

УДК 623.454.3: 51.001.57

М. Ю. Егоров, доктор физико-математических наук, профессор, Пермский национальный исследовательский политехнический университет

А. Ю. Парфенов, аспирант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНУТРИКАМЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СРАБАТЫВАНИИ АРТИЛЛЕРИЙСКОГО ВЫСТРЕЛА*

Моделируется процесс срабатывания артиллерийского выстрела. Рассматривается сопряженная постановка задачи, включающая в себя: зажигание и горение порохового заряда, течение воздуха и продуктов сгорания в камере и стволе орудия, движение снаряда, работу дульного тормоза. Особое внимание уделяется влиянию на внутрибаллистический процесс зазора между стенками канала ствола и ведущего пояска снаряда. Приводятся результаты численного моделирования. Результаты хорошо согласуются с данными натурных испытаний.

Ключевые слова: численное моделирование, метод Давыдова, артиллерийский выстрел, горение порохового заряда, газовая динамика, движение снаряда, дульный тормоз.

Повышение боевого могущества напрямую связано с оптимизацией динамики внутрикамерных процессов и совершенствованием конструкции артиллерийской системы, в том числе и ствольной ее части.

Применение модифицированных порохов высокой энергетики, новых конструкций зарядов и схем компоновки артиллерийского выстрела повышает боевое могущество и одновременно существенно усложняет работоспособность артиллерийской системы. Высокая температура горения пороха, повышенные температуры потока продуктов сгорания за счет волновых эффектов, больших перепадов давления и интенсивного ускорения снаряда, а также эрозийные эффекты, возникающие при взаимодействии высокоскоростного потока продуктов сгорания со стенкой канала ствола, отрицательно сказываются на живучести ствола. Имеет свое отрицательное влияние и механическое воздействие на канал ствола ведущего пояска снаряда. Вследствие этого увеличивается внутренний диаметр ствола, следовательно, увеличивается зазор между стенками канала ствола и ведущего пояска снаряда. Это снижает баллистическую эффективность артиллерийского выстрела (снижается дульная скорость – основная характеристика выстрела) [1, 2].

С повышением боевого могущества значительно увеличивается реактивная сила отката, которая в ряде случаев является определяющей характеристикой артиллерийской системы. Компенсировать откатные усилия необходимо применением специальных устройств – амортизаторов, например, дульных тормозов с высоким коэффициентом эффективности [3]. Принцип действия дульного тормоза состоит в изменении направления и величины скорости движения части пороховых газов, истекающих из канала ствола после вылета снаряда.

Ниже в статье используются следующие обозначения: a – коволюм газа; c – удельная теплоемкость; E – энергия активации, полная удельная энергия; F –

сила; G – расходно-приходный комплекс; J – внутренняя удельная энергия; k – показатель адиабаты; m – масса; p – давление; Q – тепловой эффект реакции; q – плотность теплового потока; R – газовая постоянная, тяговое усилие; s – площадь; T – температура; t – время; v – скорость горения пороха, скорость вдоль оси OR ; \mathbf{W} – вектор скорости; W – модуль вектора скорости; w – скорость вдоль оси OZ ; y – координата вдоль оси OY ; Z – предэкспонент; α – коэффициент теплоотдачи, доля объема, занимаемая газовой фазой смеси; β – относительная весовая доля (глубина превращения); Δ – приращение параметра, зазор; κ – коэффициент температуропроводности; λ – коэффициент теплопроводности; μ – коэффициент динамической вязкости; ρ – плотность. Также используются следующие подстрочные и надстрочные символы: b – воспламенитель; c – снаряд; e – эквивалентное значение; g – газ; k – порох (κ -фаза); n – нормаль, p – частицы, параметр, зависящий от давления; s – поверхность горения; u – параметр, зависящий от скорости; w – пороховой заряд; $ис$ – истинное значение; * – специальное значение; 0 – начальное условие, стационарное значение; 1 – первая фаза гомогенно-гетерогенной смеси; 2 – вторая фаза гомогенно-гетерогенной смеси.

Физическая модель

На рис. 1 изображена общая принципиальная компоновочная схема ствольной части артиллерийского орудия.



Рис. 1. Общая принципиальная компоновочная схема артиллерийского орудия: камера, ствол, пороховой заряд, снаряд, дульный тормоз. A и B – точки фиксации расчетных параметров

Внутри порохового заряда у дна камеры располагается навеска воспламенителя, при зажигании которой пиропатроном пороховой заряд прогревается

и постепенно воспламеняется. Горение пороха осуществляется в нестационарном и турбулентном режимах. Из-за отсутствия полной герметичности между заснарядным и предснарядным пространствами продукты сгорания порохового заряда просачиваются в предснарядное пространство. При достижении пороховыми газами определенного давления (давления страгивания) в камере начинается свое движение снаряд. Его ведущий поясок постепенно врзается в нарезы ствола, и снаряд в режиме скольжения входит в ствол. За счет интенсивного накопления продуктов сгорания, поступающих с поверхности горения порохового заряда, и наличия свободного объема в заснарядном пространстве генерируются колебания давления (и других газодинамических параметров). Динамично ускоряясь от нарастающего давления, снаряд продолжает свое движение по стволу артиллерийского орудия. Постепенно со временем нестационарность процесса горения и колебательный режим течения продуктов сгорания вырождаются. Также постепенно по длине порохового заряда выгорает горящий свод. Покидая канал ствола, снаряд газодинамически взаимодействует с дульным тормозом. Дульный тормоз, разворачивая поток продуктов сгорания, генерирует отрицательную реактивную силу, которая снижает или полностью исключает силу отката артиллерийского орудия.

Зажигание и горение порохового заряда

Описание процесса нестационарного прогрева, воспламенения и последующего нестационарного и турбулентного горения пороха базируется на модели Мержанова – Дубовицкого с учетом влияния газовой фазы на процесс горения в конденсированной фазе (к-фазе) [4, 5]. Порох рассматривается 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 внутрь пороха. Считаем, что реакции в конденсированной фазе удовлетворяют закону Аррениуса. Тогда в предположении 0-мерности порядка химических реакций данная система уравнений, описывающая процесс нестационарного воспламенения и горения пороха, имеет вид

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

где

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

До воспламенения $v_k = 0$. Условие воспламенения и горения принимается в виде $\beta_s = \beta_* = 1$.

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

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

После воспламенения систему уравнений (1) необходимо решать совместно с уравнениями, описывающими процесс горения через параметры газовой фазы. При этом на поверхности горения необходимо выставлять граничные условия четвертого рода:

$$\begin{aligned} t > t_*, \quad y_k = 0, \quad T_k = T_s, \quad \beta_s = \beta_*; \\ -\lambda_k \frac{\partial T_k}{\partial y_k} = q_s - (c_{ps} - c_k) \rho_k v_k T_s - \left(a - \frac{1}{\rho_k}\right) \rho_k v_k p; \\ t > t_*, \quad y_k = \infty, \quad T_k = T_0, \quad \beta = 0, \end{aligned} \tag{3}$$

где q_s – плотность теплового потока на поверхность пороха со стороны газовой фазы.

Основным назначением уравнений газовой фазы зоны горения пороха является реализация связи между параметрами осредненного газодинамического течения и тепловым потоком на поверхность пороха. Для определения этой связи воспользуемся критериальными соотношениями в рамках подхода Ленуара – Робийера – Каракозова. Согласно им полная плотность теплового потока на поверхность пороха складывается из двух составляющих: плотности теплового потока, зависящей от давления q_p , и плотности теплового потока q_u , обусловленной течением газа вдоль поверхности горения. Таким образом, имеем:

$$q_s = q_p + q_u. \tag{4}$$

Система дифференциальных уравнений (1)–(3) с учетом замыкающих соотношений (4) интегрировалась численно конечно-разностным (сеточным) методом [4]. В расчетах использовались явные и неявные схемы аппроксимации первого и второго порядка точности. Для разрешения неявных конечно-разностных соотношений применялся метод прогонки.

Газовая динамика процесса течения

Для математического описания процесса течения в камере и стволе артиллерийского орудия будем использовать подходы механики сплошных многофазных сред [4–6]. Гомогенную смесь воздуха, продуктов сгорания навески воспламенителя и порохового заряда будем считать первой фазой. Несгоревшую часть порохового заряда – второй фазой. Первую и вторую фазы будем считать гомогенно-гетерогенной смесью со своими температурами и скоростями движения. В такой системе каждая фаза занимает часть объема смеси. Движение их рассматривается как движение взаимопроникающих и взаимодействующих сред.

С пространственной точки зрения будем изучать процесс течения в двухмерной осесимметричной (цилиндрической) постановке. Будем также рассматривать газообразные продукты сгорания как идеаль-

ный, полностью прореагировавший газ. Тепловыми потерями в стенки камеры, ствола, снаряда и дульного тормоза пренебрегаем. Вторая фаза гетерогенной смеси в движении не участвует (конструктивные ограничения). Силовым и тепловым межфазным взаимодействием также пренебрегаем.

С учетом перечисленных выше допущений полная нестационарная система вихревых дифференциальных уравнений газовой динамики для гомогенно-гетерогенного потока в камере, стволе и дульном тормозе артиллерийского орудия запишется в виде:

– уравнения неразрывности (сохранения массы)

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_g \mathbf{W}_1) &= G_{gb} + G_w; \\ \frac{\partial \rho_p}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_p \mathbf{W}_1) &= G_{pb}; \\ \rho_1 &= \rho_g + \rho_p; \\ \frac{\partial(\rho_g \varphi)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_g \varphi \mathbf{W}_1) &= \varphi_{gb} \cdot G_{gb} + \varphi_w \cdot G_w; \\ \varphi &= \mu, \lambda, a; \\ \frac{\partial(\rho_1 \psi)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_1 \psi \mathbf{W}_1) &= \psi_{eb} \cdot G_b + \psi_w \cdot G_w; \\ \psi &= k, c_p; \\ \frac{\partial \rho_2}{\partial t} &= -G_b - G_w; \end{aligned} \quad (5)$$

– уравнения сохранения импульса по осям координат

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho_1 v_1)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_1 v_1 \mathbf{W}_1) + \alpha \cdot \frac{\partial p}{\partial r} &= 0; \\ \frac{\partial(\rho_1 w_1)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_1 w_1 \mathbf{W}_1) + \alpha \cdot \frac{\partial p}{\partial z} &= 0; \end{aligned} \quad (6)$$

– уравнение сохранения полной удельной энергии смеси

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho_1 E_1)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_1 E_1 \mathbf{W}_1) + \operatorname{div}(\alpha p \mathbf{W}_1) &= \\ = J_{eb} \cdot G_b + J_w \cdot G_w, \end{aligned} \quad (7)$$

где для цилиндрической системы координат

$$\begin{aligned} \operatorname{div}(\xi \mathbf{W}_1) &= \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial(r \xi v_1)}{\partial r} + \frac{\partial(\xi w_1)}{\partial z}, \\ \xi &= (\rho_i, \rho_g \varphi, \rho_1 \psi, \rho_1 v_1, \rho_1 w_1, \rho_1 E_1, \alpha p); \\ i &= (g, p); \quad \varphi = (\mu, \lambda, a); \quad \psi = (k, c_p). \end{aligned}$$

Для замыкания системы дифференциальных уравнений (5)–(7) будем использовать уравнение состояния в виде

$$p = (k-1) \cdot \rho_1^{nc} \cdot \left(E_1 - \frac{W_1^2}{2} \right) \cdot \frac{1}{1-a \cdot \rho_1^{nc}}. \quad (8)$$

Выражения в (5)–(7) для приходных комплексов, а также используемые в расчетах дополнительные соотношения подробно изложены в [4].

Постановка граничных условий

На стенках камеры, ствола и дульного тормоза артиллерийского орудия выполняются условия непротекания:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{n}} = 0; \quad \varphi = (\rho_i, k, c_p, \mu, \lambda, a, p, E); \quad W_1^n = 0. \quad (9)$$

На подвижной границе расчетной области – поверхности снаряда – выполняются условия непротекания, но уже с учетом его движения:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{n}} = 0; \quad \varphi = (\rho_i, k, c_p, \mu, \lambda, a, p, E); \quad \bar{W}_1^n = 0. \quad (10)$$

В (10) \bar{W}_1^n – нормальная проекция вектора скорости потока в относительном (относительно снаряда) движении.

На открытых границах расчетной области выполняются условия экстраполяции параметров потока.

Система дифференциальных уравнений (5)–(7) с замыкающими соотношениями (8)–(10) интегрировалась численно методом Давыдова (методом крупных частиц), хорошо себя зарекомендовавшим при решении многих нелинейных задач механики сплошных сред [4, 7–14]. В расчетах использовалась явная параметрическая (три параметра) полностью консервативная конечно-разностная схема метода. Применялась равномерная ортогональная (однородная и изотропная) неподвижная расчетная сетка. На нерегулярных (не совпадающих с расчетной сеткой) границах расчетной области использовался аппарат дробных ячеек.

Движение снаряда

Поступательное движение снаряда описывается уравнением (второй закон Ньютона)

$$m_c \cdot \frac{dw_c}{dt} = \int_0^{s_c} p ds - \int_0^{s_c} p_{np} ds - F_c. \quad (11)$$

В (11) давление продуктов сгорания за снарядом p и перед снарядом p_{np} (так называемое противодавление) определяется из газодинамической задачи.

Реакция продольной силы сопротивления ведущего пояса снаряда F_c при его движении по стволу определяется по методике, изложенной в [5].

Уравнение движения снаряда (11) интегрируется численно методом Эйлера по явной конечно-разностной схеме [15].

Результаты расчетов

Приведем некоторые результаты расчетов процесса срабатывания артиллерийского выстрела в стволе орудия среднего калибра. Компоночная схема орудия и выстрела к нему показаны на рис. 1. На рисунках все параметры представлены в безразмерном виде.

На рис. 2–5 показано изменение во времени ряда основных расчетных параметров процесса срабатывания артиллерийского выстрела с учетом наличия зазора между стенками канала ствола и ведущего

пояска снаряда. Величина зазора в самой узкой его части, рассчитанная по площади проходного сечения между стенкой ствола и стенкой снаряда, равна $\Delta \approx 0,6 \cdot 10^{-3}$ м. Наблюдается хорошее соответствие данных расчета и данных полевых испытаний артиллерийского орудия по дульной скорости и максимальному давлению в камере. Учет наличия зазора между стенками канала ствола и ведущего пояска снаряда снижает дульную скорость на $\sim 4\%$.

Тяговое усилие (см. рис. 5) вычислялось по следующей зависимости:

$$R = \int_s (p_1 \cdot |w_1| \cdot w_1 + \varphi) ds, \quad \varphi = (p - p_0).$$

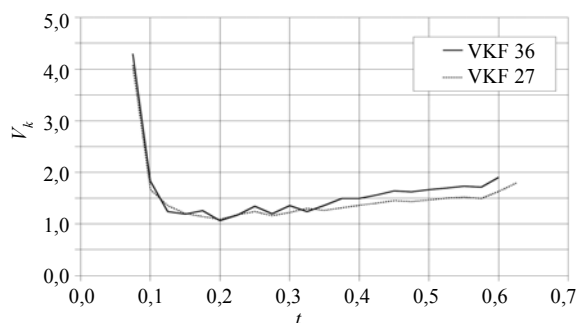


Рис. 2. Изменение во времени скорости горения порохового заряда: V_k^f – фактическая скорость горения; V_k^c – стационарная скорость горения; 27, 36 – расчетные точки по длине порохового заряда

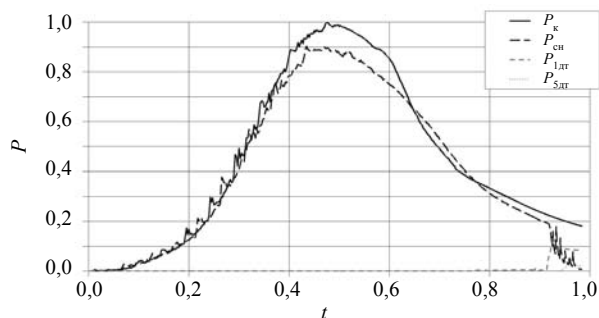


Рис. 3. Изменение во времени давления: P_k – на дне камеры; $P_{ен}$ – под снарядом; $P_{1ДТ}$ – в первой камере ДТ; $P_{5ДТ}$ – в пятой камере ДТ

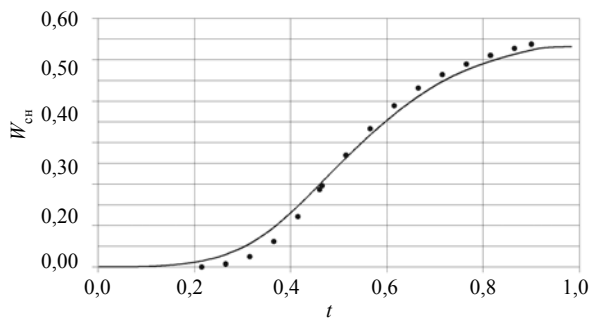


Рис. 4. Изменение во времени скорости движения снаряда (точками отмечены расчетные данные [16])

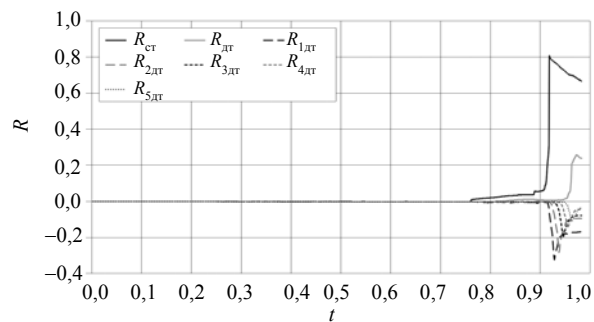


Рис. 5. Изменение во времени тягового усилия: $R_{ст}$ – на срезе ствола; $R_{ДТ}$ – на торцевом срезе ДТ; $R_{1ДТ}$ – на срезе 1 камеры ДТ; $R_{2ДТ}$ – на срезе 2 камеры ДТ; $R_{3ДТ}$ – на срезе 3 камеры ДТ; $R_{4ДТ}$ – на срезе 4 камеры ДТ; $R_{5ДТ}$ – на срезе 5 камеры ДТ

На рис. 6–9 показано пространственное распределение ряда газодинамических параметров при прохождении снарядом дульного тормоза в фиксированный момент времени.

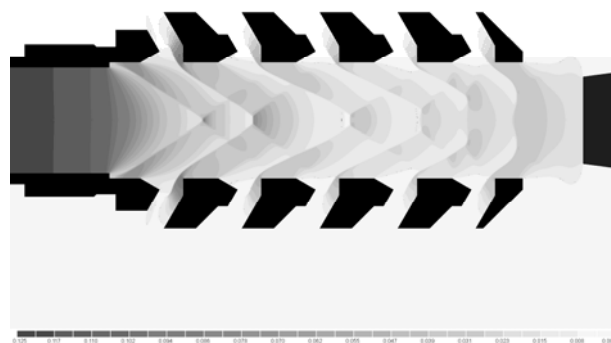


Рис. 6. Распределение давления газа p

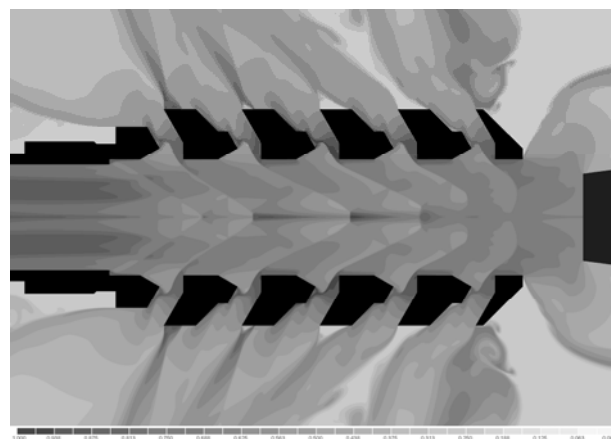


Рис. 7. Распределение температуры газа T

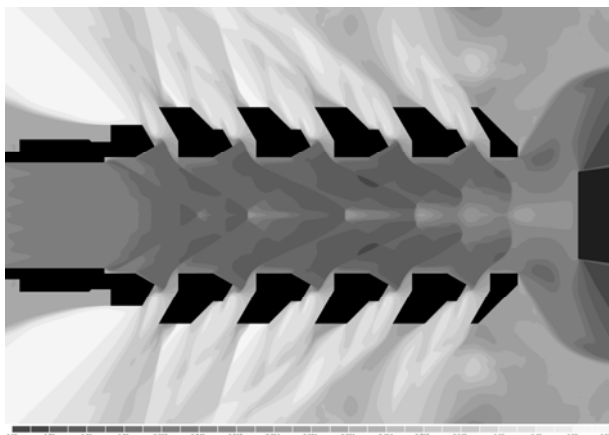


Рис. 8. Распределение осевой скорости течения газа w

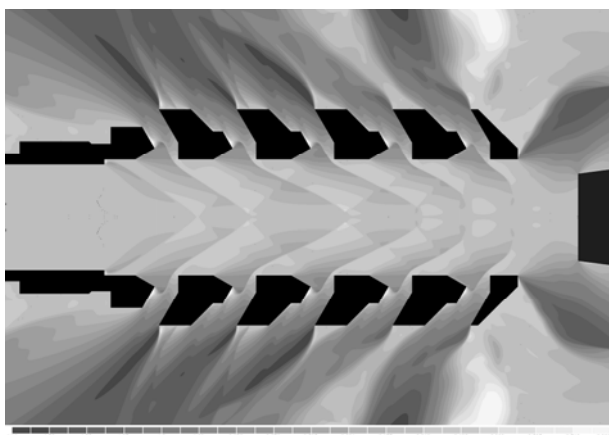


Рис. 9. Распределение радиальной скорости течения газа v

Библиографические ссылки

1. Серебряков М. Е. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет. – М. : Оборонгиз, 1962. – 703 с.
2. Внутренняя баллистика артиллерийских систем и некоторые задачи нестационарного теплообмена в их узлах / под ред. Б. В. Орлова. – М. : ЦНИИ информации, 1978. – 136 с.
3. Самойлов К. И. Морской словарь. – М. ; Л. : Гос. военно-морское изд-во НКВМФ Союза ССР, 1941. – Дульный тормоз.

4. Давыдов Ю. М., Егоров М. Ю. Численное моделирование нестационарных переходных процессов в активных и реактивных двигателях. – М. : НАПН РФ, 1999. – 272 с.

5. Ружак И. Г., Ушаков В. М. Внутрикамерные гетерогенные процессы в ствольных системах. – Екатеринбург : УрО РАН, 2001. – 259 с.

6. Нигматулин Р. И. Основы механики гетерогенных сред. – М. : Наука, 1978. – 336 с.

7. Давыдов Ю. М. Крупных частиц метод // Математическая энциклопедия. – Т. 3. – М. : Сов. энци., 1982. – С. 125–129.

8. Численный эксперимент в теории РДТТ / А. М. Липанов, В. П. Бобрышев, А. В. Алиев [и др.]. – Екатеринбург : УИФ «Наука», 1994. – 302 с.

9. Давыдов Ю. М., Егоров М. Ю., Шмотин Ю. Н. Нестационарные эффекты течения в турбине реактивного двигателя // Докл. Акад. наук. – 1999. – Т. 368. – № 1. – С. 45–49.

10. Давыдов Ю. М., Егоров М. Ю. Неустойчивость рабочего процесса в камере сгорания ракетного двигателя на твердом топливе // Докл. Акад. наук. – 2001. – Т. 377. – № 2. – С. 194–197.

11. Давыдов Ю. М., Давыдова И. М., Егоров М. Ю. Влияние полетной перегрузки на неустойчивость рабочего процесса в камере сгорания ракетного двигателя на твердом топливе // Докл. Акад. наук. – 2004. – Т. 398. – № 2. – С. 194–197.

12. Давыдов Ю. М., Давыдова И. М., Егоров М. Ю. Неустойчивость рабочего процесса в двухкамерном ракетном двигателе на твердом топливе // Докл. Акад. наук. – 2011. – Т. 439. – № 2. – С. 188–191.

13. Численное моделирование внутрикамерных процессов при выходе на режим работы ракетного двигателя твердого топлива / Г. Н. Амарантов, М. Ю. Егоров, С. М. Егоров, Д. М. Егоров, В. И. Некрасов // Вычислительная механика сплошных сред = Computational Continuum Mechanics. – 2010. – Т. 3. – № 3. – С. 5–17.

14. Егоров М. Ю., Егоров Д. М. Численное моделирование внутрикамерных процессов при срабатывании бессоплового РДТТ // Вестник ИжГТУ. – 2012. – № 4(56). – С. 174–178.

15. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. – СПб. : Лань, 2008. – 832 с.

16. Численное исследование динамики внутрикамерных процессов при срабатывании артиллерийского выстрела / науч. рук. НИР М. Ю. Егоров. – НТО ПНИПУ ; ЗАО «СКБ ОАО «Мотовилихинские заводы». – Пермь, 2011. – 64 с.

M. Yu. Egorov, DSc (Physics and Mathematics), Professor, Perm National Research Polytechnic University

A. Yu. Parfenov, Post-graduate, Perm National Research Polytechnic University

Numerical Simulation of In-Chamber Processes Generated by the Artillery Shot

The operation of the artillery shot is simulated. Conjugate problem statement is considered, which includes: ignition and burning of powder charge, air and combustion products flow in the chamber and in the barrel, projectile movement, and muzzle brake work. Special attention is paid to influence of the gap between the walls of the barrel and a projectile drive belt on internal ballistics process. The results of numerical simulation are presented. The results agree well with the field tests.

Key words: numerical simulation, Davydov method, artillery shot, powder charge burning, gas dynamics, projectile movement, muzzle brake.