

ПОСТАНОВКА И ПРОВЕДЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ РЕШЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ И НЕЛИНЕЙНЫХ ЗАДАЧ РАКЕТНОГО ТВЕРДОТОПЛИВНОГО ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЯ*

М.Ю. Егоров, *Пермский национальный исследовательский политехнический университет*

С.М. Егоров, *Научно-исследовательский институт полимерных материалов*

Д.М. Егоров, *Научно-исследовательский институт полимерных материалов*

Р.В. Мормуль, *Научно-производственное объединение «Искра»*

А.Ю. Панферов, *Пермский национальный исследовательский политехнический университет*

Для оптимизации параметров ракетного двигателя на твердом топливе (и других технических систем на твердом топливе) предпринята попытка прямого численного моделирования его внутрикамерных процессов. Рассматривается сопряженная постановка задачи. Каждая из подзадач рассматривается во взаимосвязи и разрешается одновременно – на одном шаге по времени. Для решения поставленной задачи разработан комплекс прикладных программ на ЭВМ, использующий стандарт многопоточковой обработки информации OpenCL. Приводятся результаты численных расчетов.

Ключевые слова: *технические системы на твердом топливе, внутрикамерные процессы, горение твердого топлива, газовая динамика, постановка вычислительного эксперимента.*

Практика модернизации современных и разработки перспективных ракетных двигателей на твердом топливе (РДТТ) и других технических систем на твердом топливе (ТСТТ) постоянно предлагает для исследования ряд новых сложных проблем, напрямую связанных с нестационарностью и существенной нелинейностью, наблюдаемых при его срабатывании, физических явлений, процессов или состояний. Достаточно часто эти проблемы становятся серьезным препятствием к дальнейшему совершенствованию их энергомассовых, прочностных, эксплуатационных и других характеристик.

Численное моделирование внутрикамерных процессов (проведение т.н. внутрибаллистического расчета) – основное содержание проекта – является одной из главных задач при разработке и проектировании ТСТТ различного типа и назначения [1–7 и др.]. В рамках этой задачи определяются основные рабочие параметры ТСТТ – тяга, массовый расход продуктов сгорания, время работы и др.

В качестве объектов исследования рассматриваются: РДТТ, бесплоповый РДТТ, ракетно-прямоточный двигатель на твердом топливе, газогенератор на твердом топливе, пороховой аккумуля-

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ-Урал № 14-01-96023.

тор давления, артиллерийский выстрел, минометный выстрел и другие специализированные системы, источником энергии в которых является твердое топливо (ТТ).

Рассматривается сопряженная постановка задачи, включающая в себя: срабатывание воспламенителя; прогрев, воспламенение и последующее нестационарное и турбулентное горение заряда твердого топлива; нестационарное ударно-волновое и вихревое гомогенное течение воздуха и продуктов сгорания в камере сгорания (включая камеру воспламенителя), газоходах, сопловых блоках и за сопловыми блоками; разгерметизацию камеры сгорания и вылет заглушек сопловых блоков (или движение снаряда в стволе); работу органов управления и вспомогательных устройств. Каждая из подзадач рассматривается во взаимосвязи и разрешается одновременно – на одном шаге по времени.

Воспламенение и горение твердого топлива

Описание процесса нестационарного прогрева, воспламенения и последующего нестационарного и турбулентного горения ТТ базируется на модели Мержанова–Дубовицкого с учетом, в рамках подхода Горохова–Липанова–Русяка, влияния газовой фазы на процесс горения в конденсированной фазе (*k*-фазе) [7 и др.]. 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 твердое топливо. Считаем, что реакции в *k*-фазе удовлетворяют закону Аррениуса. Тогда в предположении «0»-мерности порядка химических реакций данная система уравнений,

описывающая процесс, имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_k}{\partial t} &= \kappa_k \cdot \frac{\partial^2 T_k}{\partial y_k^2} + v_k \cdot \frac{\partial T_k}{\partial y_k} + \frac{Q_k}{c_k} \cdot \Phi_k(T_k); \\ \frac{\partial \beta}{\partial t} &= v_k \cdot \frac{\partial \beta}{\partial y_k} + \Phi_k(T_k), \end{aligned} \quad (1)$$

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

До воспламенения необходимо положить $v_k = 0$. Условие воспламенения и последующего горения: $\beta_s = \beta_* = 1$.

До воспламенения начальные и граничные условия для системы (1) имеют вид

$$\begin{aligned} t=0, \quad y_k \geq 0, \quad T_k &= T_0, \quad \beta=0; \\ t \geq 0, \quad y_k=0, \quad -\lambda_k \cdot \frac{\partial T_k}{\partial y_k} &= \alpha_\tau \cdot (T_g - T_s), \quad \beta < \beta_*; \\ t \geq 0, \quad y_k = \infty, \quad T_k &= T_0, \quad \beta=0. \end{aligned} \quad (2)$$

После воспламенения граничные условия запишутся в виде

$$\begin{aligned} t > t_*, \quad y_k=0, \quad T_k &= T_s, \quad \beta_s = \beta_*, \\ -\lambda_k \cdot \frac{\partial T_k}{\partial y_k} &= \end{aligned} \quad (3)$$

$$= q_s - (c_{ps} - c_k) \cdot \rho_k \cdot v_k \cdot T_s - \left(a - \frac{1}{\rho_k}\right) \cdot \rho_k \cdot v_k \cdot p;$$

$$t > t_*, \quad y_k = \infty, \quad T_k = T_0, \quad \beta = 0.$$

Задача (1)–(3), дополненная замыкающими соотношениями, обезразмеренная и записанная в неравномерной (экспоненциальной) системе координат, интегрируется численным сеточным методом по явным и неявным конечно-разностным схемам [8 и др.]. Неявные схемы разрешаются способом прогонки.

В (1)–(3) и далее по тексту приняты обозначения: *T* – температура, *t* – время, *κ* – коэффициент температуропроводности, *y* – координата, *v* – скорость горения, *Q* – тепловой эффект реакции, *c* – удельная теплоемкость, *β* – глубина превращения топлива, *Z* – предэкспонент, *E* – энергия активации, *R*₀ – универсальная газовая постоянная, *λ* – коэффициент тепло-

проводности, α_t – коэффициент теплоотдачи, q – плотность теплового потока, ρ – плотность, a – коволюм, p – давление. Символы: k – конденсированная фаза (ТТ), g – газ, s – поверхность горения, p – давление, * – специальное значение.

Газовая динамика в камере сгорания ТСТТ

Для математического описания процесса течения в камере сгорания ТСТТ будем использовать подходы механики сплошных сред [9 и др.]. Воздух, газообразные продукты сгорания заряда воспламенительного устройства и заряда твердого топлива считаем гомогенной смесью. Наличие незначительного по массе количества твердой фазы в такой смеси будем учитывать путем корректировки значений ее показателя адиабаты k и удельной теплоемкости при постоянном давлении c_p по известным соотношениям.

Полная (трехмерная и нестационарная) система вихревых дифференциальных уравнений газовой динамики для гомогенного потока в камере сгорания ТСТТ запишется в виде:

– уравнения неразрывности (сохранения массы)

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{W}) &= G_w + G_g; \\ \frac{\partial(\rho \varphi)}{\partial t} + \text{div}(\rho \varphi \mathbf{W}) &= \varphi_w \cdot G_w + \varphi_g \cdot G_g; \\ \varphi &= k, c_p, a; \end{aligned} \quad (4)$$

– уравнения сохранения импульса по осям координат

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \mathbf{W}) + \frac{\partial p}{\partial x} &= W_{xw} \cdot G_w + W_{xg} \cdot G_g; \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \mathbf{W}) + \frac{\partial p}{\partial y} &= W_{yw} \cdot G_w + W_{yg} \cdot G_g; \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \mathbf{W}) + \frac{\partial p}{\partial z} &= W_{zw} \cdot G_w + W_{zg} \cdot G_g; \end{aligned} \quad (5)$$

– уравнения сохранения полной удельной энергии гомогенной смеси

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \text{div}(\rho E \mathbf{W}) + \text{div}(p \mathbf{W}) &= \\ = E_w \cdot G_w + E_g \cdot G_g, \end{aligned} \quad (6)$$

где для декартовой системы координат

$$\begin{aligned} \text{div}(\xi \mathbf{W}) &= \frac{\partial(\xi u)}{\partial x} + \frac{\partial(\xi v)}{\partial y} + \frac{\partial(\xi w)}{\partial z}, \\ \xi &= [\rho, \rho u, \dots, \rho E, p]. \end{aligned}$$

Для замыкания системы дифференциальных уравнений (4)–(6) используем уравнение состояния в виде

$$p = (k-1) \cdot \rho \cdot J \cdot \frac{1}{1-a \cdot \rho}, \quad J = \left(E - \frac{W^2}{2} \right). \quad (7)$$

Система уравнений (4)–(7), с учетом дополнительных соотношений, интегрируется численно с помощью метода Давыдова (метода крупных частиц) – метода постановки вычислительного эксперимента [3–7, 10 и др.]. В расчетах использовалась явная параметрическая (три параметра) полностью консервативная конечно-разностная схема метода. Применялась равномерная (однородная и полностью изотропная) расчетная сетка. На нерегулярных (не совпадающих с расчетной сеткой) границах расчетной области использовался аппарат дробных ячеек. Приход от пиропатрона, воспламенителя и с поверхности горения заряда ТТ осуществлялся путем впрыска в расчетные ячейки, геометрически расположенные в месте установки пиропатрона, воспламенителя и на поверхности горения заряда ТТ, продуктов сгорания с заданными изменяемыми во времени параметрами. На закрытых границах области интегрирования выполнялись условия непротекания. На открытых границах использовалась экстраполяция параметров потока из расчетной области.

В (4)–(7) приняты обозначения: G – приход продуктов сгорания, u – проекция вектора скорости вдоль оси Ox , v – проек-

ция вектора скорости вдоль оси OY , w – проекция вектора скорости вдоль оси OZ (ось OZ совпадает с осью симметрии ТСТТ), W – модуль вектора скорости, E – полная удельная энергия, J – внутренняя удельная энергия. Символы: v – воспламенитель, w – заряд ТТ, x – вдоль оси OX , y – вдоль оси OY , z – вдоль оси OZ .

Движение заглушки соплового блока или снаряда

Поступательное движение заглушки соплового блока ТСТТ или движение снаряда артиллерийского выстрела описывается уравнением вида (второй закон Ньютона):

$$m_z \cdot \frac{dw_z}{dt} = \int_0^{s_z^l} p_z^l ds - \int_0^{s_z^r} p_z^r ds. \quad (8)$$

Изменение распределения давления во времени вокруг заглушки (или снаряда) берется из задачи газодинамического те-

чения в камере сгорания ТСТТ.

Уравнение движения (8) интегрируется численно методом Эйлера [8].

В (8) приняты обозначения: m – масса, s – площадь. Символы: z – заглушка, l – внутренняя сторона, r – внешняя сторона.

Пакет прикладных программ

Пакет прикладных программ написан с использованием операционной системы Linux Open SUSE 13.1 x86-64. Среда программирования – Kdevelop 4.5 (компилятор gcc 4.8.2). Язык программирования – C/C++ + OpenMP/OpenCL.

Некоторые результаты расчетов

На всех рисунках время показано в условных единицах, остальные параметры даны в безразмерном виде.

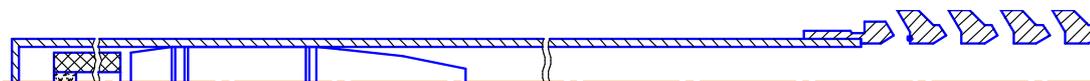


Рис. 1. Общая принципиальная компоновочная схема артиллерийского орудия

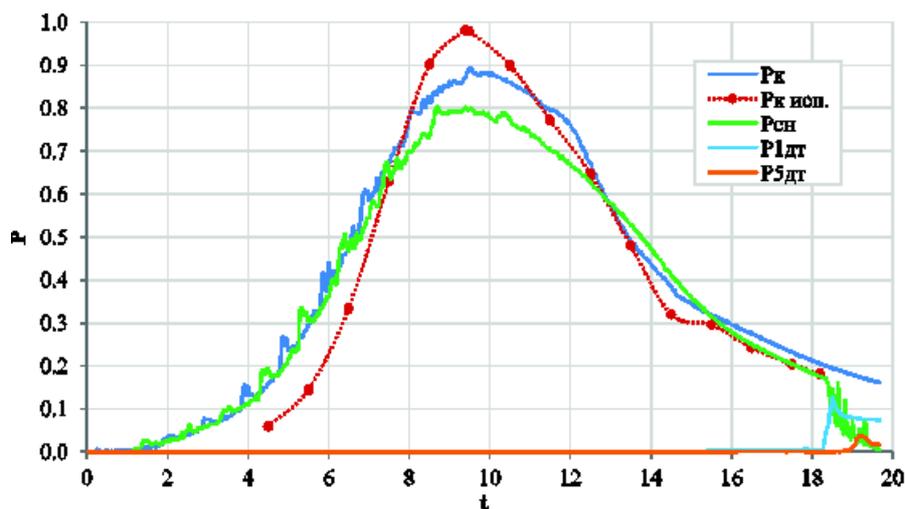


Рис. 2. Распределение во времени давления:

P_k – на дне камеры, $P_{к\text{ исп.}}$ – на дне камеры по результатам натуральных испытаний, $P_{сн}$ – под снарядом, $P_{1дт}$ – в первой камере дульного тормоза, $P_{5дт}$ – в пятой камере дульного тормоза

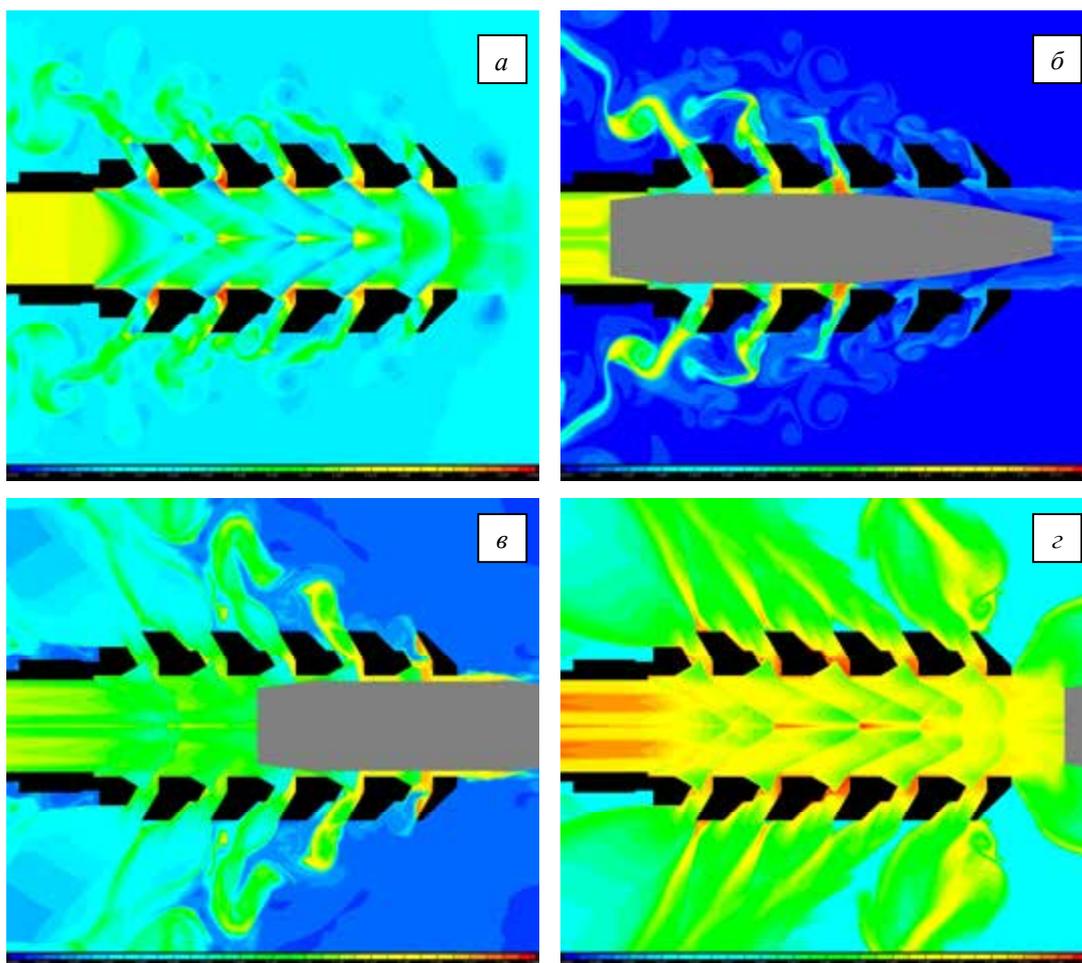


Рис. 3. Распределение в пространстве ствола и дульного тормоза температуры газового потока: а – снаряд в стволе, б – снаряд в дульном тормозе, в – начало выхода снаряда из дульного тормоза, г – снаряд вышел из дульного тормоза

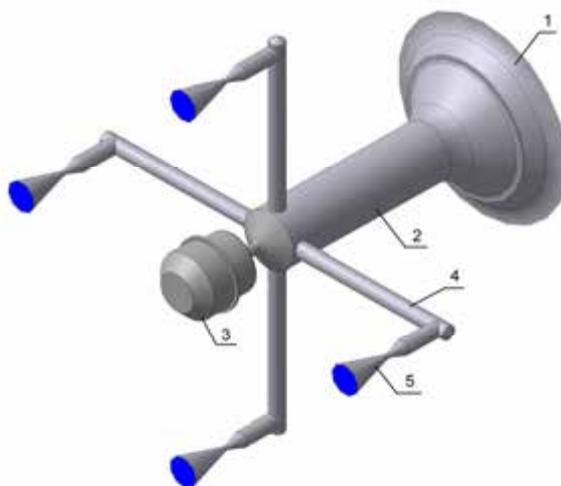


Рис. 4. Конфигурация газодинамического тракта РДТТ: 1 – свободный объем камеры сгорания, 2 – центральный газоход, 3 – камера воспламенителя, 4 – боковой газоход, 5 – сопловой блок

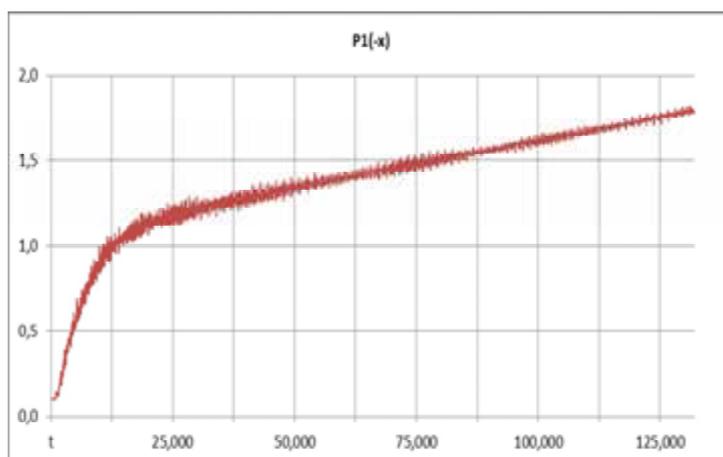


Рис. 5. Изменение во времени давления в фиксированной точке камеры сгорания РДТТ (высокочастотные пульсации давления с частотой колебаний 1-й радиальной моды + низкочастотные пульсации давления типа «биения»)

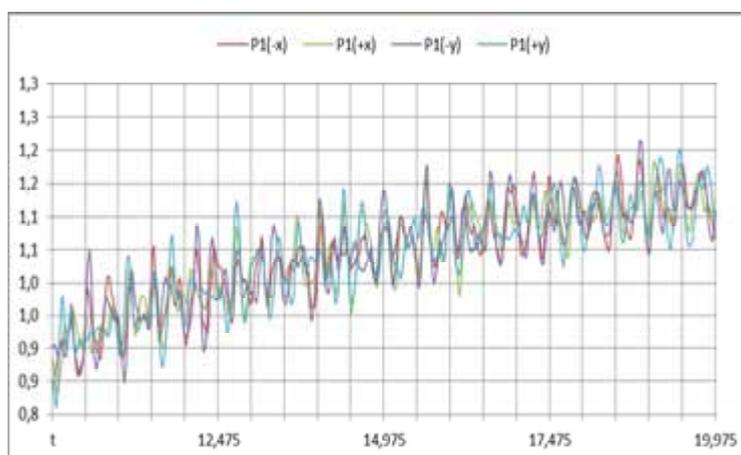


Рис. 6. Изменение во времени давления в 4 фиксированных точках камеры сгорания РДТТ (в плоскости XOY , $Z=const$, OZ – ось симметрии; высокочастотные пульсации давления с частотой колебаний 1-й радиальной моды)

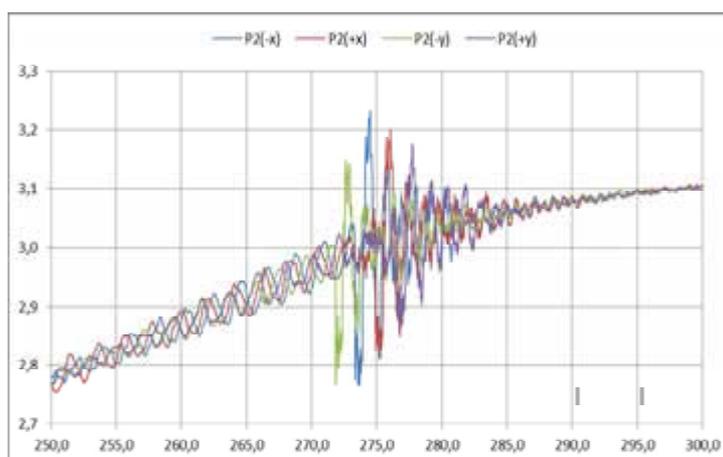


Рис. 7. Изменение во времени давления в фиксированных точках (вершинах) 4 боковых газопроводов РДТТ (в плоскости XOY , $Z=const$, OZ – ось симметрии; низкочастотные пульсации давления с частотой колебаний 1-й продольной моды + динамический отклик от одновременного вылета заглушек 4 сопловых блоков)

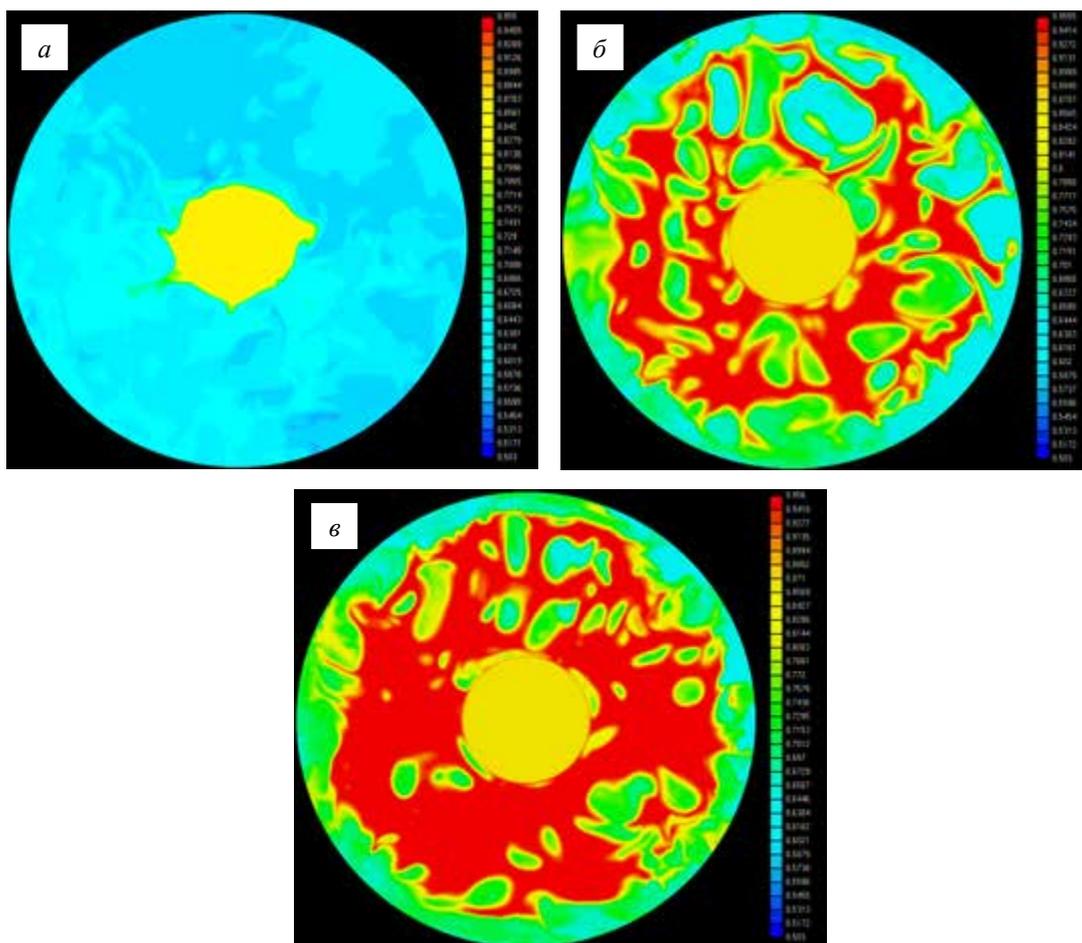


Рис. 8. Распределение в фиксированный момент времени: $t=032$ (а), $t=273$ (б), $t=372$ (в) у поверхности горения заряда ТТ (в плоскости XOY , $Z=const$, OZ – ось симметрии) c_p гомогенной смеси газов

Библиографический список

1. Алемасов В.Е., Дрегалин А.Ф., Тишин А.П. Теория ракетных двигателей. – М.: Машиностроение, 1980. – 533 с.
2. Липанов А.М., Бобрышев В.П., Алиев А.В. [и др.] Численный эксперимент в теории РДТТ / под ред. А.М. Липанова. – Екатеринбург: УИФ «Наука», 1994. – 301 с.
3. Егоров М.Ю., Егоров Я.В., Егоров С.М. Исследование неустойчивости рабочего процесса в двухкамерном РДТТ // Изв. вузов. Авиационная техника. – 2007. – № 4. – С. 39–43.
4. Егоров М.Ю., Егоров С.М., Егоров Д.М. Численное исследование переходных внутрикамерных процессов при выходе на режим работы РДТТ // Изв. вузов. Авиационная техника. – 2010. – № 3. – С. 41–45.
5. Егоров М.Ю., Егоров Д.М. Численное моделирование внутрикамерных процессов в бессопловом РДТТ: в сб. тр. XXIII семинара по струйным, отрывным и нестационарным течениям (с международным участием). – Нац. исслед. Томский политехн. ун-т, 2012. – С. 124–127.
6. Егоров М.Ю. Метод Давыдова – современный метод постановки вычислительного эксперимента в ракетном твердотопливном двигателестроении // Вест. ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2014. – № 37. – С. 6–70.
7. Давыдов Ю.М., Егоров М.Ю. Численное моделирование нестационарных переходных процессов в активных и реактивных двигателях / под ред. Ю.М. Давыдова. – М.: НАПН РФ, 1999. – 272 с.
8. Рихтмайер Р.Д., Мортон Х. Разностные методы решения краевых задач. – М.: Мир, 1972. – 420 с.
9. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. Изд. 5-е. – М.: Наука, 1978. – 736 с.; изд. 6-е, перераб. и доп. – М.: Наука, 1987. – 840 с.
10. Давыдов Ю.М. Крупных частиц метод. – В кн.: Математический энциклопедический словарь. – М.: Советская энциклопедия, 1988. – С. 303–304. // В кн.: Математика. Большой энциклопедический

**FORMULATION AND REALIZATION OF A COMPUTING EXPERIMENT
FOR UNSTEADY AND NONLINEAR PROBLEMS OF A SOLID FUEL ROCKET ENGINE**

M.Y. Egorov¹, S.M. Egorov², D.M. Egorov², R.V. Mormul³, A.Y. Panferov¹

¹ Perm National Research Polytechnic University

² Scientific Research Institute of Polymeric Material

³ Scientific-Production Association «Iskra»

In order to optimize the parameters of a rocket engine on solid fuel (and other technical systems on solid fuel) an attempt of a direct numerical simulation of its intrachamber processes is made. The adjoint formulation of the problem is considered. Each of the subtasks is considered in interrelation with the others and resolved simultaneously – at one step in time. To solve the given problem a set of applied programmes has been developed on a computer that uses the OpenCL standard of multithreading information processing. The results of numerical calculations are given.

Keywords: technical systems for solid fuels, intrachamber processes, burning of solid fuel, gas dynamics, statement a computational experiment.

Сведения об авторах

Егоров Михаил Юрьевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры высшей математики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ), 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: egorov-m-j@yandex.ru

Егоров Сергей Михайлович, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Научно-исследовательский институт полимерных материалов, 614113, г. Пермь, ул. Чистопольская, 16; e-mail: know_nothing@bk.ru

Егоров Дмитрий Михайлович, кандидат технических наук, заместитель главного конструктора, Научно-исследовательский институт полимерных материалов; e-mail: egorovdimitriy@mail.ru

Мормуль Роман Викторович, инженер-конструктор 2-й категории, Научно-производственное объединение «Искра», 614038, г. Пермь, ул. Академика Веденеева, 28; e-mail: rmormul@yandex.ru

Панферов Андрей Юрьевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры высшей математики, ПНИПУ; e-mail: AParfenov87@gmail.com

Материал поступил в редакцию 21.10.2016 г.