

Научная статья

УДК 533.697, 519.63

doi: 10.17223/19988621/89/6

Моделирование совместных процессов зажигания поверхности таблетки-излучателя потоком двухфазных продуктов сгорания и вылета таблетки-излучателя из гильзы

Наталья Радиковна Гимаева¹, Леонид Леонидович Миньков²

^{1, 2} Томский государственный университет, Томск, Россия

¹ natalia.gimaeva@inbox.ru

² lminkov@ftf.tsu.ru

Аннотация. Представлены результаты математического моделирования процесса зажигания и вылета таблетки-излучателя из гильзы. Получены зависимости средне-объемного давления в гильзе от времени для двух радиусов частиц: 1 и 25 мкм. Оценены времена зажигания торцевой поверхности таблетки-излучателя. Высота зазора между цилиндрическими поверхностями таблетки и гильзы варьировала в пределах от 0.5 до 2 мм. Получены скорости вылета таблетки-излучателя из гильзы для разной высоты зазора между цилиндрическими поверхностями таблетки и гильзы.

Ключевые слова: ложные тепловые цели, горение, продукты сгорания, математическое моделирование, дульная скорость, внутренняя баллистика

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания № FSMN -2020-0028

Для цитирования: Гимаева Н.Р., Миньков Л.Л. Моделирование совместных процессов зажигания поверхности таблетки-излучателя потоком двухфазных продуктов сгорания и вылета таблетки-излучателя из гильзы // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2024. № 89. С. 77–88. doi: 10.17223/19988621/89/6

Original article

Simulation of simultaneous tablet–emitter surface ignition by a flow of two-phase combustion products and tablet–emitter ejection from a cartridge case

Nataliya R. Gimaeva¹, Leonid L. Min'kov²

^{1, 2} Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

¹ natalia.gimaeva@inbox.ru² lminkov@ftf.tsu.ru

Abstract. This article presents the results of mathematical modeling of the ignition and ejection of a tablet–emitter from a cartridge case. Heat exchange between the tablet–emitter surface and combustion products is a result of the thermal conductivity of the particles, gas convection, and radiation. When the tablet surface temperature reaches the ignition temperature, the combustion products begin to move from the tablet–emitter into the free volume of the cartridge case. When the burst pressure is reached, the membrane opens and the combustion products flow out of the cartridge case. Affected by the pressure of the ejected combustion products, the tablet comes into motion and leaves the cartridge case. Time dependences of the average volume pressure in the cartridge case are obtained for two particle radii (1 and 25 μm). The ignition time for the end surface of the tablet–emitter is estimated. The gap size between the cylindrical surfaces of the tablet and the cartridge case varies from 0.5 to 2 mm. The velocity of the tablet–emitter discharge from the cartridge case is obtained. It is revealed that gap size has a significant impact on the ignition process.

Keywords: false heat targets, combustion, combustion products, mathematical modeling, muzzle velocity, internal ballistics

Acknowledgments: This work was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (state assignment No. FSMN-2020-0028).

For citation: Gimayeva, N.R., Minkov, L.L. (2024) Simulation of simultaneous tablet–emitter surface ignition by a flow of two-phase combustion products and tablet–emitter ejection from a cartridge case. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 89. pp. 77–88. doi: 10.17223/19988621/89/6

Введение

Системы, известные как отстреливаемые ложные тепловые цели, играют важную роль в обеспечении безопасности полетов вертолетов и самолетов при выполнении различных миссий [1]. Ложные тепловые цели представляют собой устройства, способные выделять большое количество тепла при сгорании горючего состава, что препятствует обнаружению точного местоположения летательного аппарата, температура двигателя которого высока [2].

Ложные тепловые цели подобны боеприпасам сигнальных или осветительных пусковых устройств [3] и состоят из гильзы, заполненной твердым горючим составом. Для их успешного применения необходимо обеспечить устойчивое зажигание пиротехнического состава таблетки-излучателя ложной тепловой цели [4] до ее вылета из гильзы.

Для достижения полного зажигания торцевой части таблетки-излучателя во время ее нахождения в гильзе необходимо выявить влияние различных параметров на процесс зажигания и вылета таблетки-излучателя из гильзы. В рамках этой задачи нужно определить оптимальные параметры конструкции, такие как величина зазора между цилиндрическими поверхностями гильзы и таблетки, а также размер частиц, поступающих от инициирующего устройства и пиротехнического состава таблетки. Информация о влиянии данных параметров на процесс зажигания важна для минимизации возможности неудачных запусков ложных тепловых целей.

Цель данной статьи заключается в разработке физико-математической модели процесса зажигания и вылета таблетки-излучателя из гильзы, а также в изучении влияния размера частиц, поступающих от инициирующего устройства и пиротехнического состава таблетки, и величины зазора между цилиндрическими поверхностями гильзы и таблетки на время зажигания торцевой поверхности таблетки.

Физическая постановка задачи

Таблетка-излучатель 3, расположенная в гильзе 2, показана на рис.1. Гильза с одного конца закрыта мембраной 4, которая открывается при достижении давления форсирования. В начальный момент времени с поверхности инициатора 1 поступают продукты сгорания, состоящие из газа-инициатора и инертных частиц. Между поверхностью таблетки и продуктами сгорания происходит теплообмен за счет радиации, кондукции от частиц и конвекции продуктов сгорания. При достижении поверхностью таблетки температуры зажигания в свободный объем начинают поступать продукты сгорания, состоящие из газа таблетки и частиц. После достижения на мембране давления форсирования мембрана вскрывается. При этом под действием динамического напора продуктов сгорания, вытекающих из свободного объема, таблетка начинает двигаться вдоль оси x и покидает гильзу.

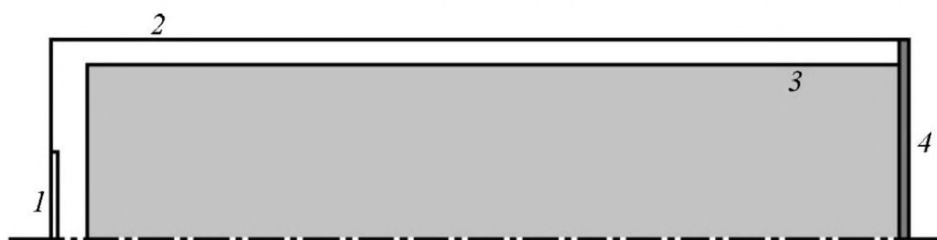


Рис. 1. Внешний вид изделия: 1 – инициирующее устройство, 2 – корпус, 3 – таблетка-излучатель, 4 – мембрана

Fig. 1. Product design: 1, initiator; 2, cartridge case; 3, tablet-emitter; and 4, membrane

Будем рассматривать исследуемый процесс в рамках следующих допущений. Течение продуктов сгорания двумерное осесимметричное, продукты сгорания представляют собой вязкую сжимаемую многотемпературную и многоскоростную среду [5], состоящую из многокомпонентного газа (воздух, газ инициирующего устройства и газ от таблетки), частиц от инициирующего устройства и частиц от таблетки. Приход массы и энергии газа и частиц от горящей поверхности таблетки моделируется через источниковые члены в уравнениях сохранения [6].

Для оценки времени зажигания таблетки решается задача по подключению к горению поверхности таблетки-излучателя. Предполагается, что зажигание поверхности, т.е. включение ее в процесс горения, происходит постепенно после достижения температурой в данной точке некоторого критического значения. Температура поверхности обычно находится либо путем численного решения нестационарного уравнения теплопроводности [7, 8] либо путем решения обыкновенного дифференциального уравнения [9], полученного одним из интегральных методов [10, 11]. В данной работе используется второй способ как менее ресурсозатратный.

Процесс движения таблетки-излучателя в гильзе моделируется с помощью уравнения движения и с использованием технологии динамических сеток.

Определяющая система уравнений

Движение таблетки-излучателя моделируется следующей системой уравнений:

$$\frac{dV_t}{dt} = \frac{1}{m_t} \left(2\pi \int_0^{y_1} y p_t dy - \pi y_1^2 p_n \right), \quad \frac{dX_t}{dt} = V_t, \quad (1)$$

с начальными условиями $t = 0$, $V_t = 0$, $X_t = x_1$, где m_t – масса таблетки; p_t – давление на левом торце таблетки; p_n – давление снаружи гильзы.

Система уравнений, описывающая газодинамические процессы, происходящие внутри гильзы, за исключением области, занятой таблеткой, с соответствующими начальными условиями имеет вид:

– уравнение неразрывности для газа

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \mathbf{V}_g) = S_{m,g}, \quad (2)$$

– уравнение сохранения для i -й компоненты газа

$$\frac{\partial \rho_g Y_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \mathbf{V}_g Y_i) = \nabla \cdot (\rho_g D_{i,m} \nabla Y_i) + S_{i,g}, \quad (3)$$

где Y_i – массовая доля i -й компоненты газа: $i = 1$ – газ, поступающий от воспламенительного устройства, $i = 2$ – газ, поступающий с поверхности горячей таблетки,

$$p = \rho_g R T_g, \quad R = \sum_{i=1}^2 R_i Y_i + \left(1 - \sum_{i=1}^2 Y_i \right) R_3,$$

– уравнение неразрывности для частиц

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_s \mathbf{V}_s) = S_{m,s}, \quad (4)$$

где $s = 1$ – частицы, поступающие от воспламенительного устройства, $s = 2$ – частицы, поступающие с поверхности горячей таблетки.

Объемная доля частиц и газа определяется из соотношений

$$\alpha_1 = \frac{\rho_1}{\rho_{10}}, \quad \alpha_2 = \frac{\rho_2}{\rho_{20}}, \quad \alpha_g + \alpha_1 + \alpha_2 = 1,$$

где ρ_{s0} – плотность материала частиц.

Уравнение сохранения импульса для газа:

$$\frac{\partial \rho_g \mathbf{V}_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \mathbf{V}_g \mathbf{V}_g) + \alpha_g \nabla p = \nabla \cdot \bar{\boldsymbol{\tau}}_g + \sum_{s=1}^2 \mathbf{R}_{sg}, \quad (5)$$

где $\bar{\boldsymbol{\tau}}_g = \alpha_g \mu_g (\nabla \mathbf{V}_g + \nabla \mathbf{V}_g^T) - \alpha_g \frac{2}{3} \mu_g \nabla \cdot \mathbf{V}_g \cdot \bar{\mathbf{I}}$, α_g – объемная доля газа в смеси газа и частиц, μ_g – сдвиговая вязкость газа, $\bar{\boldsymbol{\tau}}_g$ – тензор вязких напряжений, $\bar{\mathbf{I}}$ – единичный тензор, p – давление газа.

Уравнение сохранения импульса для частиц:

$$\frac{\partial \rho_s \mathbf{V}_s}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_s \mathbf{V}_s \mathbf{V}_s) + \alpha_s \nabla p = \nabla \cdot \bar{\boldsymbol{\tau}}_s - \mathbf{R}_{sg}, \quad (6)$$

где $\bar{\boldsymbol{\tau}}_s = \alpha_s \mu_s (\nabla \mathbf{V}_s + \nabla \mathbf{V}_s^T) - \alpha_s \frac{2}{3} \mu_s \nabla \cdot \mathbf{V}_s \cdot \bar{\mathbf{I}}$, $\mathbf{R}_{sg} = K_{sg} (\mathbf{V}_s - \mathbf{V}_g)$, $K_{sg} = \frac{\alpha_s \rho_s}{\tau_s} f$,

$$f = \frac{\text{Re}_{sg}}{24} C_D, \quad \tau_s = \frac{\rho_s d_s^2}{18 \mu_g}, \quad C_D = \begin{cases} \frac{24}{\text{Re}_{sg}} (1 + 0.15 \text{Re}_{sg}^{0.687}), & \text{Re}_{sg} \leq 1000, \\ 0.44, & \text{Re}_{sg} > 1000. \end{cases}$$

Уравнение сохранения энергии для газа:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_g E_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \mathbf{V}_g H_g) = \nabla \cdot (\alpha_g \lambda_g \nabla T_g) - p \frac{\partial \alpha_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\boldsymbol{\tau}}_g \cdot \mathbf{V}_g) + \\ + \sum_{i=1}^3 h_{i,g} \rho_g D_{i,m} \nabla Y_i + \sum_{s=1}^2 (Q_{sg} + R_{sg} \mathbf{V}_g) + S_{h,g}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $H_g = \sum_{i=1}^3 h_{i,g} Y_i + \frac{\mathbf{V}_g^2}{2}$, $h_{i,g} = h_{i,g}^0(T_{ref}) + \int_{T_{ref}}^T c_{p,i} dT$, $E_g = H_g - \frac{\alpha_g p}{\rho_g}$, $Q_{sg} = h_{sg} A_s (T_s - T_g)$

, $h_{sg} = \frac{\lambda_g}{d_s} \text{Nu}_{sg}$, $A_s = \frac{6\alpha_p}{d_s}$, $\text{Nu}_{sg} = 2 + 0.6 \text{Re}_{sg}^{1/2} \text{Pr}_g^{1/3}$, $\text{Pr}_g = \frac{c_{p,g} \mu_g}{\lambda_g}$, $D_{i,m}$ – коэффици-

циент диффузии i -й компоненты газа в смеси.

Уравнение сохранения энергии для частиц:

$$\frac{\partial \rho_s H_s}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_s \mathbf{V}_s H_s) = \nabla \cdot (\alpha_s \lambda_s \nabla T_s) - p \frac{\partial \alpha_s}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\boldsymbol{\tau}}_s \cdot \mathbf{V}_s) - Q_{sg} - \mathbf{R}_{sg} \cdot \mathbf{V}_s + S_{h,s} \quad (7)$$

где $H_s = h_s + \frac{\mathbf{V}_s^2}{2}$, $h_s = h_s^0(T_{ref}) + \int_{T_{ref}}^T c_s dT$, $S_{m,g} = (1 - z_2) \cdot \rho_{T2} u_{02} p^{\nu_2} \cdot \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_p) \cdot \eta(T - T_*)$,

z_2 – массовая доля частиц в таблетке, ρ_{T2} – плотность состава таблетки, u_{02} – коэффициент в законе горения состава таблетки, ν_2 – показатель степени в законе горения состава таблетки, $\delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_p)$ – дельта функция Дирака, $\mathbf{x}_p$ – вектор положения горящей поверхности таблетки, $\eta(T - T_*)$ – единичная функция, T_* – температура зажигания поверхности таблетки.

Источниковые слагаемые имеют вид: $S_{1,g} = 0$, $S_{2,g} = S_{m,g}$, $S_{m,1} = 0$, $S_{m,2} = \frac{z_2}{1 - z_2} \cdot S_{m,g}$,

$S_{h,g} = S_{m,g} T_{p2} c_{p,g}$, $S_{h,1} = 0$, $S_{h,2} = S_{m,2} T_{p2} c_2$, $\mathbf{V} = U \cdot \mathbf{i} + V \cdot \mathbf{j}$.

Граничные условия

Стенка: $\mathbf{V}_g = \mathbf{V}_s = 0$, $\nabla Y_i = 0$, $\nabla T = 0$.

Выходная граница: $p = p_{out}$, $\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$, где $\varphi = \{\rho_s, \mathbf{V}_s, H_s\}$.

Ось симметрии: $V_s = V_g = 0$, $\frac{\partial U_g}{\partial y} = \frac{\partial U_s}{\partial y} = \frac{\partial H_g}{\partial y} = \frac{\partial H_s}{\partial y} = \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial \rho_g}{\partial y} = \frac{\partial \rho_s}{\partial y} = \frac{\partial Y_i}{\partial y}$.

Граница между инициирующим устройством и свободным объемом гильзы:

$$\rho_g U_g = (1 - z_1) \cdot \rho_{T1} u_{01} p^{v_1}, \quad V_g = 0, \quad \rho_1 = \frac{z_1}{1 - z_1} \cdot \rho_g, \quad V_1 = 0, \quad U_1 = U_g, \quad T_g = T_1 = T_{всп},$$

$$Y_1 = 1, \quad Y_2 = 0.$$

Температура поверхности топлива определяется из решения обыкновенного дифференциального уравнения, полученного методом интегральных соотношений с помощью аппроксимации профиля температуры внутри топлива экспоненциальной функцией

$$\frac{dT_w}{dt} = \frac{q_w^2}{\lambda_T \rho_T c_T (T_w - T_{wn})}, \quad (8)$$

с начальным условием: $T_w|_{t=0} = T_{wn}$, где $q_w = q_{conv} + q_{rad} + q_{cond}$, $q_{conv} = \alpha_{conv} (T - T_w)$, $q_{rad} = \varepsilon \sigma_0 (T^4 - T_w^4)$, $q_{cond} = \rho_{s0} V_s c_s (T_1 - T_w)$, ε – степень черноты газа, σ_0 – постоянная Стефана–Больцмана, c_s – теплоемкость вещества частицы, $\alpha_{conv} = 0.021 \text{Re}^{0.8} \text{Pr}_g^{0.43} \lambda_g / D_{ef}$, $\text{Re} = \rho_g V_{m,g} D_{ef} / \mu_g$, $D_{ef} = 4S/\Pi$ – эффективный диаметр канала, S – площадь поперечного сечения канала, Π – омываемый периметр поперечного сечения канала.

Метод решения

Для моделирования поступательного движения таблетки излучателя в гильзе был использован метод Layering (генерация слоев), который дорабатывает расчетную сетку слоями в соответствии с движением таблетки. В результате получается расчетная сетка, состоящая из слоев прямоугольных ячеек заданного размера с постоянно меняющимся количеством ячеек [12]. Такой вид динамической сетки достаточно просто реализуется посредством пользовательских функций в ANSYS Fluent, применение которых позволяет перестраивать сетку на основе изменения геометрии модели (в результате решения уравнения движения для таблетки) в процессе расчета [13].

Для решения системы определяющих уравнений применялся SIMPLE-подобный метод, основанный на раздельном решении уравнений количества движения для каждой фазы (Phase Coupled SIMPLE) [14]. Для аппроксимации конвективных членов уравнения использовалась неявная противопоточная схема первого порядка точности. Для нахождения давления на гранях ячеек использовался метод PRESTO!

Обсуждение результатов

Длина таблетки принималась равной 72 мм, диаметр инициирующего устройства 10 мм, ширина зазора между торцом таблетки и гильзой 2 мм, диаметр гильзы 30 мм. Высота зазора между цилиндрическими поверхностями таблетки и гильзы варьировала в пределах от 0.5 до 2 мм, размеры частиц варьировали от $r = 1$ мкм до $r = 25$ мкм. Давление срыва мембраны принималось равным 8 атм.

Расчеты проводились при следующих данных для воспламенительного состава инициирующего устройства: $\rho_{T1} = 3220 \text{ кг/м}^3$, $v_1 = 0.408$, $u_{01} = 3.74 \cdot 10^{-4} \text{ м/(с} \cdot \text{Па}^{v_1})$, $z_1 = 0.499$, $T_{p1} = 3430 \text{ К}$; для газовой фазы: $k = 1.25$, $R_1 = 156.3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$; для пиротехнического состава таблетки: $\rho_{T2} = 1800 \text{ кг/м}^3$, $v_2 = 0.4$, $u_{02} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м/(с} \cdot \text{Па}^{v_2})$, $z_2 = 0.681$, $T_{p2} = 2035 \text{ К}$, $T_* = 1100 \text{ К}$, $\lambda_T = 1.77 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$, $c_T = 1030 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$; для газовой фазы: $k = 1.48$, $R_2 = 343 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$.

Для исследования численного решения на сеточную сходимость в качестве критерия было выбрано время зажигания t_{ig} части торцевой поверхности таблетки-излучателя, расположенной напротив инициирующего устройства. Расчеты проводились на последовательности сеток с шагом 1 мм (сетка 1), 0.5 мм (сетка 2) и 0.25 мм (сетка 3). Шаг по времени равнялся 10^{-5} с . Высота зазора между цилиндрическими поверхностями таблетки и гильзы равнялась 2 мм, размеры частиц были выбраны радиусом 1 мкм. На сетке 1 время зажигания t_{ig} составило 1.3 мс, на сетке 2 – 1.5 мс, на сетке 3 – 1.6 мс. Конечно-разностная сетка 2 была выбрана для дальнейших расчетов.

На рис. 2 представлены линии тока газа для различных положений таблетки, полученных для радиуса частиц 1 мкм и ширины цилиндрического зазора 2 мм. Видно, что начиная с момента времени $t = 5 \text{ мс}$ между торцами гильзы и таблетки формируется вихревая зона, оттесняемая от торца таблетки продуктами сгорания таблетки. По мере движения таблетки-излучателя к выходу из гильзы происходит перемещение в том же направлении вихревой зоны, левее которой образуется застойная зона. В центральной приосевой зоне свободного объема формируется струйное течение за счет продуктов сгорания, поступающих от инициатора.

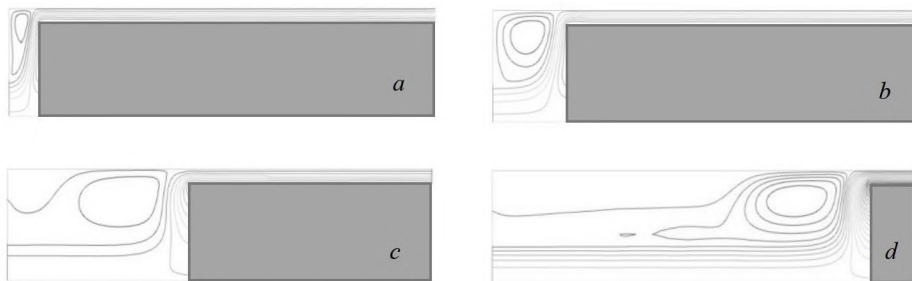


Рис. 2. Линии тока $d = 2 \text{ мм}$: $t = 5 \text{ мс}$ (a), $t = 10 \text{ мс}$ (b), $t = 22 \text{ мс}$ (c), $t = 40 \text{ мс}$ (d)

Fig. 2. Streamlines for $d = 2 \text{ mm}$ at $t =$ (a) 5, (b) 10, (c) 22, and (d) 40 ms

Как видно из рис. 3, частицы радиусом 1 мкм увлекаются потоком газа и не оседают на торцевую поверхность таблетки-излучателя, что и затрудняет процесс прогрева таблетки. Для частиц радиусом 25 мкм характерны оседание и накопление частиц от инициатора на торце таблетки, а также более интенсивный по сравнению с мелкими частицами процесс прогрева торцевой части таблетки.

На рис. 4, а представлено влияние ширины зазора на время зажигания торцевой части таблетки-излучателя для радиуса частиц $r = 1 \text{ мкм}$. Время зажигания части таблетки, которая расположена напротив инициирующего устройства, практически не зависит от ширины зазора между цилиндрическими поверхно-

стями гильзы и таблетки. Для оставшейся части торцевой поверхности таблетки-излучателя уменьшение ширины зазора ведет к увеличению времени зажигания. При увеличении радиуса частиц до $r = 25$ мкм (рис.4, *b*) ширина зазора незначительно влияет на время зажигания торца, при этом время зажигания с более узким зазором является минимальным.

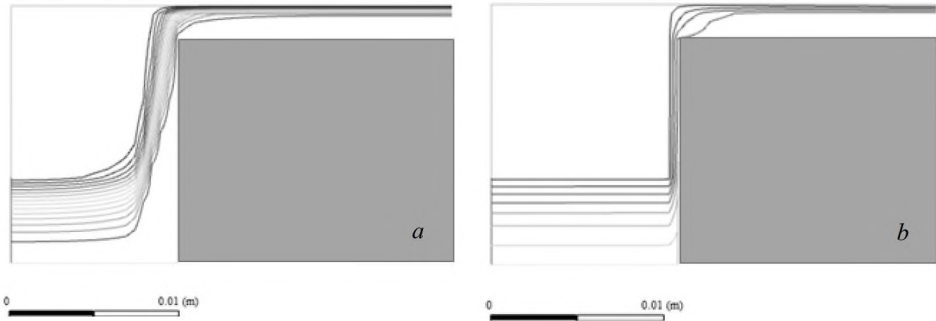


Рис. 3. Траектории частиц, исходящих от инициатора в момент времени 8 мс:
 $r = 1$ мкм (*a*), $r = 25$ мкм (*b*)

Fig. 3. Trajectories of the particles emitted from the initiator at a time of 8 ms for $r = (a)$ 1 and (*b*) 25 μm

Расчеты показывают, что увеличение ширины зазора между гильзой и цилиндрической частью таблетки и увеличение размера частиц ведут к снижению времени зажигания торцевой поверхности таблетки, что связано с более благоприятными условиями теплообмена между продуктами сгорания и таблеткой.

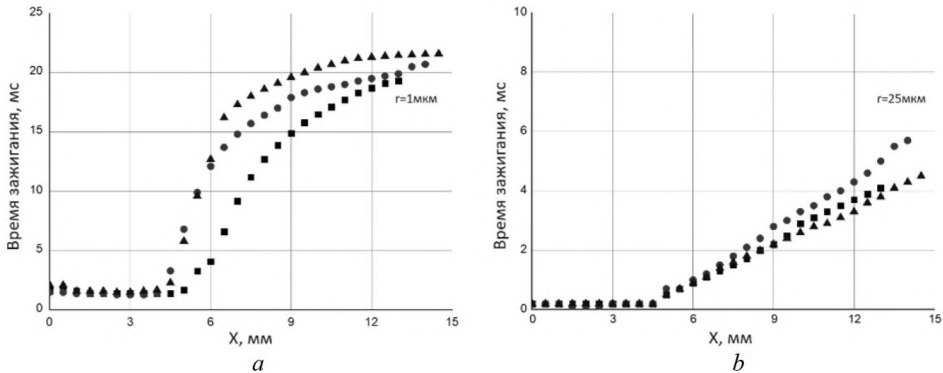


Рис. 4. Траектории частиц, исходящих от инициатора в момент времени 8 мс:
■ – $d = 2$ мм, ● – $d = 1$ мм, ▲ – $d = 0.5$ мм; $r = 1$ мкм (*a*), $r = 25$ мкм (*b*)

Fig. 4. Trajectories of the particles emitted from the initiator at a time of 8 ms:
 $d = 2$ mm (■), $d = 1$ mm (●), and $d = 0.5$ mm (▲) for $r = (a)$ 1 and (*b*) 25 μm

Размер частиц ($r = 1, 1.5, 5, 25$ мкм) оказывает существенное влияние на время зажигания торцевой поверхности таблетки-излучателя (рис. 5). Та приосевая часть торцевой поверхности, которая находится напротив иницирующего устройства, зажигается быстрее по сравнению с периферийной частью, что можно объяснить

существенным влиянием кондуктивного потока тепла от частиц инициатора. Уменьшение размера частиц ведет к увеличению времени зажигания периферийной части торцевой поверхности таблетки, что, по-видимому, связано с тем, что более мелкие частицы, как менее инертные, увлекаются потоком газа и не выпадают на периферийную часть торцевой поверхности таблетки.

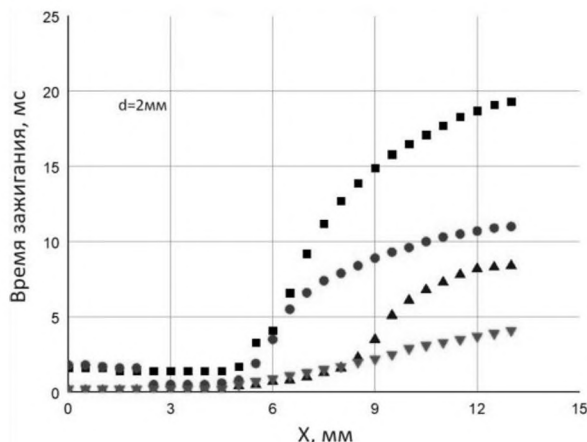


Рис. 5. Влияние размера частиц таблетки и инициатора на время зажигания торцевой части таблетки-излучателя: ■ – $r = 1$ мкм, ● – $r = 1.5$ мкм, ▲ – $r = 5$ мкм, ▼ – $r = 25$ мкм

Fig. 5. Effect of particle sizes of the tablet and initiator on the ignition time for the end part of the tablet–emitter: $r = 1$ μm (■), $r = 1.5$ μm (●), $r = 5$ μm (▲), and $r = 25$ μm (▼)

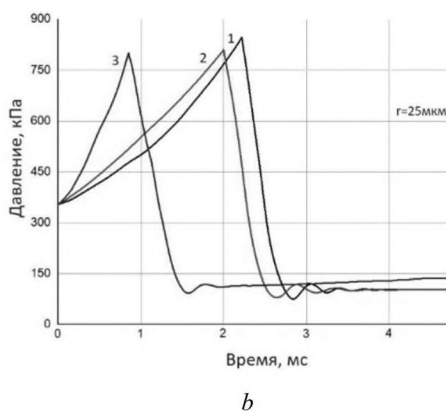
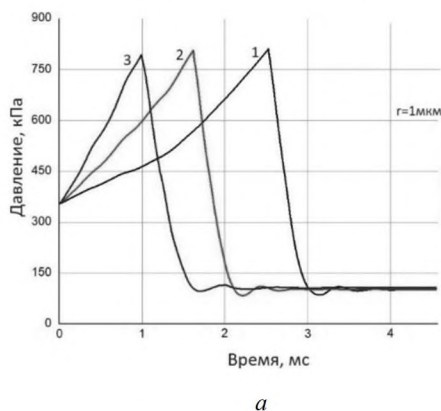


Рис. 6. Зависимость среднего объемного давления в гильзе от времени: 1 – $d = 2$ мм, 2 – $d = 1$ мм, 3 – $d = 0.5$ мм; $r = 1$ мкм (a), $r = 25$ мкм (b)

Fig. 6. Time dependence of the average volume pressure in a cartridge case: $d = (1) 2, (2) 1, \text{ and } (3) 0.5$ mm for $r = (a) 1$ and $(b) 25$ μm

Скорость подключения участков торцевой поверхности таблетки-излучателя к горению, а также свободный объем в гильзе влияют на скорость нарастания давления в гильзе. На рис. 6 приведены зависимости среднего объемного давления в гильзе от времени для разных величин ширины цилиндрического зазора и разных

размеров частиц. После достижения давления срыва мембраны (8 атм) давление падает и устанавливается равным квазистационарному давлению. Уменьшение ширины цилиндрического зазора и увеличение размера частиц ведет к более быстрому нарастанию давления и, следовательно, к более раннему срыву мембраны. В то же время более узкий цилиндрический зазор затягивает время спада давления в гильзе после срыва мембраны, что ведет к увеличению скорости вылета таблетки из гильзы (рис. 7).

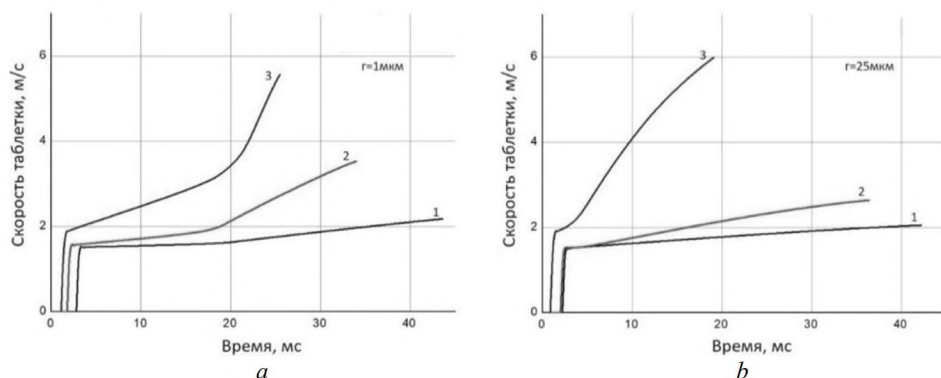


Рис. 7. Влияние ширины зазора на скорость движения таблетки: 1 – $d = 2$ мм, 2 – $d = 1$ мм, 3 – $d = 0.5$ мм; $r = 1$ мкм (а), $r = 25$ мкм (б)

Fig. 7. Effect of the gap size on the tablet velocity: $d = (1)$ 2, (2) 1, and (3) 0.5 mm for $r = (a)$ 1 and (b) 25 μm

Увеличение размера частиц в случае цилиндрического зазора 0.5 мм также ведет к росту скорости вылета таблетки из гильзы и не влияет на скорость вылета для зазора в 2 мм. Однако для зазора 1 мм увеличение размера частиц снижает скорость вылета таблетки.

Заключение

В рамках выполнения данного исследования установлено, что ширина зазора между цилиндрическими поверхностями гильзы и таблетки оказывает значительное влияние на процесс зажигания торцевой поверхности таблетки, проявляющееся в том, что увеличение ширины зазора способствует росту температуры торцевой поверхности таблетки и, следовательно, ведет к уменьшению времени зажигания.

Уменьшение размера частиц приводит к увеличению времени зажигания торцевой части таблетки. Данная зависимость важна при проектировании и создании систем зажигания, например для достижения определенных временных характеристик зажигания разных участков поверхности таблетки.

Уменьшение размера зазора между цилиндрическими поверхностями таблетки-излучателя и гильзы, а следовательно, и свободного объема в гильзе, ведет к увеличению скорости вылета таблетки-излучателя из гильзы.

Полученные результаты открывают перспективы для дальнейших исследований и разработок в области создания более эффективных систем зажигания. Улучшение временных характеристик зажигания и контроль над процессом зажигания могут привести к повышению надежности и эффективности этих систем.

Список источников

1. Вернидуб И.И., Пузырев Н.Г. Специалисты по взрывчатым веществам, пиротехнике и боеприпасам : биограф. энцикл. М. : АвиаРус-XXI, 2006. 702 с.
2. Шидловский А.А. Основы пиротехники. 4-е изд. М. : Машиностроение, 1973. 292 с.
3. Данилин Ю.Г., Назаров Н.А., Новикова Н.И. Взрывчатые вещества, пиротехника, средства инициирования в послевоенный период: Люди. Наука. Производство. М.–СПб : Гуманитика, 2001. 928 с.
4. Мельников В.Э. Современная пиротехника. М. : Наука, 2014. 480 с.
5. Qiang Li, Peijin Liu, Guoqiang He. Fluid–solid coupled simulation of the ignition transient of solid rocket motor // *Acta Astronautica*. 2015. V. 110. P. 180–190. doi: 10.1016/j.actaastro.2015.01.017
6. Minkov L.L., Shrager E.R., Kiryushkin A.E. Two approaches for simulating the burning surface in gas dynamics // *Key Engineering Materials*. 2016. V. 685. P. 114–118. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.685. 114
7. Нугматулин Р.И. Динамика многофазных сред. М. : Наука, 1987. Ч. I. 464 с.
8. Yingkun Li, Xiong Chen, Jinsheng Xu, Changsheng Zhou, Omer Musa. Three-dimensional multi-physics coupled simulation of ignition transient in a dual pulse solid rocket motor // *Acta Astronautica*. 2018. V. 146. P. 46–65. doi: 10.1016/j.actaastro.2018.01.058
9. Архипов В.А., Бондарчук С.С., Бондарчук И.С., Золоторёв Н.Н., Козлов Е.А., Орлова М.П. Математическое моделирование утилизации головного обтекателя ракеты-носителя после его отработки // *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*. 2023. № 84. С. 52–67. doi: 10.17223/19988621/84/5
10. Goodman T.R Application of integral methods to transient nonlinear heat transfer // *Advances in Heat Transfer* / T. Irvine, J. Hartnett (eds). New-York : Academic Press, 1964. V. 1. P. 51–122.
11. Соркин Р.Е. Теория внутрикамерных процессов в ракетных системах на твердом топливе. Внутренняя баллистика. М. : Наука, 1983. 288 с.
12. Yongtao Wang, Xiao-bing Zhang. Numerical investigation on muzzle flow characteristics for small combustion chamber with embedded propelled body // *Structures*. 2023. V. 50. P. 1783–1793. doi: 10.1016/j.istruc.2023.03.001
13. Yongtao Wang, Shukui Ding, Xiaobing Zhang. A novel structure to inhibit barrel erosion induced by thermal effects in a propulsion system // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2023. V. 147. Art. 106991. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2023.106991
14. Vasquez S.A., Ivanov V.A. A phase coupled method for solving multiphase problems on unstructured meshes // *Proceedings of the ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting (FEDSM2000)*, American Society of Mechanical Engineers. 2000. V. 251. P. 659–664.

References

1. Vernidub I.I., Puzyrev N.G. (2006) *Spetsialisty po vzryvchatym veshchestvam, pirotekhnike i boepripasam. Biograficheskaya entsiklopediya* [Specialists in explosives, pyrotechnics, and ammunition. Biographical encyclopedia]. Moscow: AviaRus-XXI.
2. Shidlovskiy A.A. (1973) *Osnovy pirotekhniki* [Fundamentals of pyrotechnics]. Moscow: Mashinostroenie.
3. Danilin Yu.G., Nazarov N.A., Novikova N.I. (2001) *Vzryvchatye veshchestva, pirotekhnika, sredstva initsirovaniya v poslevoennyy period: Lyudi. Nauka. Proizvodstvo* [Explosives, pyrotechnics, means of initiation in the post-war period: People. Science. Production]. Moscow – Saint Petersburg: Gumanistika.
4. Mel'nikov V.E. (2014) *Sovremennaya pirotekhnika* [Modern pyrotechnics]. Moscow: Nauka.
5. Li Q., Liu P., He G. (2015) Fluid–solid coupled simulation of the ignition transient of solid rocket motor. *Acta Astronautica*. 110. pp. 180–190. doi: 10.1016/j.actaastro.2015.01.017

6. Minkov L.L., Shrager E.R., Kiryushkin A.E. (2016) Two approaches for simulating the burning surface in gas dynamics. *Key Engineering Materials*. 685. pp. 114–118. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.685.114
7. Nigmatulin R.I. (1987) *Dinamika mnogofaznykh sred. Chast I*. [Dynamics of multiphase media. Part I]. Moscow: Nauka.
8. Li Y., Chen X., Xu J., Zhou C., Musa O. (2018) Three-dimensional multi-physics coupled simulation of ignition transient in a dual pulse solid rocket motor. *Acta Astronautica*. 146. pp. 46–65. doi: 10.1016/j.actaastro.2018.01.058
9. Arkhipov V.A., Zolotarev E.A., Orlova M.P., Kozlov N.N., Bondarchuk I.S., Bondarchuk S.S. (2023) Matematicheskoe modelirovanie utilizatsii golovnogo obtekatelya rakety-nositelya posle ego otrabotki [Mathematical modeling of disposal of the payload fairing of a launch vehicle after completion]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 84. pp. 52–67. doi: 10.17223/19988621/84/5
10. Goodman T.R. (1964) Application of integral methods to transient nonlinear heat transfer. *Advances in Heat Transfer*. 1. pp. 51–122. doi: 10.1016/S0065-2717(08)70097-2
11. Sorkin R.E. (1983) *Teoriya vnutrikamernykh protsessov v raketnykh tekhnologiyakh na tverdom toplive. Vnutrennyaya ballistika* [Theory of intra-chamber processes in solid fuel rocket systems. Internal ballistics]. Moscow: Nauka.
12. Wang Y., Zhang X. (2023) Numerical investigation on muzzle flow characteristics for small combustion chamber with embedded propelled body. *Structures*. 50. pp. 1783–1793. doi: 10.1016/j.istruc.2023.03.001
13. Wang Y., Ding S., Zhang X. (2023) A novel structure to inhibit barrel erosion induced by thermal effects in a propulsion system. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 147. Article 106991. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2023.106991
14. Vasquez S.A., Ivanov V.A. (2000) A phase coupled method for solving multiphase problems on unstructured meshes. *Proceedings of the ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting (FEDSM2000)*, American Society of Mechanical Engineers. 251. pp. 659–664.

Сведения об авторах:

Гимаева Наталья Радиковна – аспирант физико-технического факультета Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: natalia.gimaeva@inbox.ru

Миньков Леонид Леонидович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры математической физики физико-технического факультета Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: lminkov@ftf.tsu.ru

Information about the authors:

Gimaeva Nataliya R. (Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: natalia.gimaeva@inbox.ru

Min'kov Leonid L. (Doctor of Physics and Mathematics, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: lminkov@ftf.tsu.ru

Статья поступила в редакцию 08.12.2023; принята к публикации 03.06.2024

The article was submitted 08.12.2023; accepted for publication 03.06.2024