

УДК 629.7

М.Ю. Егоров

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет

Д.М. Егоров

НИИ полимерных материалов, г. Пермь

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНУТРИКАМЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ В БЕССОПЛОВОМ РДТТ

Исследуются внутрикамерные процессы, протекающие при работе бессопловой РДТТ, путем проведения прямого вычислительного эксперимента. Рассматривается полный цикл работы ракетного двигателя. Применяется нестационарная гомогенно-гетерогенная модель течения продуктов сгорания и воздуха в РДТТ в осесимметричной постановке с учетом срабатывания воспламенителя, прогрева, воспламенения и последующего нестационарного и турбулентного горения твердого топлива, разгерметизации двигателя и последующего движения заглушки. В качестве основного расчетного метода используется метод Давыдова (метод крупных частиц). Разработана методика расчета. Приводятся результаты численного моделирования.

Ключевые слова: численное моделирование, метод Давыдова, бессопловой РДТТ, внутрикамерные процессы, горение, газовая динамика, движение заглушки.

M.Yu. Egorov

Perm National Research Politechnic University

D.M. Egorov

Research institute of polymeric materials, Perm

NUMERICAL MODELING OF THE PROCESSES IN THE COMBUSTION CHAMBER OF NOZZLELESS SOLID PROPELLANT ROCKET ENGINE

Intrachamber investigate the processes occurring at work nozzleless SRM, through direct numerical experiment. Consider the full cycle of the rocket engine. Suitable non-stationary homogeneous-heterogeneous model of the flow of combustion products and air in the solid propellant in an axisymmetric formulation of the igniter, heating, ignition and subsequent transient and turbulent combustion of solid fuels, followed by depressurization of the engine and the movement is a stub. The main method of the calculation method used by Davydov (method of large particles). The design procedure is developed. Results of numerical research are resulted.

Keywords: numerical simulation, Davydov method, nozzleless SRM, intrachamber processes, combustion, gas dynamics, the movement is a stub.

Численное моделирование внутрикамерных процессов (внутрибаллистический расчет) является одной из главных задач при разработке и проектировании РДТТ. В рамках этой задачи определяются основные рабочие параметры ракетного двигателя: тяга, массовый секундный расход продуктов сгорания, время релаксации камеры сгорания и др.

Современный РДТТ – сложная техническая система, в которой одновременно протекает ряд взаимосвязанных нелинейных и нестационарных физико-химических процессов. Кроме того, РДТТ – сложная пространственная конструкция, описание геометрии которой также представляет собой весьма сложную задачу. Эта задача должна разрешаться с учетом подвижных граничных условий, которые, в свою очередь, сами определяются при решении рассматриваемой задачи.

Численное моделирование внутрикамерных процессов в бессопловом РДТТ имеет свои особенности. На первый взгляд бессопловой ракетный двигатель является более простой конструкцией (отсутствует сопловой блок), однако провести внутрибаллистическое проектирование с требуемой точностью для такого типа двигателя по существующим в отрасли методикам практически невозможно. Это, в первую очередь, связано с отсутствием фиксированного критического сечения в проточной части камеры сгорания бессоплового РДТТ. Как такового классического сопла ракетного двигателя здесь нет, а значит, нет и возможности корректно рассчитать параметры потока продуктов сгорания по известным аналитическим зависимостям и даже ряду численных методик.

В предлагаемой работе предпринята попытка прямого численного моделирования внутрикамерных процессов в бессопловом РДТТ с учетом особенностей этого типа ракетных двигателей. Будет рассматриваться сопряженная задача, включающая в себя:

- срабатывание воспламенителя (ВС);
- прогрев, воспламенение и последующее нестационарное и турбулентное горение заряда твердого топлива (ТТ);
- нестационарное гомогенно-гетерогенное течение воздуха и продуктов сгорания в камере сгорания;
- движение заглушки камеры сгорания.

Каждая из подзадач рассматривается во взаимосвязи и разрешается одновременно.

Срабатывание воспламенителя

Процесс срабатывания ВС описывается на основе экспериментально-теоретического подхода, предложенного в диссертации¹. Путем решения обратной задачи внутренней баллистики для системы «ВС – имитатор свободного объема камеры сгорания РДТТ» рассчитывается реальный газо-приход от ВС с учетом особенности горения заряда воспламенительного состава, а именно догорания продуктов сгорания за корпусом ВС.

Основная система дифференциальных уравнений, описывающих процесс срабатывания ВС РДТТ, имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}\frac{dP_B}{dt} &= \frac{R_B T_B}{V_B} \left[v_B s_B (\rho_B^{\text{ш}} - \rho_B) - \dot{m} \right]; \\ \frac{dP_{\text{к.с}}}{dt} &= \frac{R_{\text{к.с}} T_{\text{к.с}}}{V_{\text{к.с}}} \dot{m}.\end{aligned}\quad (1)$$

В (1) и далее по тексту приняты следующие обозначения: P – давление; T – температура; V – объем; ρ – плотность; v – скорость горения; t – время; $\dot{m}$ – массовый расход (приход); R – приведенная газовая постоянная; s – площадь поверхности горения. Буквенные индексы указывают на параметры ВС (в), камеры сгорания (к.с), шашки (ш).

Выразив из первого уравнения системы (1) $\dot{m}$, подставив его во второе и разрешив полученное относительно v_B , имеем

$$v_B = \frac{1}{s_B (\rho_B^{\text{ш}} - \rho_B)} \left(\frac{V_B}{R_B T_B} \frac{dP_B}{dt} + \frac{V_{\text{к.с}}}{R_{\text{к.с}} T_{\text{к.с}}} \frac{dP_{\text{к.с}}}{dt} \right). \quad (2)$$

Выражение (2) является основным расчетным соотношением, в котором P_B и $P_{\text{к.с}}$ и их производные по времени определяются экспериментально на специальной лабораторной установке.

Однако такой способ определения скорости горения неудобен, так как для каждого конкретного ВС сначала необходимо провести эксперимент по замеру рабочего давления, а затем осуществить расчет. Удобнее обобщить и связать напрямую значение скорости горения заряда ВС v_B с параметрами, определяющими процесс горения конкретного воспламенительного состава в корпусе ВС (площадью перфорации корпуса воспламенителя – $F_{\text{кр}}$, площадью поверхности горения заряда ВС – s_B и свободным объемом в корпусе ВС – V_B), в виде

¹ Егоров М.Ю.: дис. ... канд. техн. наук / Перм. политехн. ин-т. – Пермь, 1987.

$$v_B = f(F_{кр}, s_B, V_B). \quad (3)$$

Такого рода связи, не вникая в сущность сложного физико-химического процесса горения, можно найти в статистическом подходе, используя полиномиальные модели, а для нахождения коэффициентов полинома применить теорию планирования эксперимента [1].

По полиномиальной зависимости типа (3) в работе определяется газоприход от ВС в камеру сгорания РДТТ.

Воспламенение и горение заряда твердого топлива

Описание процесса нестационарного прогрева, воспламенения и последующего нестационарного и турбулентного горения заряда ТТ базируется на модели Мержанова – Дубовицкого с учетом влияния газовой фазы на процесс горения в конденсированной фазе (k -фазе) [2]. Будем рассматривать ТТ как твердое тело, к которому применимы известные уравнения теплопроводности и химической кинетики. Для удобства будем рассматривать эти уравнения в системе координат, связанной с поверхностью горения, направив ось от поверхности в ТТ. Считаем, что реакции в k -фазе удовлетворяют закону Аррениуса. Тогда в предположении «0»-мерности порядка химических реакций данная система уравнений, описывающая процесс, имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_k}{\partial t} &= \kappa_k \frac{\partial^2 T_k}{\partial y_k^2} + v_k \frac{\partial T_k}{\partial y_k} + \frac{Q_k}{c_k} \Phi_k(T_k); \\ \frac{\partial \beta}{\partial t} &= v_k \frac{\partial \beta}{\partial y_k} + \Phi_k(T_k), \end{aligned} \quad (4)$$

где $\Phi_k(T_k) = Z_k \exp\left(-\frac{E_k}{R_0 T_k}\right)$.

В (4) приняты следующие обозначения: c – удельная теплоемкость; E – энергия активации; Q – тепловой эффект реакции; R_0 – универсальная газовая постоянная; y – координата; Z – предэкспонент; β – глубина превращения топлива; κ – коэффициент температуропроводности.

До воспламенения в (4) необходимо положить $v_k = 0$. Условие горения принимается в виде $\beta_s = 1$ (s – поверхность горения). Это же условие выбирается и в качестве условия воспламенения.

Система дифференциальных уравнений (4), с учетом замыкающих соотношений [2], интегрировалась численно конечно-разностным (сеточным) методом. В расчетах использовались явные и неявные схемы аппроксимации первого и второго порядка точности. Для разрешения неявных конечно-разностных соотношений применялся метод прогонки.

Газовая динамика в камере сгорания бесоплового РДТТ

Для математического описания процесса течения в камере сгорания РДТТ будем использовать подходы механики сплошных многофазных сред [2–4]. Воздух в камере сгорания, газообразные продукты сгорания воспламенительного состава и заряда ТТ назовем первой фазой. Мелкодисперсные частицы в продуктах сгорания заряда ТТ (окисел алюминия) – второй фазой. Мелкодисперсные частицы в продуктах сгорания воспламенительного состава (окисел магния) назовем третьей фазой. Первую, вторую и третью фазы будем считать гомогенно-гетерогенной смесью со своими температурами и скоростями движения. В такой системе каждая фаза занимает часть объема смеси: $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$. Движение их рассматривается как движение взаимопроникающих и взаимодействующих сред.

Полная нестационарная система вихревых дифференциальных уравнений газовой динамики для осесимметричного (цилиндрическая система координат) гомогенно-гетерогенного потока в камере сгорания РДТТ запишется в виде:

– уравнения неразрывности (сохранения массы)

$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_1 \mathbf{W}_1) &= G_{gw} + G_{gb}; \\ \frac{\partial \rho_2}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_2 \mathbf{W}_2) &= G_{pw}; \\ \frac{\partial \rho_3}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_3 \mathbf{W}_3) &= G_{pb}; \\ \frac{\partial(\rho_1 \varphi)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_1 \varphi \mathbf{W}_1) &= \varphi_w G_{gw} + \varphi_b G_{gb}; \\ \varphi &= k, c_p, \mu, \lambda, a;\end{aligned}\tag{5}$$

– уравнения сохранения импульса по осям координат

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial(\rho_1 v_1)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_1 v_1 \mathbf{W}_1) + \alpha_1 \frac{\partial P}{\partial r} &= -\tau_r^{12} - \tau_r^{13} + W_{rw} G_{gw} + W_{rb} G_{gb}; \\
 \frac{\partial(\rho_1 w_1)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_1 w_1 \mathbf{W}_1) + \alpha_1 \frac{\partial P}{\partial z} &= -\tau_z^{12} - \tau_z^{13} + W_{zw} G_{gw} + W_{zb} G_{gb}; \\
 \frac{\partial(\rho_2 v_2)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_2 v_2 \mathbf{W}_2) + \alpha_2 \frac{\partial P}{\partial r} &= \tau_r^{12} + W_{rw} G_{pw}; \\
 \frac{\partial(\rho_2 w_2)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_2 w_2 \mathbf{W}_2) + \alpha_2 \frac{\partial P}{\partial z} &= \tau_z^{12} + W_{zw} G_{pw}; \\
 \frac{\partial(\rho_3 v_3)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_3 v_3 \mathbf{W}_3) + \alpha_3 \frac{\partial P}{\partial r} &= \tau_r^{13} + W_{rb} G_{pb}; \\
 \frac{\partial(\rho_3 w_3)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_3 w_3 \mathbf{W}_3) + \alpha_3 \frac{\partial P}{\partial z} &= \tau_z^{13} + W_{zb} G_{pb};
 \end{aligned} \tag{6}$$

– уравнения сохранения внутренней удельной энергии

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial(\rho_2 J_2)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_2 J_2 \mathbf{W}_2) &= q_k^{12} + q_l^{12} + J_{p2} G_{pw}; \\
 \frac{\partial(\rho_3 J_3)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_3 J_3 \mathbf{W}_3) &= q_k^{13} + q_l^{13} + J_{p3} G_{pb};
 \end{aligned} \tag{7}$$

– уравнения сохранения полной удельной энергии смеси

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial(\rho_1 E_1)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_2 E_2)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_3 E_3)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_1 E_1 \mathbf{W}_1) + \operatorname{div}(\rho_2 E_2 \mathbf{W}_2) + \\
 + \operatorname{div}(\rho_3 E_3 \mathbf{W}_3) + \operatorname{div}(\alpha_1 P \mathbf{W}_1) + \operatorname{div}(\alpha_2 P \mathbf{W}_2) + \operatorname{div}(\alpha_3 P \mathbf{W}_3) = \\
 (E_{gw} G_{gw} + E_{p2} G_{pw}) + (E_{gb} G_{gb} + E_{p3} G_{pb}) - q_{l_0}^1.
 \end{aligned} \tag{8}$$

Для замыкания системы дифференциальных уравнений (5)–(8) будем использовать уравнение состояния в виде

$$P = (k-1) \rho_1^n \left(E_1 - \frac{W_1^2}{2} \right) \frac{1}{1 - a \rho_1^n}. \tag{9}$$

В (5)–(9) приняты следующие обозначения: a – коволюм; c_p – теплоемкость при постоянном давлении; E – полная удельная энергия; J – внутренняя удельная энергия; G – расходно-приходный комплекс; k – показатель адиабаты; q – функция теплового межфазного взаимодействия; v, w – проекции вектора скорости по оси $0R, 0Z$; W – модуль вектора скорости; $\mathbf{W}$ – вектор скорости; r, z – координаты вдоль оси $0R, 0Z$; μ – динамическая вязкость; λ – теплопроводность; τ – функция силового межфазного взаимодействия. Символы: g – газ; k – конвективный; l – лучистый; l_0 – лучистый объемный; p – частицы; w – заряд ТТ; v – воспламенитель; i – истинное значение.

Выражения в (5)–(9) для приходных комплексов, функций силового и теплового межфазного взаимодействия, а также используемые в расчетах дополнительные соотношения подробно изложены в [2, 3].

Система дифференциальных уравнений (5)–(9) с замыкающими соотношениями интегрировалась численно методом Давыдова (методом крупных частиц), хорошо себя зарекомендовавшим при решении многих нелинейных задач механики сплошных сред [2, 3, 5]. В расчетах использовалась явная параметрическая (три параметра) полностью консервативная конечно-разностная схема метода. Применялась равномерная ортогональная расчетная сетка. На нерегулярных (не совпадающих с расчетной сеткой) границах расчетной области использовался аппарат дробных ячеек.

Движение заглушки камеры сгорания

Будем исходить из следующей модели движения заглушки бессоплового РДТТ. На начальный момент времени камера сгорания ракетного двигателя герметично закрыта заглушкой. Заглушка неподвижна. При срабатывании ВС и воспламенении поверхности горения заряда ТТ давление в камере сгорания РДТТ постепенно возрастает. В момент, когда давление продуктов сгорания в районе дна заглушки достигает некоторого критического значения (давления страгивания), заглушка начинает свое движение. При страгивании и в процессе движения заглушка сохраняет свою форму (не разрушается на части) и массу. Траектория движения заглушки совпадает с осью симметрии ракетного двигателя и отклонений в радиальном направлении не имеет.

Движение заглушки РДТТ описывается уравнением

$$m_z \frac{dw_z}{dt} = \int_0^{s_z^l} P_z^l ds - \int_0^{s_z^r} P_z^r ds. \quad (10)$$

В (10) приняты дополнительные обозначения: P_z^l – давление на внутренней поверхности заглушки; P_z^r – давление на внешней поверхности заглушки; s – площадь поверхности заглушки.

Уравнение движения заглушки бесоплового РДТТ разрешается численно конечно-разностным методом Эйлера [6].

Результаты расчетов

Приведем некоторые результаты численного расчета процесса срабатывания бесоплового РДТТ. Принципиальная компоновочная схема ракетного двигателя показана на рис. 1.

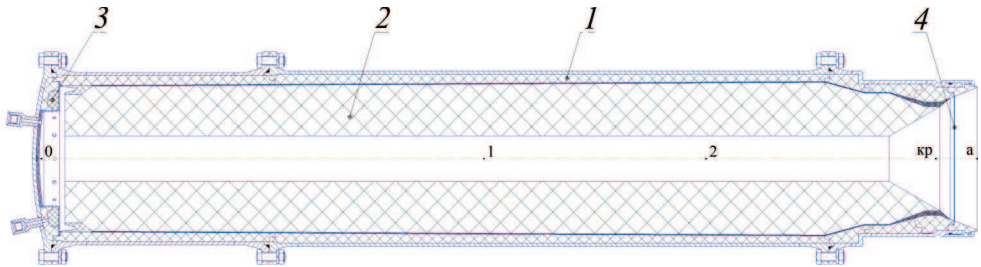


Рис. 1. Принципиальная компоновочная схема бесоплового РДТТ: 1 – корпус; 2 – заряд ТТ; 3 – ВС; 4 – заглушка; 0, 1, 2, кр, а – точки фиксации параметров

В расчетах были приняты следующие шаги интегрирования: по координатам – $\Delta r = \Delta z = 1,0 \cdot 10^{-3}$ м, по времени – $\Delta t = 2,0 \cdot 10^{-7}$ с. Непосредственно в области интегрирования размещается от ~44 000 до ~120 000 расчетных ячеек (в зависимости от величины сгоревшего свода заряда ТТ). Один шаг интегрирования по времени реализуется рабочей станцией (процессор AMD Phenom II X4 965BE, материнская плата GA-MA790GPT-UD3H, оперативная память DDR3 1333MHz 4Gb) за ~0,07 с процессорного времени.

На рис. 2 представлено изменение расчетной конфигурации камеры сгорания ракетного двигателя по мере выгорания заряда ТТ. Каждая фиксированная конфигурация просчитывалась отдельно. Результаты серии последовательных расчетов «сшивались». На рис. 3–6

представлено изменение во времени в фиксированных точках камеры сгорания (см. рис. 1) давления, скорости газовой фазы потока продуктов сгорания, расхода и тяги бесоплового РДТТ. На рис. 7–9 показано распределение давления, температуры и осевой составляющей скорости газовой фазы продуктов сгорания по камере сгорания бесоплового РДТТ в фиксированные моменты времени. Результаты расчетов хорошо согласуются с данными натурных экспериментов по отработке РДТТ.

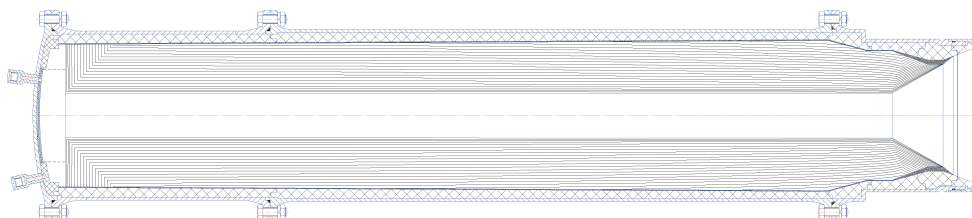


Рис. 2. Изменение расчетной конфигурации камеры сгорания ракетного двигателя по мере выгорания заряда ТТ

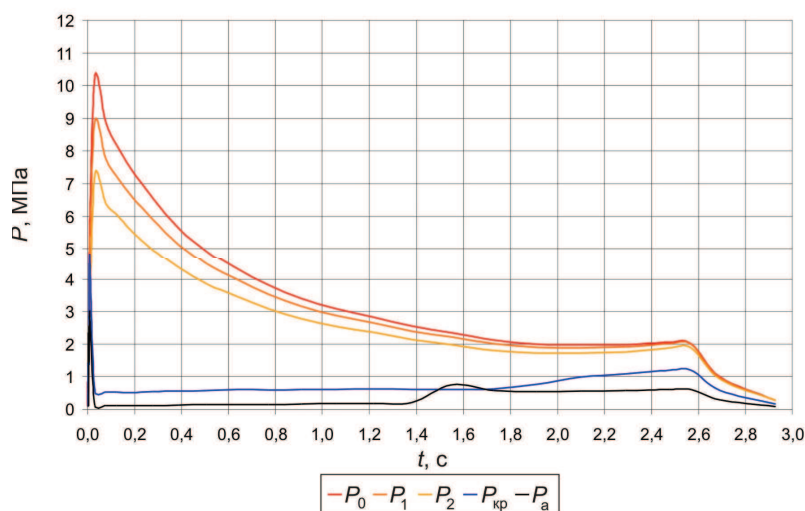


Рис. 3. Изменение давления во времени в фиксированных точках камеры сгорания

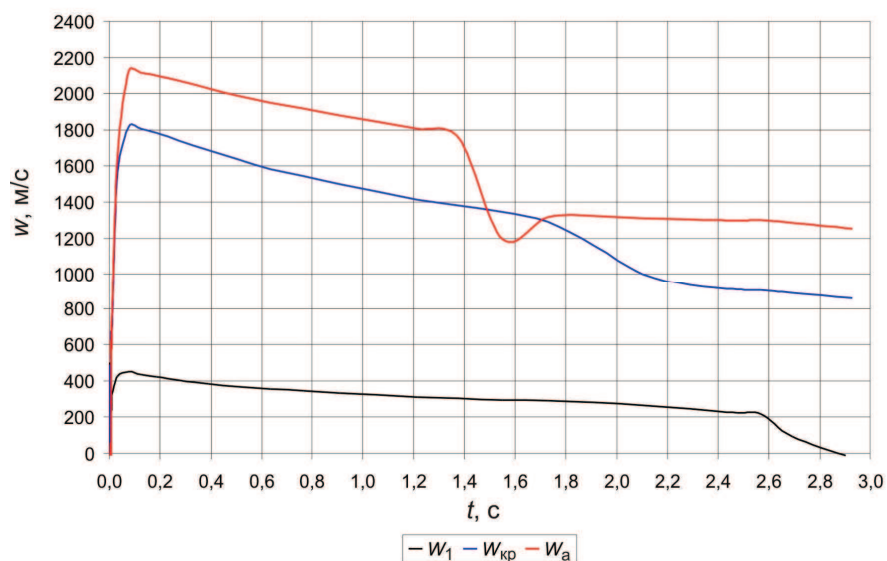


Рис. 4. Изменение осевой скорости газовой фазы во времени в фиксированных точках камеры сгорания

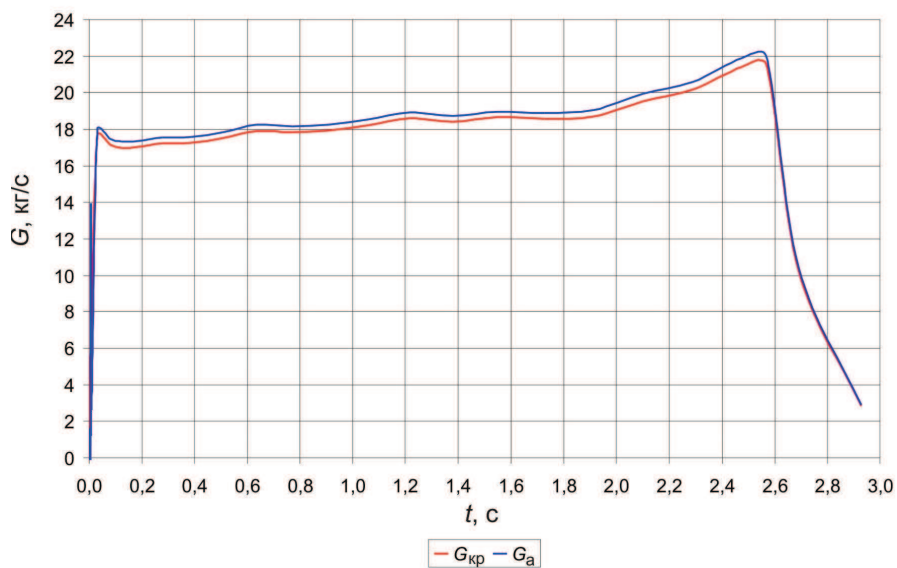
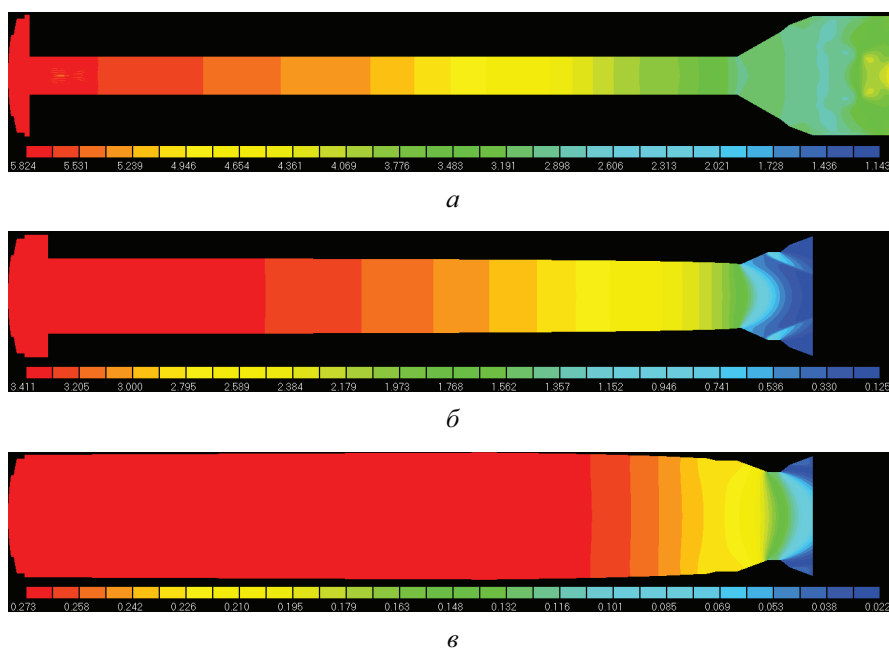
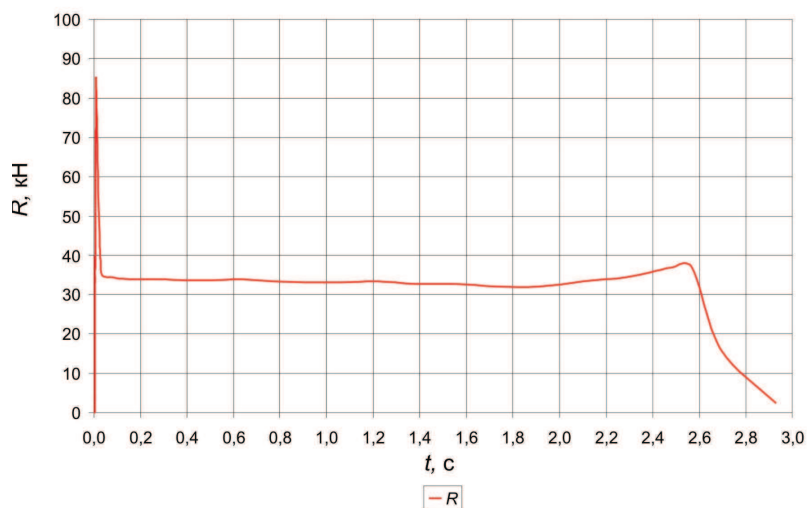


Рис. 5. Изменение расхода продуктов сгорания ТТ во времени в фиксированных сечениях камеры сгорания



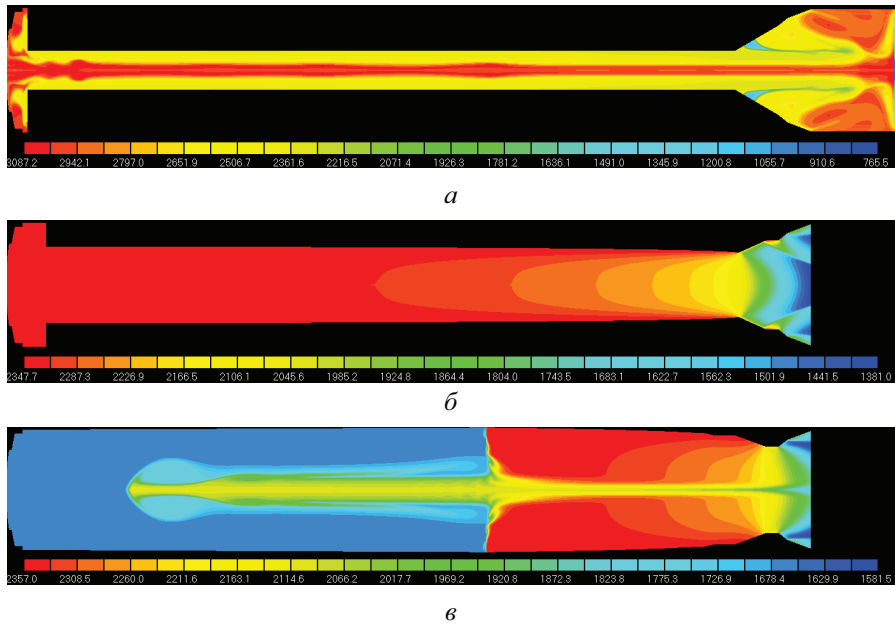


Рис. 8. Распределение температуры газовой фазы в камере сгорания в фиксированные моменты времени: $a - t = 0,008$ с; $б - t = 0,984$ с; $в - t = 2,928$ с

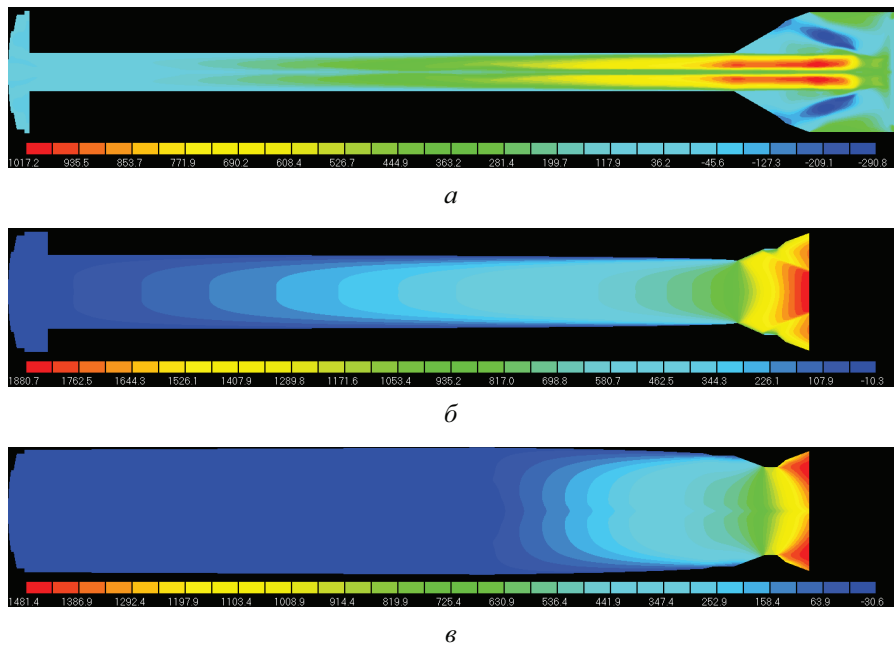


Рис. 9. Распределение осевой скорости газовой фазы в камере сгорания в фиксированные моменты времени: $a - t = 0,008$ с; $б - t = 0,984$ с; $в - t = 2,928$ с

Заключение

Разработанная физико-математическая модель и созданный на ее базе программный комплекс позволяют проводить детальное комплексное исследование нелинейных и нестационарных внутрикамерных процессов при срабатывании бессоплового РДТТ, а также классического РДТТ (с соплом). Полученная расчетная информация может быть успешно использована при проектировании и отработке новых образцов ракетной техники на ТТ с высокими энергомассовыми характеристиками.

Библиографический список

1. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.
2. Давыдов Ю.М., Егоров М.Ю. Численное моделирование нестационарных переходных процессов в активных и реактивных двигателях. – М.: НАПН РФ, 1999. – 272 с.
3. Давыдов Ю.М., Давыдова И.М., Егоров М.Ю. Совершенствование и оптимизация авиационных и ракетных двигателей с учетом нелинейных нестационарных газодинамических эффектов. – М.: НАПН РФ, 2002. – 303 с.
4. Нигматулин Р.И. Основы механики гетерогенных сред. – М.: Наука, 1978. – 336 с.
5. Давыдов Ю.М. Крупных частиц метод // Математическая энциклопедия. – М.: Советская энциклопедия, 1982. – Т. 3. – С. 125–129.
6. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. – СПб.: Лань, 2008. – 832 с.

References

1. Spiridonov A.A. *Planirovanie eksperimenta pri issledovanii tekhnologicheskikh protsessov* [Planning of an experiment in the study of technological processes]. Moscow: Mashinostroenie, 1981, 184 p.
2. Davydov Yu.M., Egorov M.Yu. *Chislennoe modelirovanie nestatsionarnykh perekhodnykh protsessov v aktivnykh i reaktivnykh dvigatelyakh* [Computational modeling of non-stationary transient processes in the active and jet engines]. Moscow, 1999, 272 p.

3. Davydov Yu.M., Davydova I.M., Egorov M.Yu. *Sovershenstvovanie i optimizatsiya aviatsionnykh i raketnykh dvigateley s uchetom nelineynykh nestatsionarnykh gazodinamicheskikh effektiv* [Improvement and optimization of aircraft and rocket engines, with consideration of non-linear non-stationary gas-dynamic effects]. Moscow, 2002, 303 p.

4. Nigmatulin R.I. *Osnovy mekhaniki geterogennykh sred* [Fundamentals of heterogeneous medium mechanics]. Moscow: Nauka, 1978, 336 p.

5. Davydov Yu.M. *Krupnykh chastits metod* [Particle-in-cell method]. *Matematicheskaya entsiklopediya*. Moscow: Sovetskaya entsiklopediya, 1982, vol. 3, pp. 125–129.

6. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike* [Mathematics handbook]. St. Petersburg: Lan, 2008, 832 p.

Об авторах

Егоров Михаил Юрьевич (Пермь, Россия) – доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Высшая математика» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: egorov-m-j@yandex.ru).

Егоров Дмитрий Михайлович (Пермь, Россия) – старший научный сотудник ФГУП НИИ полимерных материалов (614113, г. Пермь, ул. Чистопольская, 16, e-mail: egorovdimitriy@mail.ru).

About the authors

Egorov Michail Yuryevich (Perm, Russian Federation) – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Department of Higher mathematics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomol'sky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: egorov-m-j@yandex.ru).

Egorov Dmitriy Mikhaylovich (Perm, Russian Federation) – Senior Staff Scientist of Federal state unitary enterprise «Research institute of polymeric materials» (16, Chistopolskaya, Perm, 614113, Russian Federation, e-mail: egorovdimitriy@mail.ru).

Получено 2.04.2012