

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 ПРОЦЕССА СРАБАТЫВАНИЯ ДУЛЬНОГО ТОРМОЗА АРТИЛЛЕРИЙСКОГО ОРУДИЯ *

Моделируется процесс срабатывания дульного тормоза при выстреле артиллерийского орудия. Постановка задачи включает в себя: течение воздуха и продуктов сгорания в камере и стволе орудия, движение снаряда, работу дульного тормоза. Приводятся результаты численного моделирования. Результаты хорошо согласуются с данными натурных испытаний.

Ключевые слова: численное моделирование, метод Давыдова, артиллерийское орудие, газовая динамика, движение снаряда, дульный тормоз.

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

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 [1 и др.].

При выстреле вслед за снарядом из канала ствола истекают пороховые газы, скорость которых может достигать 2000...3000 м/с. Принцип действия дульного тормоза состоит в изменении направления и величины скорости движения части этих газов.

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.

Далее по тексту статьи используются следующие обозначения: a – коволом газа; C – удельная теплоемкость; E – полная удельная энергия; k – показатель адиабаты; m – масса; p – давление; R – тяговое усилие; s – площадь; T – температура; t – время; u – скорость вдоль оси OX ; v – скорость вдоль оси OY ; \mathbf{W} – вектор скорости; W – модуль вектора скорости; w – скорость вдоль оси OZ ; x – координата вдоль оси OX ; y – координата вдоль оси OY ; z – координата вдоль оси OZ ; Δ – приращение параметра, зазор; ρ – плотность. Также используются следующие подстрочные и надстрочные символы: s – снаряд; n – нормаль, p – параметр, зависящий от давления; 0 – начальное условие.

Физическая модель

На рис. 1 изображена пространственная модель дульного тормоза, закрепленного на стволе артиллерийского орудия.

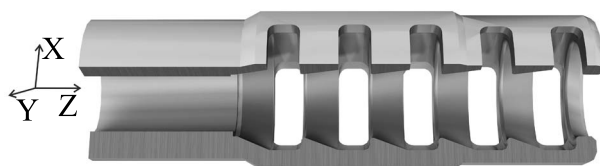


Рис. 1. Пространственная модель дульного тормоза, закрепленного на стволе артиллерийского орудия

При достижении определенного уровня давления (давления срабатывания) продуктов сгорания порохового заряда в камере начинает свое движение снаряд. Направляющий поясок снаряда постепенно врезается в нарезы ствола, и снаряд в режиме скольжения входит в ствол. Динамично ускоряясь, снаряд продолжает свое движение по стволу артиллерийского орудия. Вылетая из канала ствола, снаряд газодинамически взаимодействует с дульным тормозом.

Газовая динамика процесса течения

Газообразные продукты сгорания порохового заряда рассматриваем как идеальный полностью прореагировавший газ. Вместе с воздухом он составляет гомогенную газовую смесь. Тепловыми потерями в стенки камеры, ствола, снаряда и дульного тормоза пренебрегаем. Будем изучать процесс течения в нестационарной и трехмерной постановке.

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

– в виде уравнения неразрывности (сохранения массы)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{W}) = 0;$$

$$\frac{\partial(\rho \varphi)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \varphi \mathbf{W}) = 0, \quad \varphi = k, C_p, a; \quad (1)$$

– уравнения сохранения импульса по осям координат

$$\begin{aligned}\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho u \mathbf{W}) + \frac{\partial p}{\partial x} &= 0; \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho v \mathbf{W}) + \frac{\partial p}{\partial y} &= 0; \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho w \mathbf{W}) + \frac{\partial p}{\partial z} &= 0;\end{aligned}\quad (2)$$

– уравнения сохранения полной удельной энергии смеси

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho E \mathbf{W}) + \operatorname{div}(p \mathbf{W}) = 0, \quad (3)$$

где для декартовой системы координат

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

Для замыкания системы дифференциальных уравнений (1)–(3) будем использовать уравнение состояния в виде

$$p = (k-1)\rho \left(E - \frac{W^2}{2} \right) \frac{1}{1-a\rho}. \quad (4)$$

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

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{n}} = 0; \quad \varphi = (\rho, k, C_p, a, p, E); \quad W^n = 0. \quad (5)$$

На подвижной границе расчетной области – поверхности снаряда – выполняются условия непротекания, но учтено его движение:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{n}} = 0; \quad \varphi = (\rho, k, C_p, a, p, E); \quad \bar{W}^n = 0. \quad (6)$$

В (6) \bar{W}^n – нормальная проекция вектора скорости потока в относительном (относительно снаряда) движении.

На открытых границах расчетной области выполняются условия экстраполяции параметров потока.

Система дифференциальных уравнений (1)–(3) с замыкающими соотношениями (4)–(6) интегрировалась численно методом Давыдова (методом крупных частиц), хорошо себя зарекомендовавшим при решении многих нелинейных задач механики сплошных сред [2–10 и др.]. В расчетах использовалась явная параметрическая (три параметра) полностью консервативная конечно-разностная схема метода. Применялась равномерная ортогональная (однородная и полностью изотропная [8 и др.]) неподвижная расчетная сетка. На нерегулярных (не совпадающих с расчетной сеткой) границах расчетной области использовался аппарат дробных ячеек.

Для анализа многослойных схем с существенно нелинейными разностными уравнениями обычно используется эвристический подход, основанный на рассмотрении параболической формы их дифференциальных приближений [11, 12 и др.]. При этом подходе оценивается знак коэффициентов диффузии у диссипативных членов дифференциального приближения, содержащих частные производные второго порядка по пространственным переменным. Эти коэффициенты обычно группируются в виде матрицы – матрицы аппроксимационной вязкости. Положительность следа матрицы аппроксимационной вязкости рассматривается в качестве условия вычислительной устойчивости выбранной конечно-разностной схемы метода.

Движение снаряда

Поступательное движение снаряда описывается уравнением (второй закон Ньютона)

$$m_c \frac{dw_c}{dt} = \int_0^{s_c} p ds - \int_0^{s_c} p_{\text{пр}} ds - F_c. \quad (7)$$

В (7) давление продуктов сгорания за снарядом p и перед снарядом $p_{\text{пр}}$ (т. н. противодействие) определяется из газодинамической задачи.

Реакция продольной силы сопротивления ведущего пояса снаряда F_c при его движении по стволу определяется по методике, изложенной в [13].

Уравнение движения снаряда (7) интегрируется численно методом Эйлера по явной конечно-разностной схеме [14].

Результаты расчетов

Приведем некоторые результаты численного расчета процесса срабатывания дульного тормоза артиллерийского орудия среднего калибра (см. рис. 1). Все параметры на рисунках представлены в безразмерном виде.

Непосредственно расчета процесса срабатывания порохового заряда артиллерийского выстрела в работе не производится. Используется имитация условий разгона снаряда в стволе артиллерийского орудия по данным этого расчета. Имитируются газодинамические параметры (давление, температура, скорость и др. параметры потока продуктов сгорания порохового заряда) и скорость входа снаряда в дульный тормоз. Для этого в начальный момент времени в камере (точнее, в заснарядном пространстве) задаются величины газодинамических параметров, которые обеспечивают требуемый режим входа снаряда в дульный тормоз.

В расчетах были приняты следующие шаги интегрирования: по координатам – $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0,0019$ м, по времени – $\Delta t^{\text{max}} = 2,71 \cdot 10^{-7}$ сек. (шаг по времени изменялся в зависимости от скорости движения снаряда). Непосредственно в области интегрирования размещается ≈ 87500000 расчетных ячеек. Для уменьшения временных затрат вычисление производилось в несколько потоков. Один шаг интегрирования по времени реализуется рабочей станцией,

конфигурации – процессор Intel Core i7-2700K, материнская плата ASUS P8Z77-V LK, оперативная память DDR3 1333MHz 16Gb, за ≈ 12,6 сек. процессорного времени.

На рис. 2–4 показано изменение во времени ряда основных расчетных параметров процесса срабатывания артиллерийского орудия при прохождении снарядом дульного тормоза (ДТ).

Тяговое усилие (см. рис. 4) вычислялось по следующей зависимости:

$$R = \int_s (\rho |w| w + \varphi) ds, \quad \varphi = (p - p_0).$$

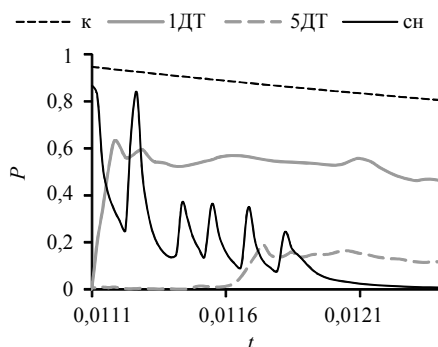


Рис. 2. Изменение во времени давления: P_k на дне камеры; $P_{1ДТ}$ – в первой камере ДТ; $P_{5ДТ}$ – в пятой камере ДТ; $P_{сн}$ – под снарядом

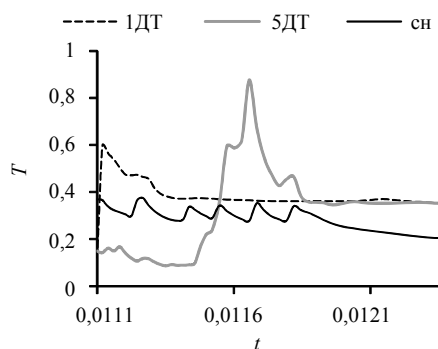


Рис. 3. Изменение во времени температуры: $T_{1ДТ}$ – в первой камере ДТ; $T_{5ДТ}$ – в пятой камере ДТ; $T_{сн}$ – под снарядом

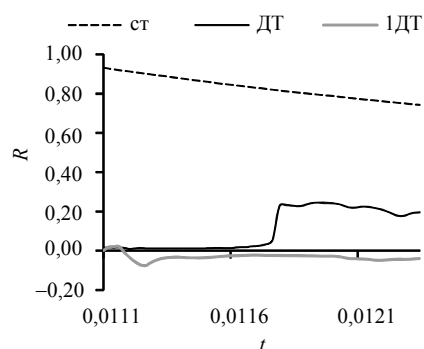


Рис. 4. Изменение во времени тягового усилия: $R_{ст}$ – на срезе ствола; $R_{ДТ}$ – на торцевом срезе ДТ; $R_{1ДТ}$ – на срезе первой камеры ДТ

На рис. 5–10 в различных проекциях показано пространственное распределение газодинамических параметров после вылета снаряда из дульного тормоза в фиксированный момент времени.

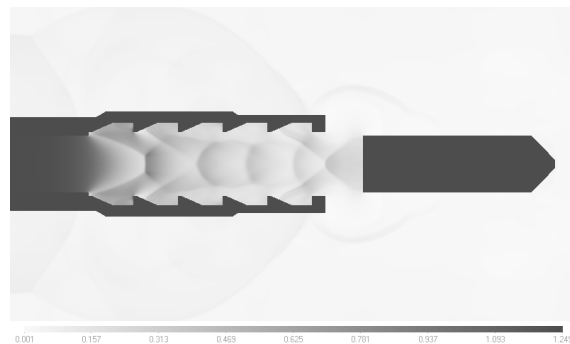


Рис. 5. Распределение плотности газа ρ в плоскости XOZ



Рис. 6. Распределение плотности газа ρ в плоскости YOZ

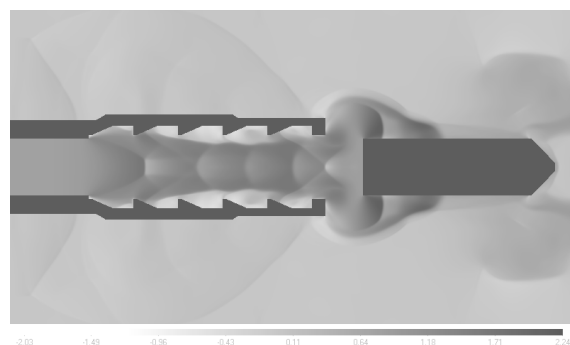


Рис. 7. Распределение осевой скорости течения газа w в плоскости XOZ

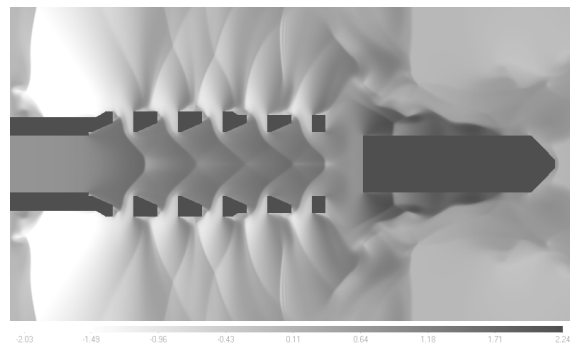


Рис. 8. Распределение осевой скорости течения газа w в плоскости YOZ

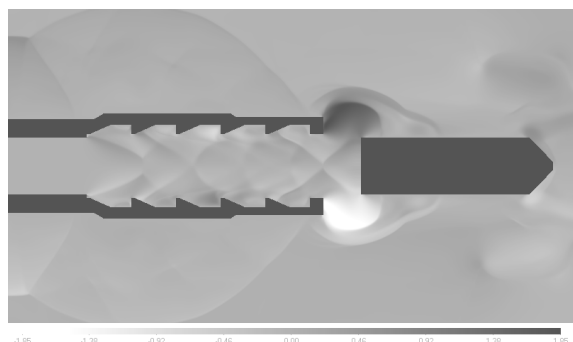


Рис. 9. Распределение радиальной скорости течения газа u в плоскости XOZ

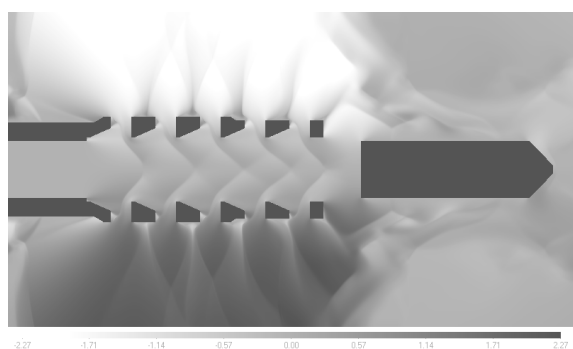


Рис. 10. Распределение радиальной скорости течения газа v в плоскости YOZ

Библиографические ссылки

1. Самойлов К. И. Морской словарь. – М. ; Л. : Гос. военно-морское изд-во НКВМФ Союза ССР, 1941. – [Дульный тормоз].
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. Крупных частиц метод // Математическая энциклопедия. – Т. 3. – М. : Советская энциклопедия, 1982. – С. 125–129.

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

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

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

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

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

9. 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.

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

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

12. 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.

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

14. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. – СПб. : Лань, 2008. – 832 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 the Artillery Muzzle Brake Response

The operation of the muzzle brake response during the artillery shot is simulated. The problem statement includes: air and combustion products flow in the chamber and in the barrel, projectile movement, and muzzle brake work. The results of numerical simulation are produced. The results agree well with the field tests.

Key words: numerical simulation, Davydov method, artillery piece, gas dynamics, projectile movement, muzzle brake.