$$

Дополнительный член S_h в уравнении энтальпии (см. (1)) учитывает изменения энергии за счет протекания химических реакций и определяется по формуле

$$S_h = - \sum_{m=1}^{N_s} h_{c,m} \dot{\omega}_m,$$

где $h_{c,m}$ – числовой параметр в формуле (4).

Для каждого компонента смеси зависимость удельной теплоемкости от температуры задается многочленом, аппроксимирующим известные термодинамические таблицы в нужном диапазоне:

$$\frac{c_{p,m}}{R_m} = a_{0,m} + a_{1,m}T + a_{2,m}T^2 + a_{3,m}T^3 + a_{4,m}T^4, \quad R_m = R/W_m. \quad (8)$$

Термодинамические характеристики (энтальпии компонент и др.) аппроксимируются многочленами второй степени. Коэффициенты этих многочленов, как и многочлена (8), считаются заданными и постоянными во всем диапазоне температур, достигаемых в процессе расчета.

Для описания химических реакций используется редуцированный механизм, состоящий из одной квазиглобальной реакции частичного окисления условного газофазного углеводородного топлива C_mH_n и 11 элементарных обратимых реакций для девяти химических компонентов: O_2 , N_2 , H_2 , CO , H , H_2O , O , OH , CO_2 . Зависимость констант k_{fj} , k_{bj} скоростей реакции в (6) от температуры описывается модифицированным законом Аррениуса вида:

$$k(T) = A T^n \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right),$$

где A – предэкспоненциальный множитель, n – температурный показатель степени, E_a – энергия активации. Эти три параметра считаются постоянными и

определяются из физико-химических расчетов при разработке кинетического механизма [15].

2. Вычислительная постановка задачи

Вычислительные эксперименты проводятся на основе открытого пакета OpenFOAM. Свойства пакета OpenFoam многократно указывались многочисленными авторами. По этой причине мы не будем останавливаться как на подробном описании вычислительных подходов, принятых в этом пакете, так и на принципах его программной реализации. Желающие ознакомиться с деталями вычислительного и рабочего процесса могут, например, обратиться к публикациям [16] - [17]. Сделаем некоторые замечания относительно принятых в OpenFoam вычислительных решений при расчете химически реагирующих сред.

Первое замечание относится к вопросу о переопределенности системы транспортных уравнений для многокомпонентной среды. Эти уравнения линейно-зависимы, так как справедливы соотношения (2) и (7), что приводит к переопределенности системы (1) – уравнений становится больше, чем алгебраически независимых переменных. Возможны следующие решения этой проблемы:

1. Замена в системе (1) одного из уравнений для компонента Y_m алгебраическим соотношением, следующим из определения (для этого в состав смеси вводится дополнительный компонент – «инертный газ»):

$$Y_k = 1 - \sum_{m \neq k} Y_m.$$

2. Расчет на каждом шаге по времени переопределенной системы так, как если бы переменные Y_m были независимыми. После каждого шага должна проводиться коррекция, обеспечивающая выполнение условия (2). Пусть Y_m – массовые доли до коррекции, \tilde{Y}_m – после коррекции, $m = 1, \dots, N_s$. Коррекция,

сохраняющая пропорции компонентов и гарантирующая от смены знака, выглядит следующим образом

$$\tilde{Y}_m = Y_m / \sum_{k=1}^{N_s} Y_k.$$

3. Так же, как и в предыдущем случае, расчет переопределенной системы на каждом временном шаге выполняется в предположении независимости переменных Y_m , но при этом коррекция не производится (по крайней мере, на каждом временном шаге). Вместо этого рассчитывается величина дисбаланса

$$\varepsilon_Y = \left| 1 - \sum_{m=1}^{N_s} Y_m \right|,$$

служащая количественной апостериорной оценкой погрешности расчетной схемы. В случае, если величина дисбаланса превышает заданное значение, могут приниматься решения по коррекции перед дальнейшим расчетом или по пригодности численной схемы.

В OpenFoam используется первый из описанных вариантов. Мы в своих вычислительных экспериментах использовали два решателя: сначала в модели идеального газа рассчитывали газодинамическое течение в канале (решатель sonicFOAM). Затем полученное решение использовалось в качестве начального приближения для расчета многокомпонентной реагирующей среды (решатель reactingFOAM).

В основе обоих решателей лежит алгоритм PIMPLE, который относится к алгоритмам SIMPLE типа и использует некоторые дополнительные корректирующие процедуры на каждом временном шаге для обеспечения сходимости. Счет ведется шагами по времени, и, несмотря на формальное использование в этих решателях неявных схем, нам приходится задавать существенное ограничение на временной шаг (для шага по времени, получаемого из оценки числа Куранта, брался коэффициент запаса ~ 0.5 , и даже меньше в ряде случаев).

Вычислительная постановка задачи подробно описана в [9]. Для удобства чтения кратко напомним основные детали.

В канал с обратным уступом (см. рис. 1) подается профилированный поток воздуха с примесью продуктов сгорания углеводородного топлива. В начальной части канала располагаются инжекторы (зона А на рис. 1), через которые впрыскивается условное углеводородное топливо. Поскольку условия самовоспламенения в канале не выполнены, для поджига используется пневмодроссель (зона В на рис. 1). Через его отверстия перпендикулярно основному потоку в течении короткого времени вдувается сжатый воздух, который запирает поток.

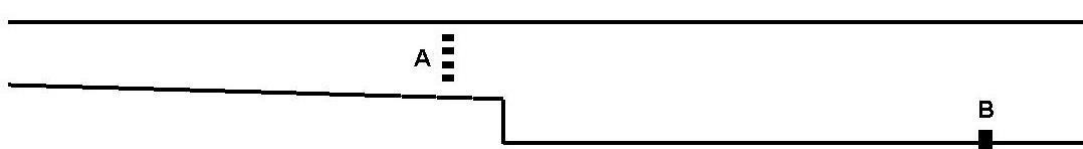


Рис. 1. Постановка задачи: А – зона впрыска топлива;
В – область дросселирования

В канале образуется скачок уплотнения, распространяющийся вверх по потоку и взаимодействующий с пограничными слоями на стенках канала, что приводит к образованию серии скачков уплотнения (псевдоскачок). В результате появляются зоны отрыва, тормозящие поток от сверхзвуковых скоростей (число Маха в ядре потока ~ 2.5) до дозвуковых. Мы рассматриваем три режима течения, соответствующих значениям интегрального коэффициента избытка окислителя $\alpha_1 = 1.34$, $\alpha_2 = 1.99$, $\alpha_3 = 2.45$. Полный расход топлива для каждого из трех рассмотренных вариантов составляет $G_1 \approx 1.315$, $G_2 \approx 0.886$, $G_3 \approx 0.719$ кг/сек. Интегральный коэффициент избытка окислителя определяется по расходам окислителя (кислорода) и горючего. Он равен частному двух отношений: массовых долей горючего и окислителя в стехиометрической смеси и отношения их массовых долей в поджигаемой

смеси. Варьирование коэффициента избытка окислителя представляет интерес, так как для высокоскоростных камер сгорания, работающих на углеводородном и водородном топливе, наблюдается зависимость характера процесса горения (и тяги) от этого коэффициента.

В процессе продвижения псевдоскачка по каналу смесь загорается, а после выключения пневмодресселя и окончания переходного процесса режим горения или стабилизируется, или принимает колебательный характер, или срывается.

Все расчеты проводятся в прямоугольной области, внутри которой помещен исследуемый объект – канал с обратным уступом. Для моделирования выбрана десятикомпонентная смесь газов O_2 , N_2 , H_2 , CO , H , H_2O , O , OH , CO_2 , C_mH_n (условное углеводородное топливо).

На вход в канал подается подогретый воздух с продуктами углеводородного горения, что соответствует заданию следующих массовых долей компонентов смеси $Y_{O_2} \approx 0.245$, $Y_{N_2} \approx 0.589$, $Y_{CO_2} \approx 0.117$, $Y_{H_2O} \approx 0.047$, $Y_{CO} \approx 0.00043$. Состав подаваемого воздуха близок к составу воздуха при стандартных условиях.

На внешних границах вычислительной области для всех искомым функций, за исключением массовых долей Y_m смеси, ставятся условия равенства нулю производной по направлению нормали. Массовые концентрации на всех границах, кроме задней внешней границы (outlet), выбираются равными $Y_{CO} = Y_{C_mH_n} = Y_H = Y_{H_2} = Y_{H_2O} = Y_O = Y_{OH} = 0$, $Y_{CO_2} \approx 0.00041$, $Y_{O_2} \approx 0.765$, $Y_{N_2} \approx 0.234$. На всей поверхности канала задано условие прилипания $u=0$. Для давления, температуры и массовых долей заданы условия $\partial T / \partial \vec{n} = 0$, $\partial p / \partial \vec{n} = 0$, $\partial Y_m / \partial \vec{n} = 0$. Граничные условия на стенках канала для турбулентных величин k и ω ставились при помощи аппарата пристеночных функций. Начальные распределения всех полей однородны.

Расчеты проводились на блочно-структурной сетке, объем которой равнялся $\sim 6.6 \times 10^5$ ячейкам. Согласно предыдущему исследованию [9], для интересующей нас задачи сетка такого уровня измельчения достаточна для представительных результатов в рамках работы с решателями пакета OpenFoam.

Впрыск холодного топлива моделируется добавлением правых частей во все уравнения, за исключением уравнений сохранения импульса. При этом уравнения модифицируются только в четырех кластерах ячеек, моделирующих отверстия вдува газофазного топлива, которые располагаются на некотором расстоянии от входа канала. Параметры подаваемого топлива известны: массовая доля топлива $Y_{C_mH_n} = 1$, статическая температура $T_{C_mH_n}$, кинетическая энергия $K_{C_mH_n}$, параметры турбулентности $k_{C_mH_n}$, $\omega_{C_mH_n}$. Дополнительно задается полный расход топлива $G_{C_mH_n}$. Соответственно расход топлива через каждое отверстие составляет $G_{отв} = 0.25 G_{C_mH_n}$. Подача топлива производится со звуковой скоростью.

Процедура дросселирования моделируется изменением краевых условий в предписанном участке нижней границы канала. Дроссель работает в течении короткого времени $t_{дрос} = 8.32 \cdot 10^{-3} c$. Предполагается, что число Маха в потоке вдуваемого воздуха равно 1. Известны давление торможения $p_{total} = 8$ атм, температура торможения $T_{total} = 288$ К подаваемого воздуха, состав газа в струе сжатого воздуха: $Y_{CO_2} \approx 0.00041$, $Y_{O_2} \approx 0.765$, $Y_{N_2} \approx 0.234$. Параметры турбулентности в струе сжатого воздуха $k = 400 \text{ м}^2/\text{с}^2$, $\omega = 2200 \text{ 1/с}$.

Для описания кинетического механизма использована модель газофазного горения, состоящая из одиннадцати элементарных реакций и дополнительной прямой глобальной брутто-реакции окисления топлива до CO и H_2O , см. [18]. Эта глобальная реакция задается в нестандартной форме (множитель перед экспонентой зависит от давления). Для учета двухстадийного механизма самовоспламенения углеводородов постоянная реакции меняет свои параметры

при переходе через $T=T^*$. Как и в работе [3], эти параметры взяты из модели частичного окисления *n*-гептана, предложенной в [15], с температурной границей $T=1075$ K.

При расчете скоростей реакций используется модифицированная модель Аррениуса. Постоянные скоростей прямых и обратных реакций заданы и являются частью предложенной вычислительной модели [3]. Все рассуждения сделаны в рамках модели ламинарного горения, хотя можно ожидать существенного влияния турбулентности на характер течения и горения [19].

3. Результаты численных экспериментов

Нас интересует сравнительный анализ решений при изменении величины интегрального коэффициента избытка окислителя $\alpha_1 = 1.34$, $\alpha_2 = 1.99$, $\alpha_3 = 2.45$. Будем в дальнейшем называть задачи, соответствующие этому параметру, $task_{1.34}$, $task_{1.99}$ и $task_{2.45}$.

Первоначально мы изучали поведение решения на основе задачи $task_{1.34}$ [9]. Именно на примере этой задачи выработана полная методология вычислительного эксперимента. Сначала формируются газодинамические поля в рамках модели идеального газа на основе решателя `sonicFoam`. Второй этап начинается после установления решения. На этом этапе включается впрыск топлива, а решение, полученное на первом этапе, принимается в качестве начального приближения. Вместо модели идеального газа используется модель многокомпонентного химически реагирующего газа (решатель `reactingFoam`). После повторного установления решения начинает работать процедура дросселирования. Одновременно включаются модель горения и инициализируются все реакции. Весь процесс численного моделирования использует два решателя программного комплекса `OpenFoam` – `sonicFoam` и `reactingFoam`.

Таким образом, для каждого из трех интересующих нас вариантов процедура впрыска стартует с одних и тех же газодинамических полей. Ниже

на рис. 2 приведено поле градиента плотности (численная шпирен фотография). Показан результат расчета на установление в рамках модели идеального газа (решатель sonicFoam), и это решение является начальным приближением для расчета течений многокомпонентной среды.

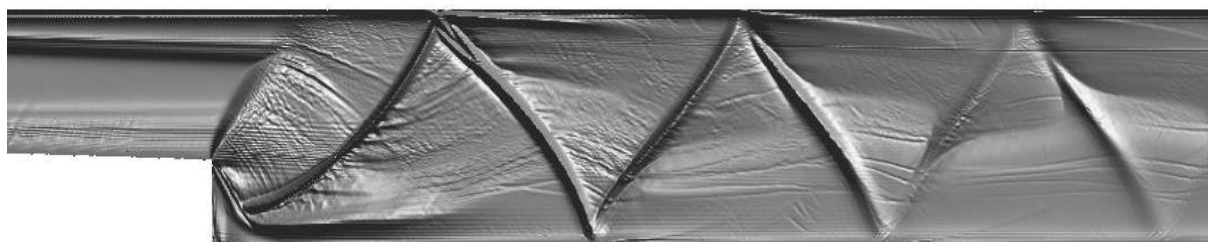


Рис. 2. Поле градиента плотности до включения подачи топлива

На следующем этапе моделирования включается подача топлива и проводится расчет течения многокомпонентной среды без химических реакций. На рис. 3 показаны установившиеся концентрации топлива $Y_{C_mH_n}$, наложенные на поля градиента плотности для вариантов максимального ($task_{1.34}$) и минимального ($task_{2.45}$) расхода топлива. Напомним, что буквы А и В на всех рисунках отмечают зону впрыска (А) и зону дросселирования (В).

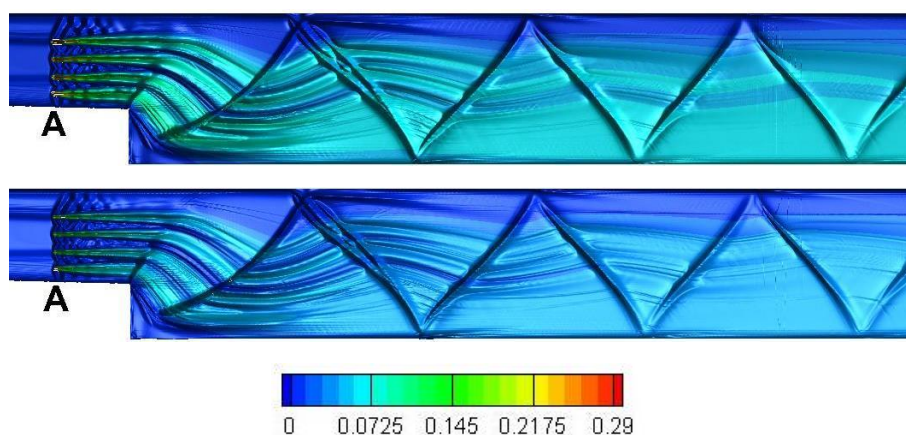


Рис. 3. Установившееся поле $Y_{C_mH_n}$ для многокомпонентной нереагирующей среды после включения впрыска (reactingFoam). Верхний рисунок соответствует задаче $task_{1.34}$, нижний – задаче $task_{2.45}$

Качественную картину, представленную на рис. 3, дополняют для всех трех вариантов профили $Y_{C_m H_n}$ на выходе из канала (рис. 4) и поле температуры на момент загорания (рис. 5). На рис. 4 видно, что характер распределения топлива по каналу качественно одинаков для всех задач – в нижней половине канала доля топлива достаточна для горения (превосходит значение, заданное интегральным коэффициентом избытка окислителя), а у верхней стенки топлива почти нет.

Во всех трех вариантах происходит загорание смеси. Увеличение коэффициента избытка окислителя отодвигает начало этого процесса: для задачи $task_{1.34}$ загорание происходит через $t = 2.3 \cdot 10^{-3} c$, для задачи $task_{1.99}$ – через $t = 3.2 \cdot 10^{-3} c$, а для задачи $task_{2.45}$ – через $t = 3.6 \cdot 10^{-3} c$.

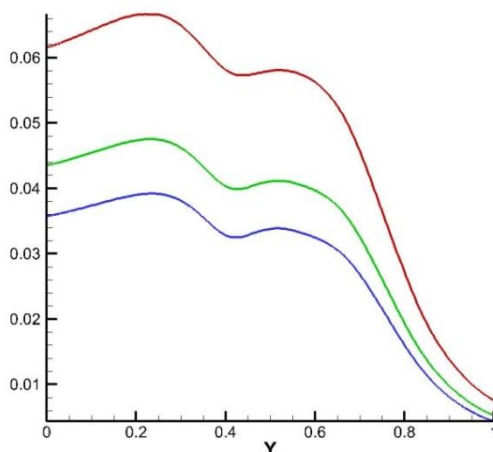


Рис. 4. Профиль $Y_{C_m H_n}$ на выходе из канала после включения впрыска и последующего установления. Красный цвет – $task_{1.34}$, зеленый – $task_{1.99}$, синий – $task_{2.45}$

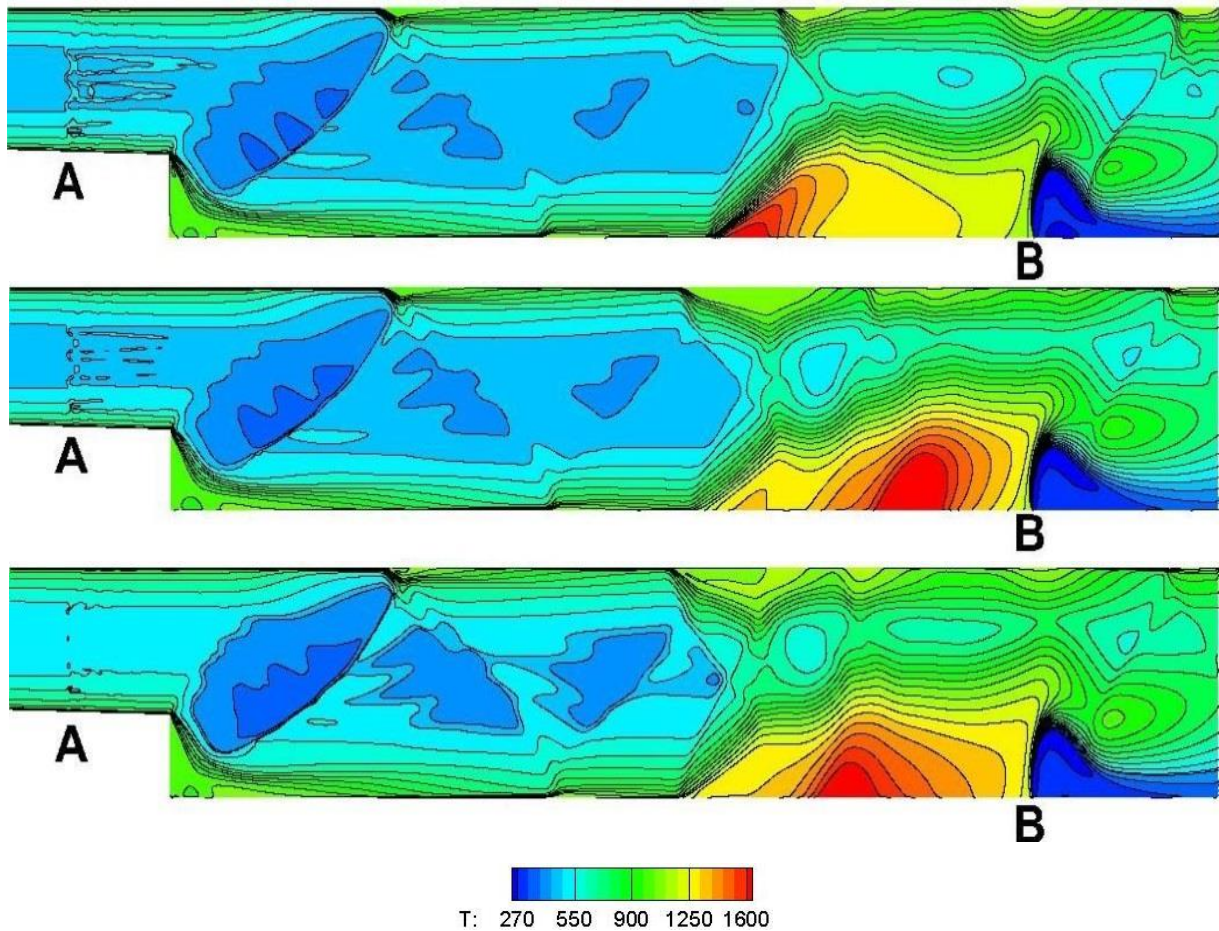


Рис. 5. Поле температуры на момент загорания. Верхний рисунок соответствует $task_{1.34}$, средний – $task_{1.99}$ и нижний – $task_{2.45}$

Максимальные достигаемые температуры для изображенных полей равны $T_{max} \approx 1700$ ($task_{1.34}$, вверху), $T_{max} \approx 2081$ ($task_{1.99}$, средний рисунок) и $T_{max} \approx 1850$ ($task_{2.45}$, внизу).

Приведем сравнительную газодинамическую структуру потока на момент загорания для всех вариантов. На рис. 6 показаны поля числа Маха и линии тока. Видно, что изменение коэффициента избытка окислителя несколько меняет динамику вихреобразования.

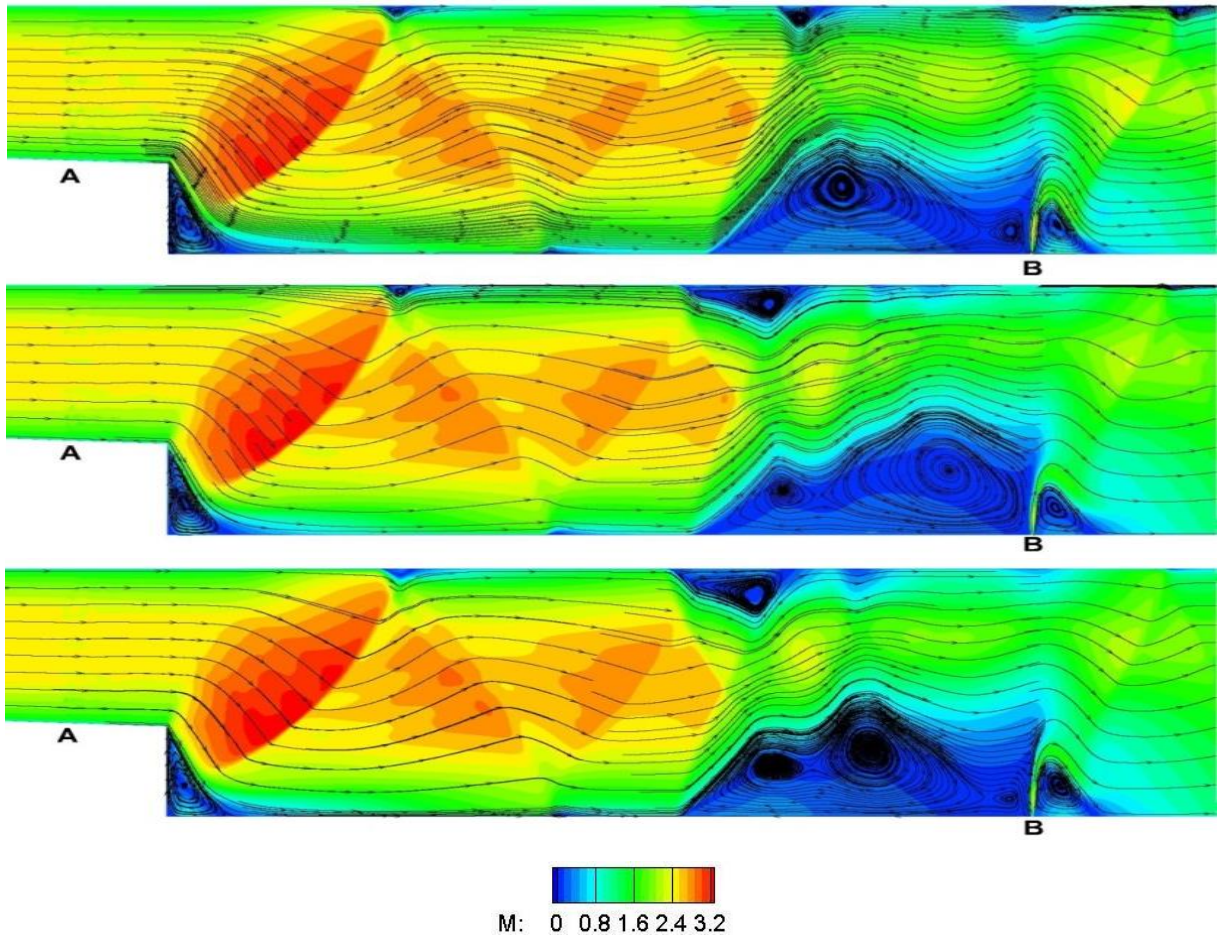


Рис. 6. Поле числа Маха и линии тока на момент загорания. Верхний рисунок соответствует $task_{1.34}$, средний – $task_{1.99}$ и нижний – $task_{2.45}$

Коэффициент избытка окислителя α существенно влияет на режим горения в камере. Изучим поведение во времени давления и температуры в трех точках (сенсорах) $p1, p2, p3$, см. рис. 7, расположенных внутри канала на пунктирной линии. Инжекторы размещены вдоль красной вертикальной линии.

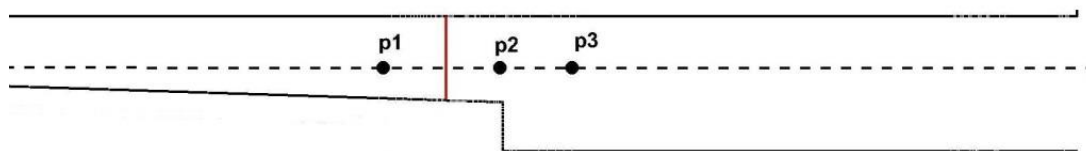


Рис. 7. Положение сенсоров $p1, p2, p3$

Нулевая отметка на оси абсцисс на графиках ниже соответствует моменту окончания дросселирования. На рис. 8–10 показано поведение во времени давления и температуры в сенсорах для рассматриваемых трех задач.

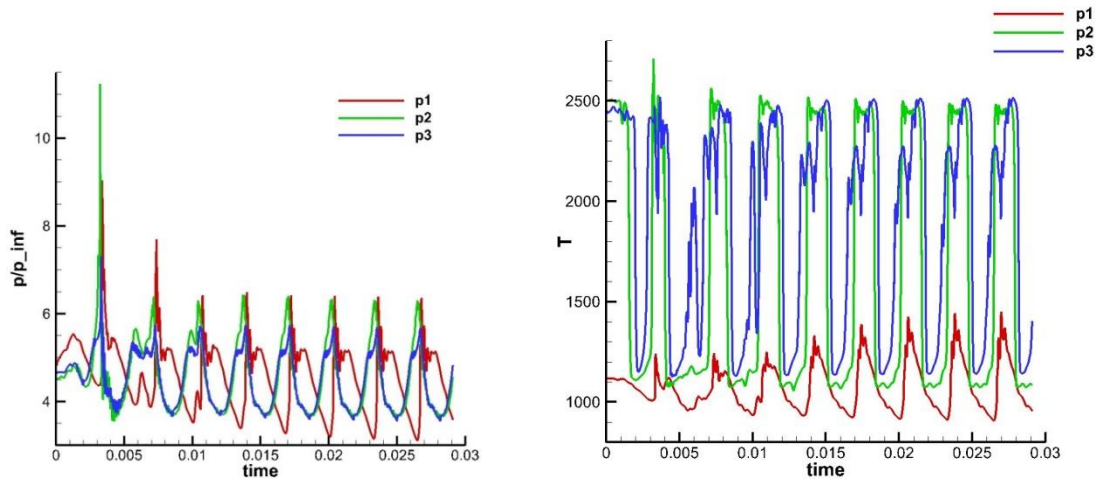


Рис. 8. Зависимость давления p/p_{inf} и температуры T от времени в точках $p1, p2, p3$ ($task_{1.34}$); $p_{inf} = 10^5$ Па

В случае максимального расхода топлива ($task_{1.34}$) наблюдается колебательный режим (рис. 8). Проходя через инжекторы в сторону входа в канал, волна сжатия проталкивает влево топливо, однако оно быстро сгорает, волна горения отстывает, в то время как волна сжатия продолжает двигаться в сторону входа в канал. Однако позднее волна горения снова достигает инжекторов. Процесс повторяется циклически, т.е. в камере сгорания возникает незатухающий режим с продольными колебаниями достаточно большой амплитуды. Период колебаний составляет примерно 0.003 сек, что близко к значению 0.0025 сек, полученному в ЦАГИ в работе [20].

При уменьшении расхода топлив колебательный режим не наблюдается (рис. 9, 10).

По-видимому, существенную роль играет взаимодействие псевдоскачка с процессом горения. Псевдоскачок формируется из-за запираания канала

поперечной струей воздуха в процессе дросселирования и поначалу псевдоскачок располагается вниз по потоку от места инъекции.

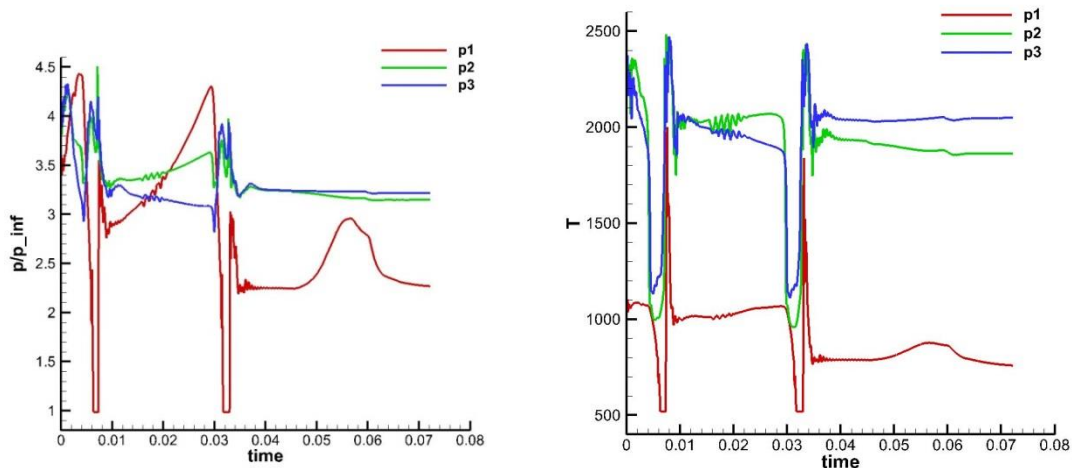


Рис. 9. Зависимость давления p/p_{inf} и температуры T от времени в точках $p1, p2, p3$ ($task_{1.99}$); $p_{inf} = 10^5$ Па

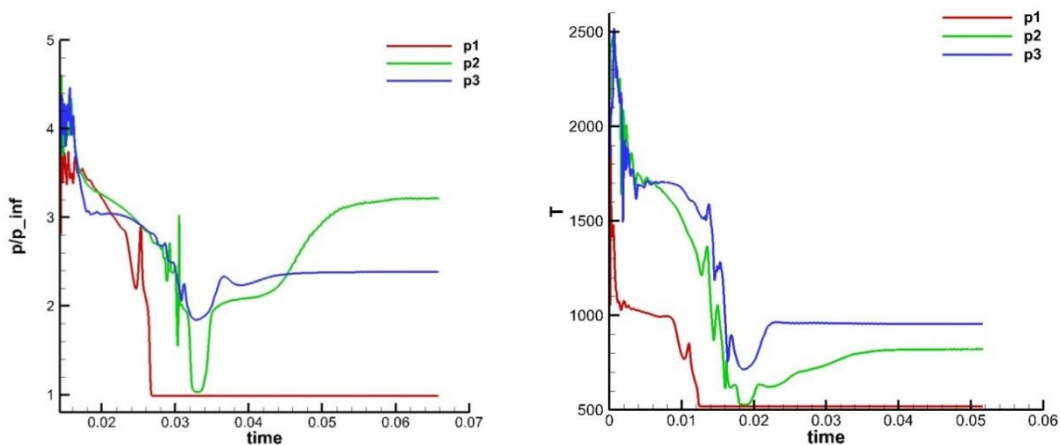


Рис. 10. Зависимость давления p/p_{inf} и температуры T от времени в точках $p1, p2, p3$ ($task_{2.45}$); $p_{inf} = 10^5$ Па

Затем в процессе горения псевдоскачок начинает двигаться. В случае задачи $task_{1.34}$ положение скачка не стабилизируется. На рис. 11.а и 11.б для задачи $task_{1.34}$ показан момент максимального продвижения псевдоскачка в

изоляторе (рис. 11.а – координата переднего фронта псевдоскачка у верхней стенки $x/L \approx 0.185$) и его минимального продвижения (рис 11.б – координата переднего фронта псевдоскачка у верхней стенки $x/L \approx 0.294$). В аналогичных расчетах ЦАГИ были получены значения $x/L \approx 0.073$ и $x/L \approx 0.182$.

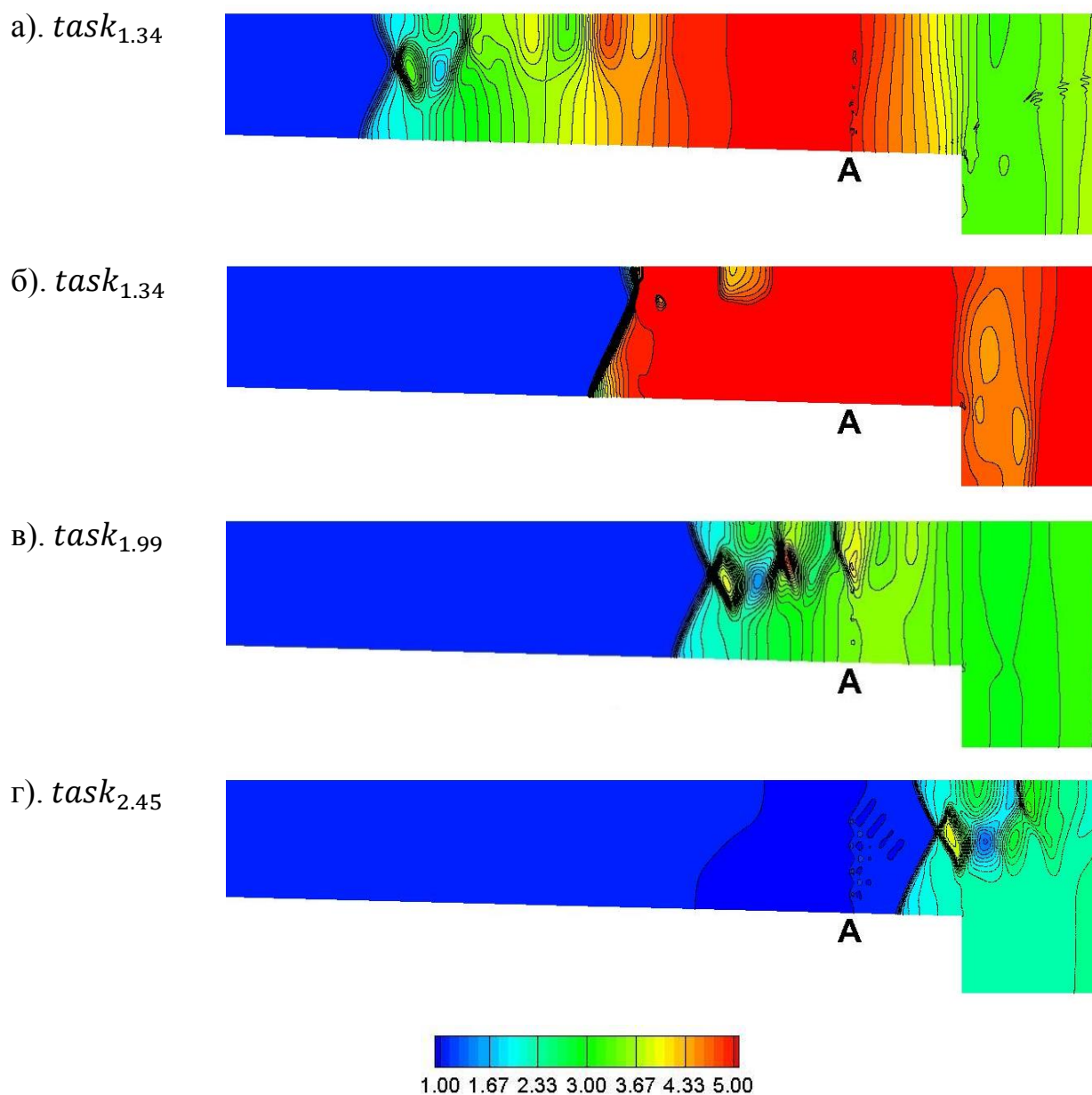


Рис. 11. Поле давления p/p_{inf} : а). $task_{1.34}$ – максимальное продвижение псевдоскачка в изоляторе; б). $task_{1.34}$ – минимальное продвижение псевдоскачка в изоляторе; в). $task_{1.99}$; г). $task_{2.45}$

При уменьшении расхода топлива система ударных волн ослабляется. На рис. 11(в, г) показано положение псевдоскачка для задач $task_{1.99}$ и $task_{2.45}$ на последний момент времени расчета, который соответствует времени установления течения.

Приведем для задачи с максимальным расходом топлива ($task_{1.34}$) картину распределения топлива вдоль канала для двух моментов времени (рис. 12). Верхний рисунок соответствует моменту достижения максимальной температуры в точке $p2$, а нижний – минимальному значению в той же точке.

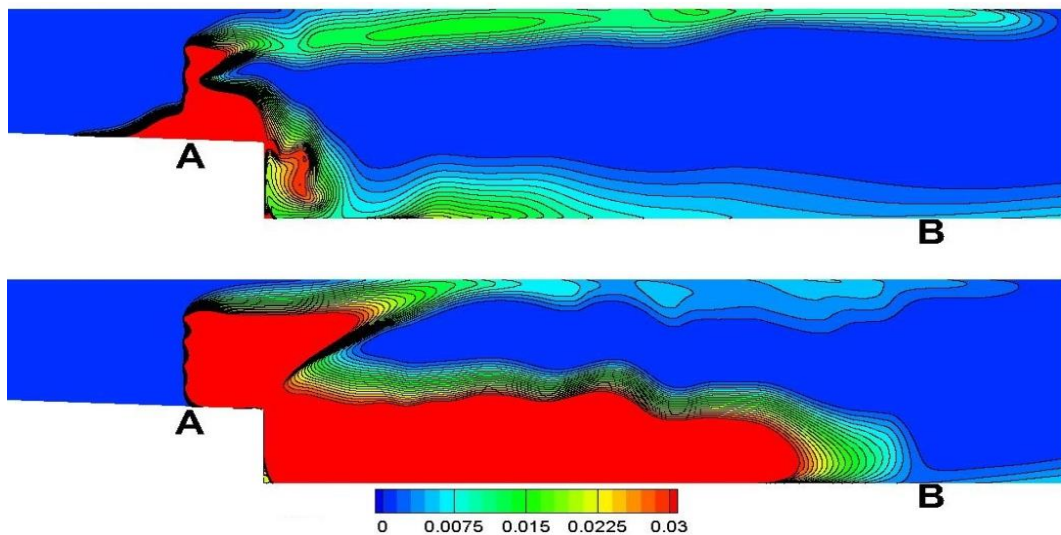


Рис. 12. Концентрация $Y_{C_m H_n}$ на момент достижения максимальной (вверху) и минимальной (внизу) температуры; $task_{1.34}$

Дополним общую картину полем продольной компоненты скорости U_x (рис. 13) и температуры T (рис. 14) в те же моменты достижения максимальной и минимальной температуры в точке $p2$. Красная пунктирная линия соответствует изолинии $U_x = 0$.

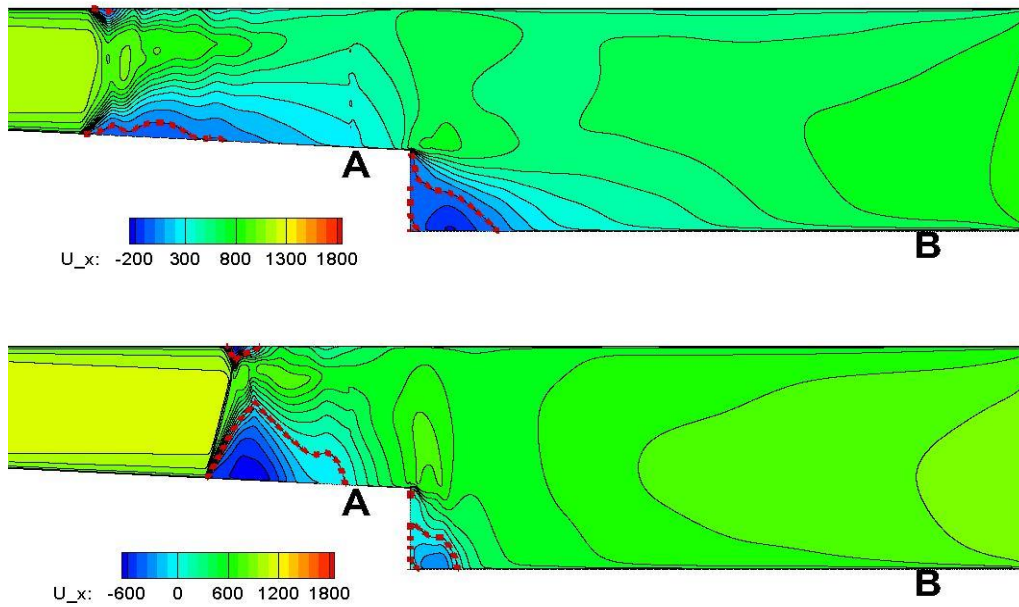


Рис. 13. Поле продольной компоненты скорости U_x на момент достижения минимальной (вверху) и максимальной (внизу) температуры в точке $p2$, $task_{1.34}$

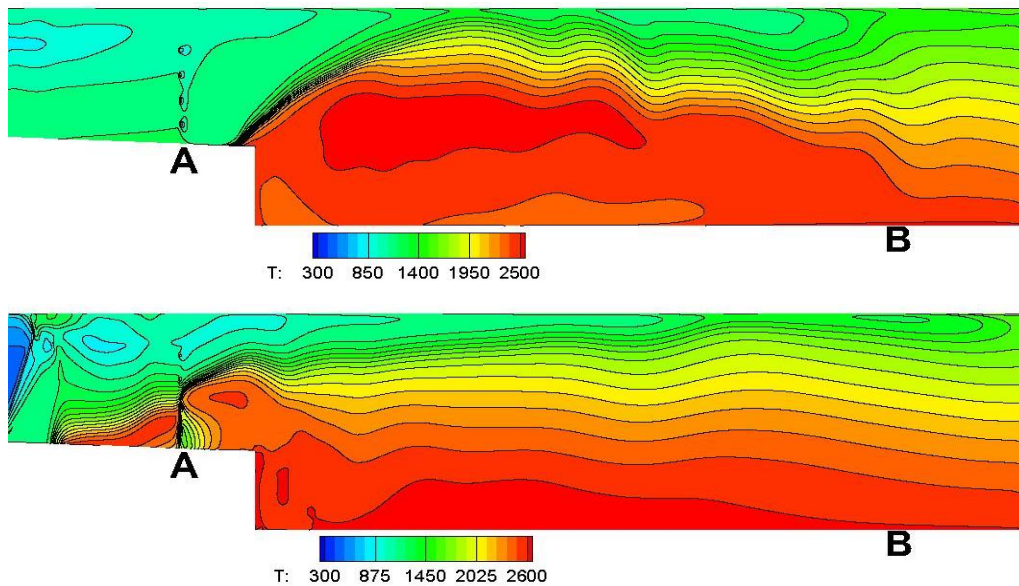
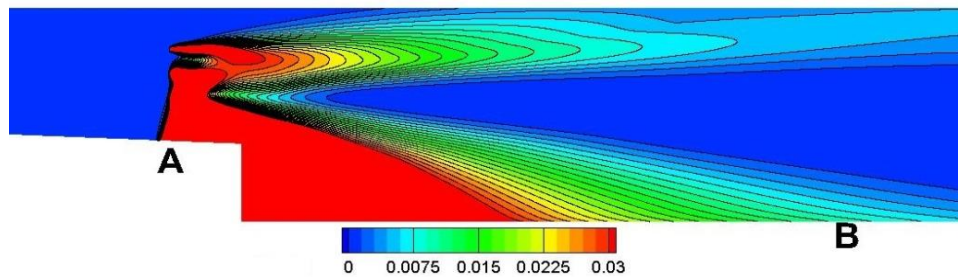


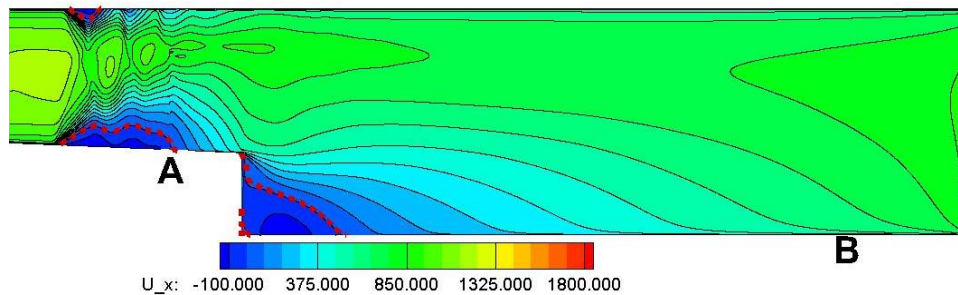
Рис. 14. Поле температуры T на момент достижения минимальной (вверху) и максимальной (внизу) температуры в точке $p2$, $task_{1.34}$

Каждый цикл колебательного режима приводит к тому, что половина инжекторов оказывается внутри зоны пламени.

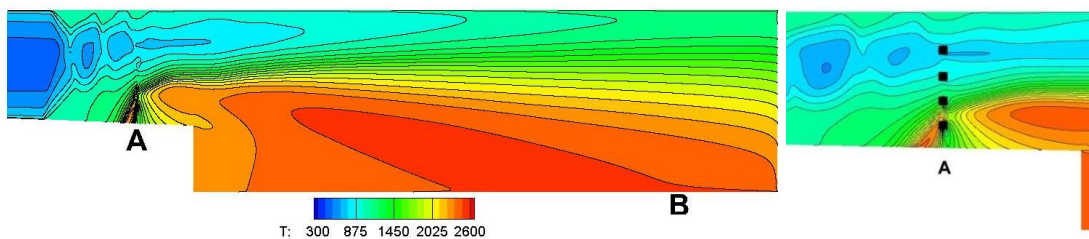
В задаче $task_{1.99}$ (см. рис. 15) колебательного режима не наблюдается. Начальная фаза всего процесса качественно напоминает предыдущий случай. Псевдоскачок и фронт горения двигаются с одинаковой скоростью и одновременно пересекают линию инжекторов. Псевдоскачок проталкивает топливо влево, за инжекторы, волна горения целиком захватывает два нижних инжектора. Топливо прогорает и фронт горения отступает.



а). поле массовой доли $Y_{C_m H_n}$



б). поле продольной компоненты скорости U_x



в). поле температуры T

Рис. 15. Концентрация $Y_{C_m H_n}$ (а), продольная компонента скорости (б); температура T (в) на момент установления, $task_{1.99}$

Переходный период состоит из двух колебательных циклов, после чего процесс стабилизируется, дальше колебаний не происходит. Нижний инжектор при этом оказывается внутри волны горения. Рис. 15 представляет общий

характер установившегося течения. Максимальная доля несгоревшего топлива (3%) приходится на зону, примыкающую справа к обратному уступу (рис. 15.а). Сам процесс горения устойчив. Структуру зоны горения можно увидеть на рисунках 15.б и 15.в.

Задача $task_{2.45}$ соответствует варианту с минимальным расходом топлива среди трех рассмотренных задач. Известно, что в физических экспериментах (см. [1]–[3]) в этом случае иногда наблюдался процесс горения, а иногда пламя срывалось и горение прекращалось. В рамках математической модели, принятой для расчетов, смесь загорается и срыва пламени не наблюдается. Напомним, что исследование проводится в рамках ламинарной модели горения. Выбор кинетической схемы также может влиять на результат компьютерного моделирования. В этом случае минимального расхода топлива переходный период выглядит несколько иначе. Первоначально псевдоскачок (так же как и в двух предыдущих вариантах) входит в зону изолятора, увлекая за собой топливо. Волна горения не только не отстает от псевдоскачка, но и начинает его опережать. Когда топливо прогорает, фронт горения отступает и на некоторое время стабилизируется в зоне инжекторов (назовем этот промежуток времени периодом локальной стабилизации). Такое положение волны горения (рис. 16.а) сохраняется до тех пор, пока давление в районе инжекторов не падает до атмосферного.

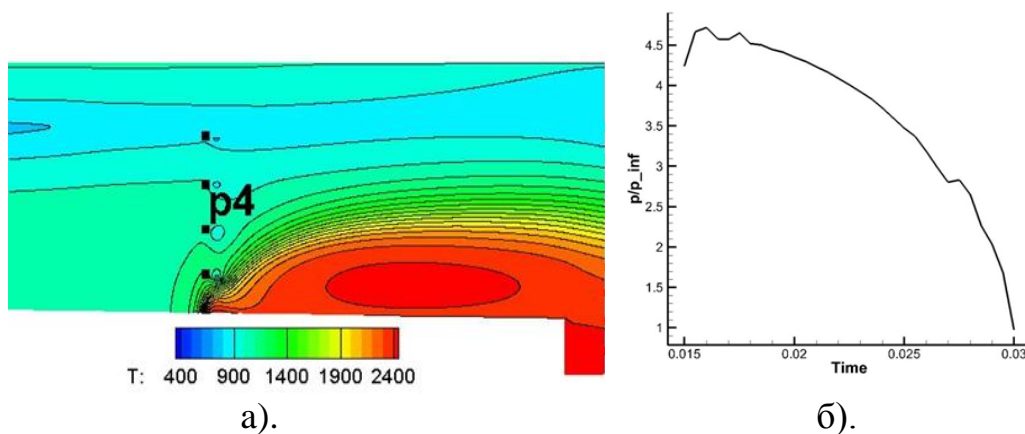
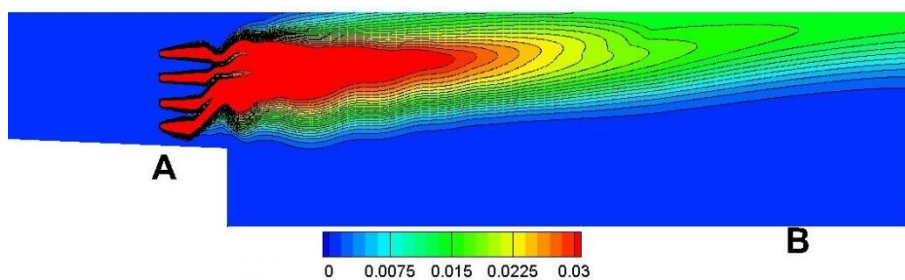


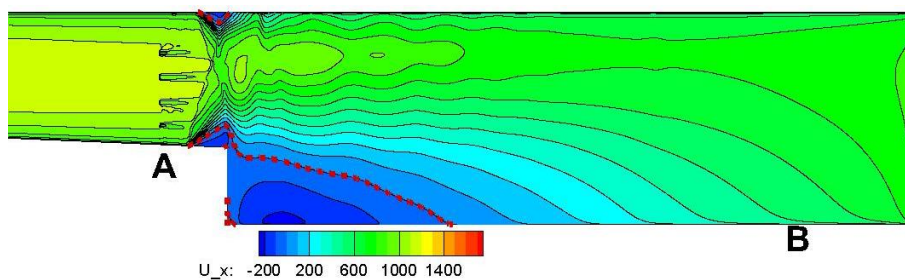
Рис. 16. Температура T (а.) и поведение давления p/p_{inf} (б.) в зоне инжекторов в период локальной стабилизации (в точке $p4$), $task_{2.45}$

На рис. 16.б показано поведение давления в точке $p4$ во времени (положение точки $p4$ можно увидеть на рис. 16.а).

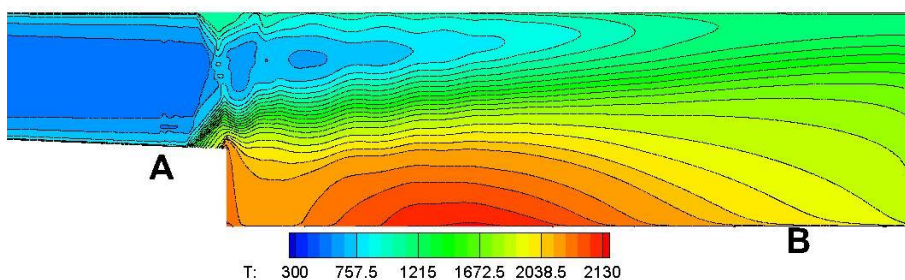
После падения давления псевдоскачок и волна горения отступают за линию вдува топлива и стабилизируются на половине расстояния между линией инжекторов и линией обратного уступа. На рис. 17 на момент установления представлены распределения массовой доли топлива $Y_{C_mH_n}$ (рис. 17.а), продольной компоненты скорости U_x (рис. 17.б) и температуры T (рис. 17.в).



а). поле массовой доли $Y_{C_mH_n}$



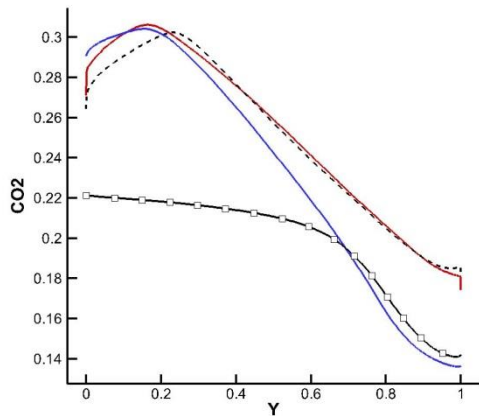
б). поле продольной компоненты скорости U_x



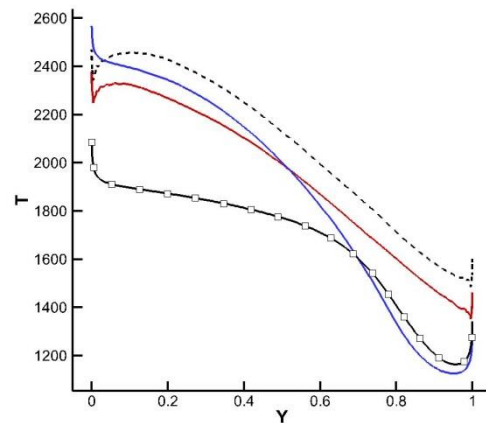
в). поле температуры T

Рис. 17. Концентрация $Y_{C_mH_n}$ (а), продольная компонента скорости (б), температура T (в) на момент установления, $task_{2.45}$

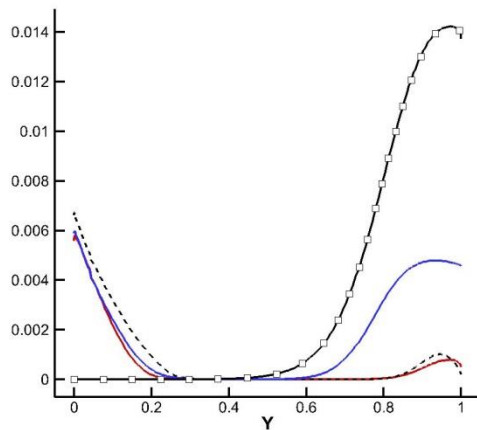
Дополнительно приведем сравнительные профили массовой доли углекислого газа Y_{CO_2} (а), температуры T (б), массовой доли углеводородного топлива $Y_{C_mH_n}$ (в) и компоненты топлива U_x (г) на выходе из канала на момент установления (см. рис. 18).



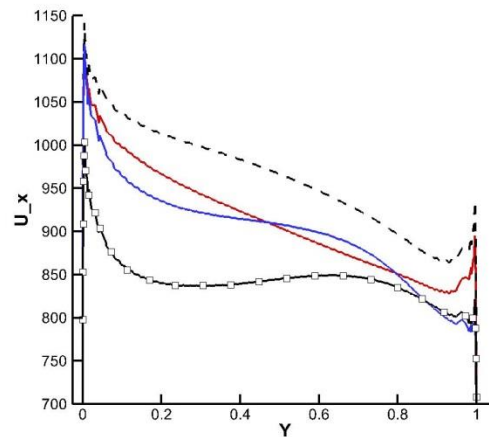
а). массовая доля Y_{CO_2}



б). температура T



в). массовая доля $Y_{C_mH_n}$



г). компонента скорости U_x

Рис. 18. Профили Y_{CO_2} (а), $Y_{C_mH_n}$ (в), температуры T (б), и горизонтальной компоненты скорости U_x (г) на выходе из канала; — — $task_{1,99}$; — ◦ — ◦ $task_{2,45}$; — — $task_{1,34}$ момент достижения максимальной температуры в точке $p2$; — — — $task_{1,34}$ момент достижения минимальной температуры в точке $p2$

На рис. 19-21 приведены фрагменты анимации для поля температуры и давления в реальном масштабе времени для задач $task_{1.34}$, $task_{1.99}$, $task_{2.45}$.

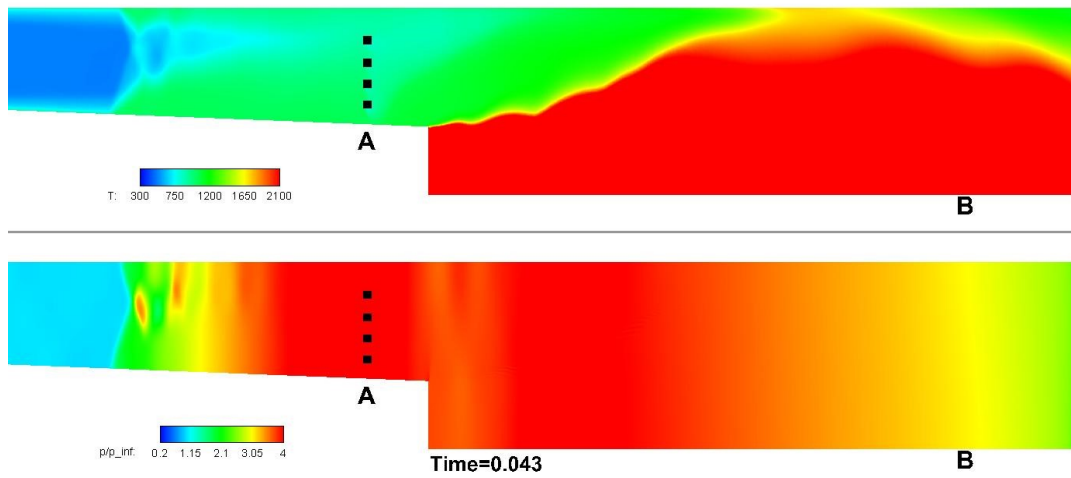


Рис.19. Анимация поля температуры и давления для задачи $task_{1.34}$

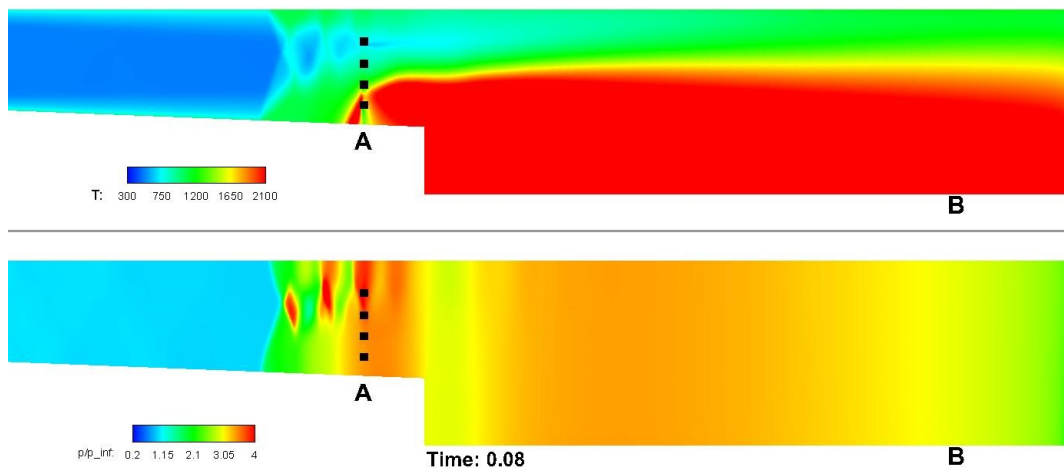


Рис.20. Анимация поля температуры и давления для задачи $task_{1.99}$

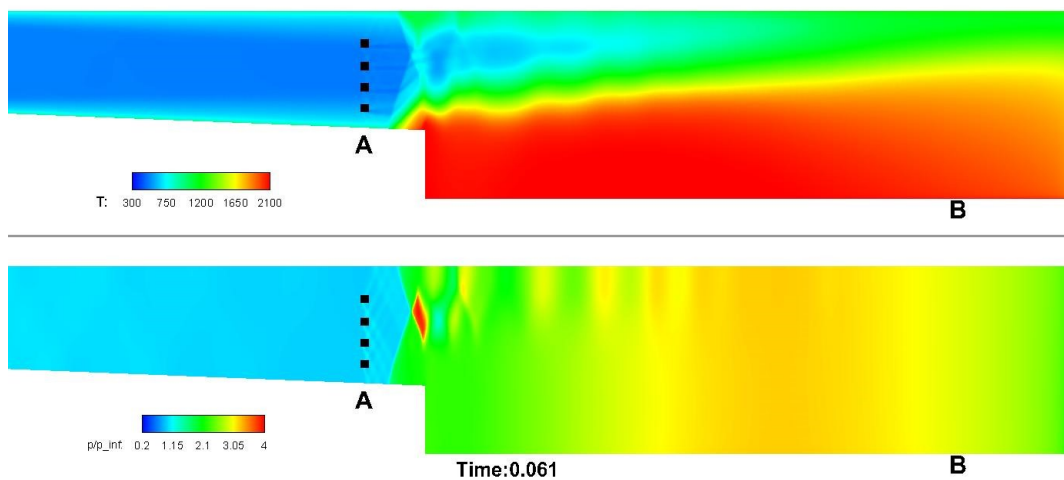


Рис.21. Анимация поля температуры и давления для задачи $task_{2.45}$

Заключение

Представлены результаты численного исследования модельной камеры сгорания со сверхзвуковым течением на входе. Рассмотрены режимы течения без горения и с горением углеводородного горючего. Результаты двумерных расчетов с использованием численной технологии OpenFoam качественно согласуются с экспериментальными данными ЦАГИ и расчетными исследованиями других авторов. Количественное сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными требует дальнейших исследований. Опыт расчетов показывает, что открытый пакет OpenFoam может служить инструментом численного моделирования сложных процессов, но решение с помощью OpenFoam трехмерных задач в реалистической постановке потребует больших затрат машинного времени даже на высокопроизводительных вычислительных системах.

Литература

1. Волощенко О.В., Зосимов С.А., Николаев А.А. Экспериментальное исследование процесса горения жидкого углеводородного топлива в плоском канале при сверхзвуковой скорости потока на входе. В сб. “Модели и методы аэродинамики”. Материалы I и II Международных школ-семинаров. Москва, МНЦМО, 2002. стр. 75.
2. Пиотрович Е.В., Серманов В.Н., Острась В.Н., Волощенко О.В., Зосимов С.А., Чевагин А.Ф., Власенко В.В., Мещеряков Е.А. Исследование проблем горения жидкого углеводородного топлива в каналах. В сб. “Модели и методы аэродинамики”. Материалы I и II Международных школ-семинаров. Москва, МНЦМО, 2002. стр. 102.
3. Власенко В.В., Ширяева А.А. Расчеты течения в модельной высокоскоростной камере сгорания с использованием различных моделей химической кинетики // Горение и взрыв. 2015. Т. 8. № 1. С. 116–125.

4. Фролов С.М., Зангиев А.Э., Семенов И.В., Власенко В.В., Волощенко О.В., Николаев А.А., Ширяева А.А. Моделирование течения в высокоскоростной камере сгорания в трехмерной и двумерной постановке // Горение и взрыв. 2015. Т. 8. № 1. С. 126–135.
5. Гудич И.Г., Власенко В.В., Жуков В.Т., Мануковский К.В., Новикова Н.Д., Рыков Ю.Г., Феодоритова О.Б. О расчетах модельной высокоскоростной камеры сгорания // Горение и взрыв. 2016. Т. 9. № 3. С. 57–65
6. Жуков В.Т., Мануковский К.В., Новикова Н.Д., Рыков Ю.Г., Феодоритова О.Б. Исследование картины течения в модельном тракте двигателя высокоскоростного летательного аппарата // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2015. № 5. 23 с.
7. Жуков В.Т., Мануковский К.В., Новикова Н.Д., Рыков Ю.Г., Феодоритова О.Б. Расчет, анализ и визуализация течения в модельном тракте двигателя высокоскоростного летательного аппарата // Научная визуализация. 2015. Т. 7. № 1. С. 78 – 95.
8. Гудич И.Г., Жуков В.Т., Мануковский К.В., Новикова Н.Д., Рыков Ю.Г., Феодоритова О.Б. Численное моделирование и визуализация течений с горением в высокоскоростной камере сгорания // Научная визуализация. 2016. Т. 8, № 4. С. 104 – 127.
9. Гудич И.Г., Жуков В.Т., Мануковский К.В., Новикова Н.Д., Рыков Ю.Г., Феодоритова О.Б. Численное моделирование высокоскоростной камеры сгорания с использованием пакета OpenFOAM // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2016. № 10. 32 с.
10. <http://www.openfoam.com>
11. Гибридный вычислительный кластер К-100. URL: <http://www.kiam.ru/MVS/resources/k100.html>
12. Poinso T., Veynante D. Theoretical and numerical combustion. Edwards, 3rd Edition. 2011.

13. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA-Journal. – 1994. – Vol.32. – No. 8. – P.269-289.
14. Vieser W., Esch T., Menter F. Heat transfer predictions using advanced two-equation turbulence models // CFX Validation Report 10/0602, AEA Technology, 2002. – P.1-69.
15. Басевич В.Я., Фролов С.М. Глобальные кинетические механизмы, используемые при моделировании многостадийного самовоспламенения углеводородов в реагирующих течениях // Химическая физика. 2006. Т.25. № 6. С. 54–62.
16. Moukalled F., L.Mangan L., Darwish M. The finite volume method in computational Fluid Dynamics. An Advanced Introduction with OpenFOAM and Matlab. Springer. 2015
17. Maric T., Hopken J., Mooney K. The OpenFOAM technology primer. www.sourceflux.de/book, 2014.
18. Westbrook C.K., Dryer F.L. Chemical kinetic modeling of hydrocarbon combustion // Prog. Energy Combust. Sci. 1984. V.10. № 1, P. 1–57.
19. Зангиев А.Э., Иванов В.С., Медведев С.Н., Фролов С.М., Фролов Ф.С., Семенов И.В., Власенко В.В. Влияние турбулентности на развитие течения в высокоскоростной камере сгорания // Горение и взрыв. – 2016. – Т.9. –№ 3. – С.66-79
20. Власенко В.В., Волощенко О.В., Николаев А.А. Развитие течения в высокоскоростной камере сгорания при разных значениях коэффициента избытка воздуха // Горение и взрыв. 2016. Т. 9. № 3. С. 47-56.