

УДК 623.5

М.Ю. Егоров, А.Ю. Парфенов

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет

Д.М. Егоров

НИИ полимерных материалов, г. Пермь

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВНУТРИКАМЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СРАБАТЫВАНИИ АРТИЛЛЕРИЙСКОГО ВЫСТРЕЛА

Путем проведения прямого вычислительного эксперимента исследуется 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 пояса 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.

M.Yu. Egorov, A.Yu. Parfenov

Perm National Research Politechnic University

D.M. Egorov

Research institute of polymeric materials, Perm

NUMERICAL RESEARCH OF DYNAMICS IN THE COMBUSTION CHAMBER OF PROCESSES AT OPERATION OF AN ARTILLERY SHOT

In offered work by realization of direct computing experiment the process of operation of an artillery shot is investigated. Adjoint problem is considered, including: ignition and burning of a gunpowder charge, flow of air and products of combustion in chamber and trunk of the cannon, movement of a shell, work of a blew brake. The special attention is given to influence on interchamber process of a backlash between walls of the channel of a trunk and guiding belt of a shell. The results of numerical modeling are presented. The results are well match to the full-scale tests data.

Keywords: numerical simulation, Davydov method, artillery shot, burning of a gunpowder charge, gas dynamics, movement of a shell, blew brake.

Повышение боевого могущества напрямую связано с оптимизацией динамики внутрикамерного процесса 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 эрозионные эффекты, возникающие при взаимодействии высокоскоростного потока продуктов сгорания со стенкой канала ствола, отрицательно сказываются на живучести ствола. Вносит свой отрицательный вклад и механическое воздействие на канал ствола ведущего пояска снаряда. Вследствие чего увеличивается внутренний диаметр ствола, а 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.

Дульный тормоз – устройство-компенсатор, предназначенное для уменьшения силы отдачи, вызванной движением продуктов сгорания порохового заряда, выходящих из ствола артиллерийского орудия при выстреле вслед за снарядом, и повышения кучности стрельбы [3]. Принцип действия дульного тормоза состоит в изменении направления и величины скорости движения части пороховых газов, истекающих из канала ствола после вылета снаряда (скорость движения пороховых газов в дульном тормозе может достигать ~2000–3000 м/с). Применение дульного тормоза на полевых орудиях позволяет сделать их легче, сохранив при этом их мощность. На бронетехнике – сократить длину отката, что дает возможность вписать более мощную артиллерийскую систему в башню меньших габаритов. С применением дульного тормоза связан и ряд проблем, таких как: демаскировка позиции орудия облаком пы-

ли (или снега), возникновение по бокам и позади орудия опасной для личного состава зоны (за счет резкого увеличения громкости выстрела) и пр. Кроме того, дульный тормоз делает откат менее ровным, из-за чего, например, на современных танковых гладкоствольных пушках от него отказались в пользу большей точности стрельбы.

Экспериментальные исследования процесса срабатывания артиллерийского выстрела важны, и их, конечно, нужно проводить. Однако они не дают требуемого объема информации. При экспериментальном исследовании обычно проводится замер параметра (например, давления) в точке или в нескольких точках, а необходимо проводить замеры во всей исследуемой области. Кроме того, любой физический эксперимент требует значительных ресурсных и финансовых затрат и обычно неоперативен (растянут во времени). Поэтому в данном случае для глубокого и всестороннего исследования естественно привлечение методов математического моделирования [4–9], в первую очередь методов постановки вычислительного эксперимента, как наиболее точных и надежных расчетных методов [6, 8]. Сопоставляя расчетную и экспериментальную информацию, можно с минимальными затратами решить поставленную задачу, в данном случае – детально изучить динамику внутрикамерных процессов при срабатывании артиллерийского выстрела, и оптимизировать конструкцию артиллерийских систем.

Ниже по тексту статьи 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 – 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 (k -фаза); 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: камора, ствол, пороховой заряд, снаряд, дульный тормоз; A и B – точки фиксации расчетных параметров

Внутри порохового заряда у дна каморы располагается навеска воспламенителя, при зажигании которой пиропатроном пороховой заряд прогревается и постепенно воспламеняется. Горение пороха осуществляется в нестационарном и турбулентном режиме. 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 каморе начинает свое движение снаряд. Его ведущий поясок постепенно врезается 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 нестационарные колебания давления (и других газодинамических параметров). Динамично ускоряясь от нарастающего давления, снаряд продолжает свое движение по стволу артиллерийского орудия. Со временем нестационарность процесса горения и колебательный режим течения продуктов сгорания постепенно 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 (k -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

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

где $\Phi_k(T_k) = Z_k \exp\left(-\frac{E_k}{R_0 T_k}\right)$. До воспламенения $v_k = 0$.

Общепринятого условия воспламенения на данный момент не существует. В классических работах условие горения принимается в виде $\beta_s = \beta_* = 1$. При диспергировании $\beta_* < 1$. Это же условие выберем и в качестве условия воспламенения.

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

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

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)–(4), с учетом замыкающих соотношений [4], 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 процесса течения

Для математического описания процесса течения в камере и стволе артиллерийского орудия будем использовать подходы механики сплошных многофазных сред [4, 5, 8, 9].

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 двумерной осесимметричной (цилиндрической) постановке. Будем также рассматривать газообразные продукты сгорания как идеальный 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)

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

– уравнения сохранения импульса по осям координат

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

– уравнения сохранения полной удельной энергии смеси

$$\frac{\partial(\rho_1 E_1)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_1 E_1 \mathbf{W}_1) + \operatorname{div}(\alpha P \mathbf{W}_1) = J_{eb} G_b + J_w G_w, \quad (7)$$

где для цилиндрической системы координат

$$\operatorname{div}(\xi \mathbf{W}_1) = \frac{1}{r} \frac{\partial(r \xi v_1)}{\partial r} + \frac{\partial(\xi w_1)}{\partial z}, \quad \xi = (\rho_i, \rho_g \Phi, \rho_1 \Psi, \rho_1 v_1, \rho_1 w_1, \rho_1 E_1, \alpha P);$$

$$i = (g, p); \quad \Phi = (\mu, \lambda, a); \quad \Psi = (k, c_p).$$

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

$$P = (k-1) \rho_1^{\text{ис}} \left(E_1 - \frac{W_1^2}{2} \right) \frac{1}{1 - a \rho_1^{\text{ис}}}. \quad (8)$$

Выражения в (5)–(7) для приходных комплексов, функций силового и теплового межфазного взаимодействия, а также используемые в расчетах дополнительные соотношения подробно изложены в [4, 8].

Система дифференциальных уравнений (5)–(7) с замыкающими соотношениями интегрировалась численно методом Давыдова (методом крупных частиц), хорошо себя зарекомендовавшим при решении многих нелинейных задач механики сплошных сред [4, 6–9]. 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 снаряда

Поступательное движение снаряда описывается уравнением (второй закон Ньютона)

$$m_c \frac{dw_c}{dt} = \int_0^{s_c} P ds - \int_0^{s_c} P_{\text{пр}} ds - F_c. \quad (9)$$

В (9) давление продуктов сгорания за снарядом P и перед снарядом $P_{\text{пр}}$ (так называемое противодавление) определяется из газодинамической задачи.

Реакцию продольной силы сопротивления ведущего пояска снаряда F_c при его движении по стволу будем определять по методике, изложенной в [5].

Уравнение движения снаряда (9) интегрируется численно методом Эйлера по явной конечно-разностной схеме.

Результаты расчетов

Приведем некоторые результаты расчетов процесса срабатывания артиллерийского выстрела в стволе орудия среднего калибра. Компоновочная схема орудия и выстрела к нему показаны на рис. 1. На рис. 2 детализирована конструкция дульного тормоза. В качестве основного заряда используется формованный (трубчатый) пироксилиновый порох. Навеска воспламенителя – дымный ружейный порох. Срабатывание артиллерийского выстрела рассматривается при нормальной температуре $T_0 = 293 \text{ K}$.

В расчетах были приняты следующие шаги интегрирования: по координатам – $\Delta r = \Delta z = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, по времени – $\Delta t = (0,5 \dots 1,0) \cdot 10^{-7} \text{ с}$ (шаг по времени изменялся в зависимости от скорости движения снаряда). Непосредственно в области интегрирования размещается ~4400 000 расчетных ячеек. 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 ~0,5 с процессорного времени.

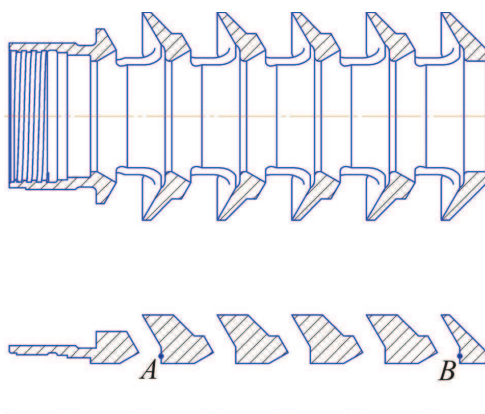


Рис. 2. Дульный тормоз и его компоновочная схема:
A и B – точки фиксации расчетных параметров

На рис. 3–6 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 $\Delta = 0,59 \cdot 10^{-3}$ м. Скорость снаряда на срезе дульного тормоза $v_c = 531,5$ м/с. Максимальное давление на дне каморы $P_k = 125,1$ МПа. На рис. 5 сопоставляются данные, полученные по вышеописанной методике расчета, с данными [10].

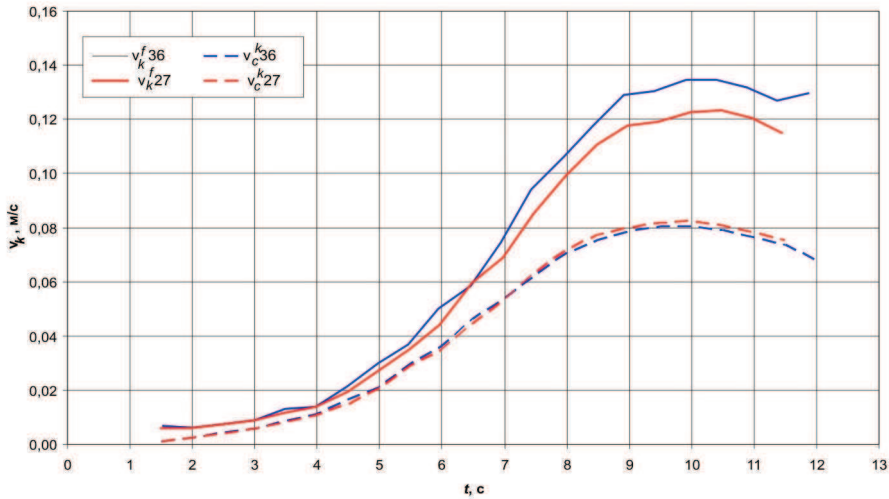


Рис. 3. Изменение во времени скорости горения порохового заряда: v_k^f – фактическая скорость горения; v_c^k – стационарная скорость горения; 27, 36 – расчетные точки по длине порохового заряда

Тяговое усилие (см. рис. 6) рассчитывалось по следующей зависимости:

$$R = \int_s (\rho |w| w + \varphi) ds, \quad \varphi = (P - P_0). \quad (10)$$

Знак параметра φ в (10) определяется знаком скорости вдоль оси ствола w .

Коэффициент эффективности дульного тормоза определялся по формуле

$$k_{эф} = \frac{R_{д.т} + R_{1д.т} + R_{2д.т} + R_{3д.т} + R_{4д.т} + R_{5д.т}}{R_{ст}}. \quad (11)$$

В (11) приняты следующие обозначения: $R_{\text{ст}}$ – на срезе ствола (без дульного тормоза – ДТ); $R_{\text{д.т}}$ – на торцевом срезе ДТ; $R_{1\text{д.т}}$ – на срезе первой камеры ДТ; $R_{2\text{д.т}}$ – на срезе второй камеры ДТ; $R_{3\text{д.т}}$ – на срезе третьей камеры ДТ; $R_{4\text{д.т}}$ – на срезе четвертой камеры ДТ; $R_{5\text{д.т}}$ – на срезе пятой камеры ДТ.

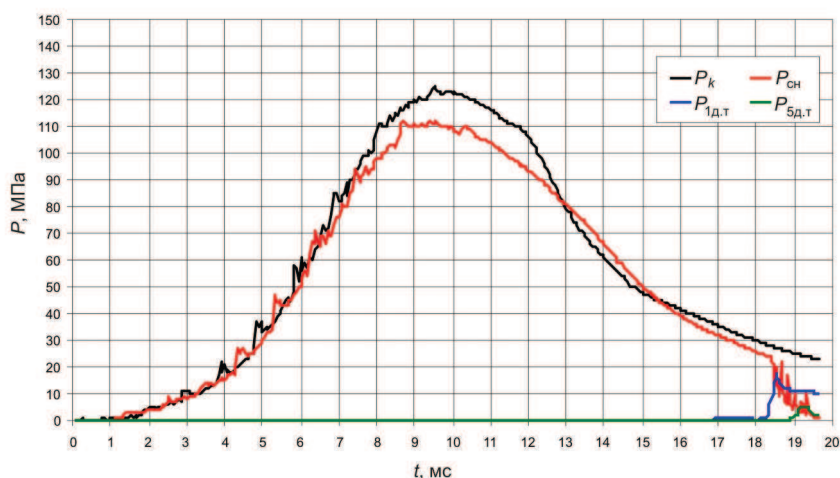


Рис. 4. Изменение во времени давления: P_k – на дне камеры; $P_{\text{сн}}$ – под снарядом; $P_{1\text{д.т}}$ – в первой камере ДТ; $P_{5\text{д.т}}$ – в пятой камере ДТ

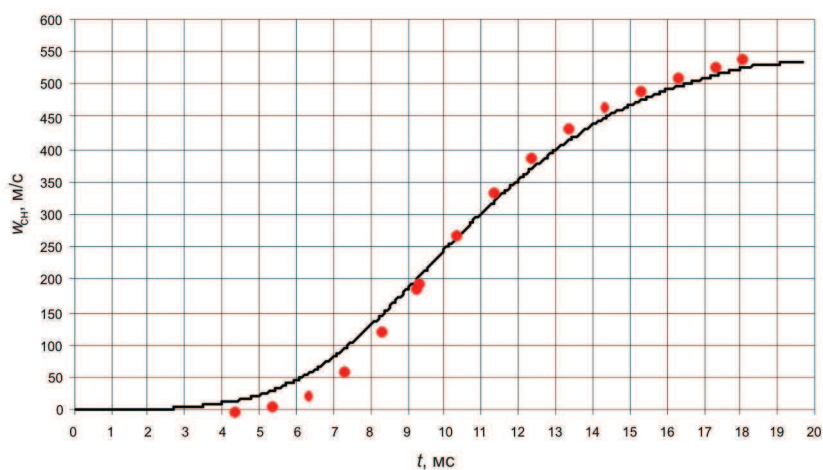


Рис. 5. Изменение во времени скорости движения снаряда (точками отмечены данные [10])

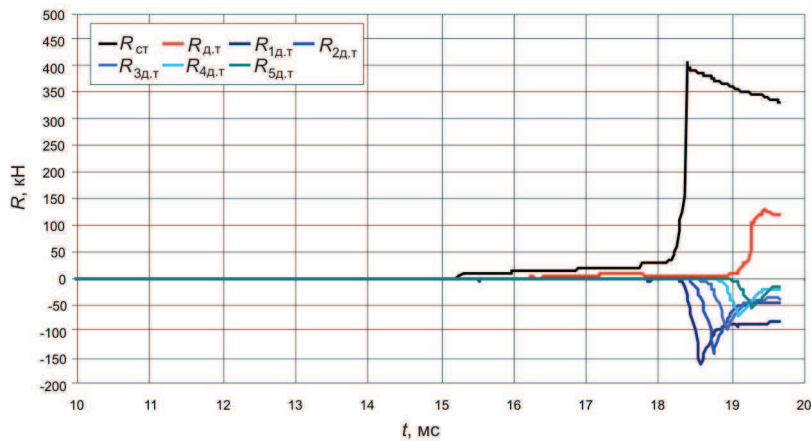


Рис. 6. Изменение во времени тягового усилия: $R_{ст}$ – на срезе ствола; $R_{д.т}$ – на торцевом срезе ДТ; $R_{1д.т}$ – на срезе первой камеры ДТ; $R_{2д.т}$ – на срезе второй камеры ДТ; $R_{3д.т}$ – на срезе третьей камеры ДТ; $R_{4д.т}$ – на срезе четвертой камеры ДТ; $R_{5д.т}$ – на срезе пятой камеры ДТ

На рис. 7–10 показано пространственное распределение ряда газодинамических параметров при прохождении снарядом дульного тормоза в фиксированный момент времени.

Процесс прогрева, зажигания и горения порохового заряда (см. рис. 3) носит нестационарный характер. Первая вспышка заряда реализуется через $\sim 0,5$ мс. Полностью заряд воспламеняется за $\sim 2,0$ мс. Фактическая скорость горения пороха существенно превышает стационарную скорость горения, полученную по зависимости вида $v_k = v_0 P_k$. Генерируется турбулентный режим горения порохового заряда, связанный с обдувом спутным потоком продуктов сгорания поверхности горения. Полное выгорание порохового заряда реализуется за $\sim 14,5$ мс.

Процесс течения воздуха и продуктов сгорания порохового заряда в заснарядном, предснарядном пространствах и дульном тормозе (рис. 4, 6, 7–10) имеет ярко выраженный нестационарный и существенно нелинейный вихревой характер. Особо следует выделить зону зазора между снарядом и стволом, а также зону в близлежащем пространстве около снаряда. Здесь реализуются значительные перепады давления и гиперзвуковые скорости потока продуктов сгорания. Наличие зазора снижает дульную скорость на 4 % и пиковое давление в ка-

море на 8,5 %. Значительные перепады давления и гиперзвуковое течение также реализуются непосредственно в дульном тормозе.

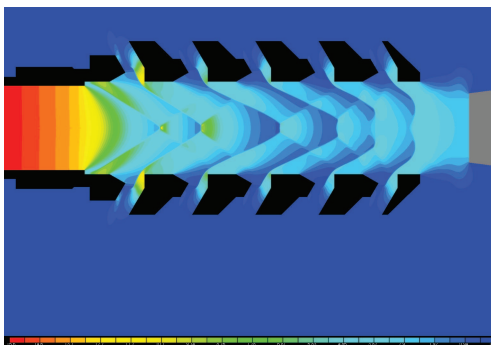


Рис. 7. Распределение давления газа (P , кг/м³)

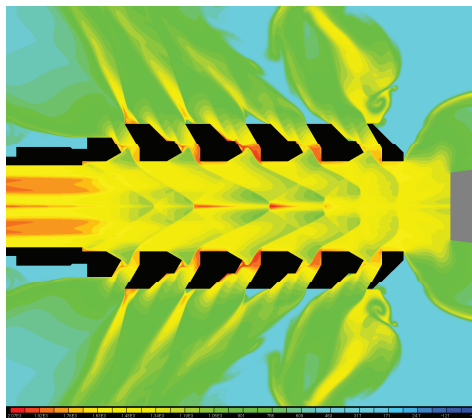


Рис. 8. Распределение температуры газа (T , К)

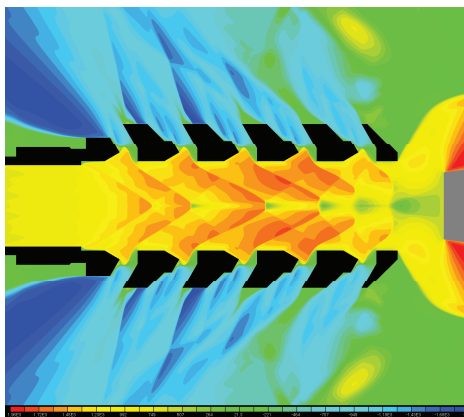


Рис. 9. Распределение осевой скорости течения газа (w , м/с)

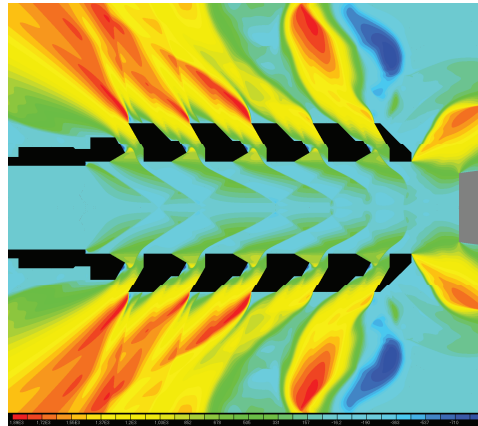


Рис. 10. Распределение радиальной скорости течения газа (v , м/с)

Пятикамерная конструкция дульного тормоза нагружается давлением продуктов сгорания неравномерно. Наиболее нагруженная – первая камера (у среза ствола), наименее нагруженная – пятая камера (у среза дульного тормоза). Среднее распределение скоростного потока и температуры по объему всех камер дульного тормоза при вылете снаряда из дульного тормоза примерно одинаковое. Наличие зазора между снарядом и стволом не оказывает существенного влияния на работу дульного тормоза. Коэффициент эффективности дульного тормоза рассмотренной конструкции, рассчитанный по (11), при вылете снаряда из ствола орудия $k_{эф} = -0,27$.

Библиографический список

1. Внутренняя баллистика артиллерийского и стрелкового оружия / под ред. Б.В. Орлова; ЦНИИ информации. – М., 1975. – 148 с.
2. Внутренняя баллистика артиллерийских систем и некоторые задачи нестационарного теплообмена в их узлах / под ред. Б.В. Орлова; ЦНИИ информации. – М., 1978. – 136 с.
3. Самойлов К.И. Морской словарь. – М.; Л.: Гос. воен.-мор. изд-во НКВМФ СССР, 1941.
4. Давыдов Ю.М., Егоров М.Ю. Численное моделирование нестационарных переходных процессов в активных и реактивных двигателях. – М.: НАПН РФ, 1999. – 272 с.
5. Русяк И.Г., Ушаков В.М. Внутрикамерные гетерогенные процессы в ствольных системах. – Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2001. – 259 с.

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

7. Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. Метод крупных частиц в газовой динамике. Вычислительный эксперимент. – М.: Наука, 1982. – 392 с.

8. Численное исследование актуальных проблем машиностроения и механики сплошных и сыпучих сред методом крупных частиц / Ю.М. Давыдов, И.М. Давыдова, М.Ю. Егоров, А.М. Липанов [и др.]. – Т. 1–5. – М.: НАПН РФ, 1995. – 1658 с.

9. 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.

10. Численное исследование динамики внутрикамерных процессов при срабатывании артиллерийского выстрела: НТО / Перм. нац. исслед. политехн. ун-т; ЗАО СКБ ОАО «Мотовилихинские заводы». – Пермь, 2011. – 64 с.

References

1. Orlov B.V. [et al.] *Vnutrennyaya ballistika artilleriyskogo i strelkovogo oruzhiya* [Internal ballistics of artillery and infantry weapons]. Moscow, 1975, 148 p.

2. Orlov B.V. [et al.] *Vnutrennyaya ballistika artilleriyskikh sistem i nekotorye zadachi nestatsionarnogo teploobmena v ikh uzlakh* [Internal ballistics of artillery systems and some problems of non-stationary heat exchange in their nodes]. Moscow, 1978, 136 p.

3. Samoylov K.I. *Morskoy slovar* [Sea dictionary]. Moscow, 1941.

4. 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.

5. Rusyak I.G., Ushakov V.M. *Vnutrikamernye geterogennye protsessy v stvolnykh sistemakh* [Intrachamber heterogeneous processes in gun barrel systems]. Yekaterinburg, 2001, 259 p.

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

7. Belotserkovskiy O.M., Davydov Yu.M. *Metod krupnykh chastits v gazovoy dinamike. Vychislitelnyy eksperiment* [Particle-in-cell method in gas dynamics. Computing experiment]. Moscow: Nauka, 1982, 392 p.

8. Davydov Yu.M., Davydova I.M., Egorov M.Yu., Lipanov A.M. [et al.] *Chislennoe issledovanie aktualnykh problem mashinostroeniya i mekhaniki sploshnykh i sypuchikh sred metodom krupnykh chastits* [Particle-in-cell method for numerical investigation of mechanical engineering actual problems and loose mediums]. Moscow, 1995, vol. 1–5, 1658 p.

9. 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.

10. *Chislennoe issledovanie dinamiki vnutrikamernykh protsessov pri srabatyvanii artilleriyskogo vystrela: nausno-tekhnicheskiiy otchet* [Numerical study of intrachamber processes dynamics when the artillery shot: science report]. Permskiy nacional'niy issledovatel'skiy politekhnicheskiiy universitet, ZAO CSC of OAO «Motovilikhinskiye Zavody», Perm, 2011, 64 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).

Парфенов Андрей Юрьевич (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Высшая математика» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: aparfenov87@gmail.com).

Егоров Дмитрий Михайлович (Пермь, Россия) – старший научный сотрудник 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, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: egorov-m-j@yandex.ru).

Parfenov Andrey Yuryevich (Perm, Russian Federation) – post-graduate student Department of Higher mathematics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: aparfenov87@gmail.com).

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