

Научная статья

УДК 533.17

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=181877>

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНУТРИБАЛЛИСТИЧЕСКИХ И ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ В ДВУХКАНАЛЬНОМ РАКЕТНОМ ДВИГАТЕЛЕ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

Егор Ильич Савин<sup>1✉</sup>, Леонид Леонидович Миньков<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Томский государственный университет, Томск, Россия

<sup>1</sup>ПАО «Кировский завод «Маяк», Киров, Россия

<sup>1</sup>[egorgg0@gmail.com](mailto:egorgg0@gmail.com) ✉

<sup>2</sup>[lminkov@ftf.tsu.ru](mailto:lminkov@ftf.tsu.ru)

*Аннотация.* Рассматривается задача моделирования течения рабочего тела при воспламенении и выходе на режим двухканального РДТТ, снаряженного вкладным зарядом твердого топлива всестороннего горения, с расположенным в переднем объеме камеры сгорания воспламенительным устройством. Движение потоков газа происходит по двум каналам: центральному каналу заряда и периферийному каналу (зазор между обечайкой (корпусом) камеры сгорания и зарядом). Параметры в переднем объеме камеры сгорания описываются внутрибаллистическими нульмерными уравнениями, в каналах заряда – газодинамическими одномерными нестационарными уравнениями. Сопловое пространство рассчитывается в «квазиодномерной» постановке с осреднением параметров потока в поперечных

сечениях. Приведены кривые распределения параметров в каналах в различные моменты времени при воспламенении заряда. Результаты одномерной постановки на установившемся режиме течения сравниваются с результатами двумерной постановки.

**Ключевые слова:** воспламенение, вкладной заряд, РДТТ, газодинамика, нестационарность

**Для цитирования:** Савин Е.И., Миньков Л.Л. Моделирование внутрибаллистических и газодинамических нестационарных процессов в двухканальном ракетном двигателе твердого топлива // Труды МАИ. 2024. № 137.

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=181877>

Original article

## **INTRA-BALLISTIC AND GAS-DYNAMIC NON-STATIONARY PROCESSES MODELING IN A TWO-CHANNEL SOLID ROCKET MOTOR**

**Egor I.Savin<sup>1</sup>**, **Leonid L. Minkov<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup>Tomsk State University, Tomsk, Russia

<sup>1</sup>PJSC «Kirovskiy zavod «MAYAK», Kirov, Russia

<sup>1</sup>[egorgg0@gmail.com](mailto:egorgg0@gmail.com)

<sup>2</sup>[lminkov@ftf.tsu.ru](mailto:lminkov@ftf.tsu.ru)

**Abstract.** The article considers the problem of gas flow modeling while igniting and operation mode reaching of a two-channel solid rocket engine equipped with a set-in solid fuel propellant charge of the all-ways combustion, with the igniter set in the front volume

of the combustion chamber. Parameters in the charge channels are being described by the gas-dynamic one-dimensional non-stationary equations. The nozzle space (confuser) is being computed in “quazi-one-dimensional” setting with flow parameters averaging in the cross-sections. The gas flows movement is under way through the two channels, namely the central channel of charge and peripheral channel (the gap between the combustion chamber shell and the charge). Computation starts at the instant of the igniting composition compustion commence. The igniter delay is not accounted for. Gas in the combustion chamber is assumed to be quiescent. The propellant charge element ignition is in progress instantly at the surface reaching the ignition temperature.

The combustion products mixture is being assumed as a multicomponent single-phase perfect gas. There is a plug (diaphragm) in the critical throat section that instantly collapses when a certain pressure is reached on it. Computation of non-stationary one-dimensional equations describing parameters and flows movement in the combustion chamber was performed in MATLAB. Computational areas limited by the charge and the beginning of the confuser, as well as the critical throat section, are being divided into  $N + 1$  cells, which edges are numbered from 2 to  $N + 1$ . A difference scheme of the first order of accuracy was used when solving the equations. Parameters were computed at the centers of cells by the computed fluxes on the cell faces (the Van Leer method was used). Parameters distribution along the length of the charge channels at different moments of ignition is demonstrated. The results were being verified with the results of computations in a two-dimensional Ansys fluent setting to evaluate the calculations in a one-dimensional setting.

**Keywords:** ignition, propellant charge, solid rocket motor, gas dynamics, non-stationarity

**For citation:** Savin E.I., Minkov L.L. Intra-ballistic and gas-dynamic non-stationary processes modeling in a two-channel solid rocket motor. *Trudy MAI*, 2024, no. 137. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=181877>

## Введение

Исследования нестационарных процессов в настоящее время являются одним из важнейших направлений работ в газодинамических устройствах [1] и в ракетных двигателях твердого топлива (РДТТ) [2-7], в частности. Широко применяемым в различных летательных аппаратах в настоящее время остается РДТТ, снаряженный вкладным зарядом твердого ракетного топлива (ТРТ) всестороннего горения цилиндрической формы, с воспламенительным устройством (ВУ), расположенным в переднем (головном) объеме камеры сгорания (КС). В ходе работы воспламенителя и воспламенении заряда возникает процесс нестационарного движения рабочего тела в КС, сопровождающийся нагревом поверхности заряда ТРТ, изменением параметров потока газа, повышенным давлением в КС и выбиванием сопловой заглушки. Движение потоков газа происходит по двум каналам: центральному каналу заряда и периферийному каналу (зазор между обечайкой (корпусом) КС и зарядом).

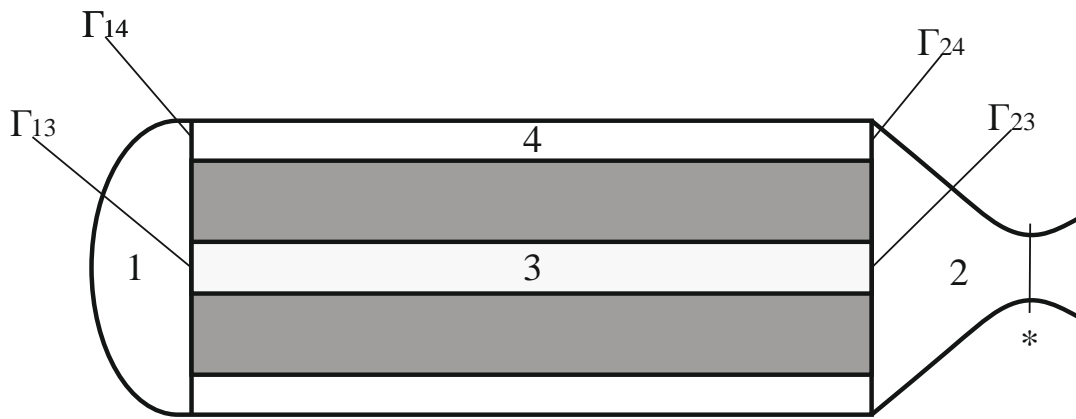
Один из эффективных подходов моделирования течения для такого типа РДТТ основан на использовании нестационарных уравнений, описывающих в нульмерной постановке изменение осредненных параметров в головном и предсопловом пространстве, связанных (сшитых) с одномерными газодинамическими уравнениями, описывающими параметры потоков в канале заряда (или зарядов) и в

зазоре между обечайкой КС и заряда [8-12]. В настоящее время данный метод реализуется численным интегрированием уравнений в частных производных [13]. Однако данный метод, включающий расчет предсоплового пространства в «нульмерной» постановке с осреднением параметров рабочего вещества по объему не всегда применим, так как течение в сужающейся части сопла происходит с ярко выраженным изменением параметров потока, особенно при малых длинах конфузора сопла, где проявляется струйное течение потока. В этом случае целесообразнее проводить расчет предсопловой области в «квазиодномерной» постановке, когда параметры потока осредняются в поперечных сечениях канала либо вести расчет в двумерной постановке с использованием пакетов прикладных CFD программ.

Возникает вопрос об исследовании воспламенения и выхода на режим РДТТ, снаряженного зарядом всестороннего горения, и описании процесса, включающего численное интегрирование совокупности внутрибаллистических нульмерных и газодинамических одномерных, квазиодномерных нестационарных уравнений, а также анализа «одномерной» и «двумерной» постановки расчета.

### **Постановка задачи**

КС разбивается на нульмерные и одномерные области решения (рис. 1), которые сшиваются по границам  $\Gamma_{14}$ ,  $\Gamma_{13}$ ;  $\Gamma_{24}$ ,  $\Gamma_{23}$ .



**Рис. 1.** Схема КС:

1 – головной объем КС; 2 – предсопловой объем; 3 – центральный канал заряда; 4 – зазор между корпусом КС и зарядом (периферийный канал);  $\Gamma_{14}$ ,  $\Gamma_{13}$  – граница между головным объемом и зазором, и каналом соответственно;  $\Gamma_{24}$ ,  $\Gamma_{23}$  – граница между предсопловым объемом (конфузором сопла) и зазором, и каналом соответственно

Принимается, что ВУ в разрушающемся корпусе находится в объеме 1, материалом воспламенителя принимается дымный порох с геометрической формой зерен близкой к сферической, горение происходит параллельными слоями к нормали поверхности. Расчет начинается в момент начала горения воспламенительного состава, задержка воспламенения ВУ не учитывается, а газ в КС считается покоящимся. Воспламенение элемента заряда топлива происходит мгновенно при достижении поверхности температуры воспламенения. Смесь продуктов сгорания принимается многокомпонентным однофазным совершенным газом. В критическом сечении стоит заглушка, мгновенно разрушающаяся при достижении на ней определенного давления.

Уравнения в нульмерной постановке для головного объема:

$$\begin{aligned}
V_1 \frac{d\rho_1}{dt} &= G_B \delta e_B + G_{\text{п.торц}} \delta T_w - G_{13} - G_{14}, \\
V_1 c_{v1} \frac{d\rho_1 T_1}{dt} &= H_B G_B \delta e_B + H_T G_{\text{п.торц}} \delta T_w - H_{13} G_{13} - H_{14} G_{14}, \\
V_1 \frac{d\rho_1 n_{T1}}{dt} &= G_{\text{п.торц}} \delta T_w - G_{T13} - G_{T14}, \\
V_1 \frac{d\rho_1 n_{B1}}{dt} &= G_B \delta e_B - G_{B13} - G_{B14}, \\
\frac{de_B}{dt} &= u_{1B} \delta e_B, \\
\delta e_B &= \begin{cases} 1, & \text{если } e_B \leq e_{0B} \\ 0, & \text{если } e_B > e_{0B} \end{cases}, \\
\delta T_w &= \begin{cases} 0, & \text{если } T_w < T_{\text{зжг}} \\ 1, & \text{если } T_w \geq T_{\text{зжг}} \end{cases}, \\
u_{1B} &= u_{0B} (p_1 / p_{\text{ат}})^{\nu_B}, \\
u_{1T} &= u_{0T} (p_1 / p_{\text{ат}})^{\nu_T}, \\
G_B &= u_{1B} \rho_B S_B, \\
e_{0B} &= r_B, \\
G_{\text{п.торц}} &= u_{1T} \rho_T S_{\text{п.торц}}, \\
H_B &= c_{p,B} T_{Г.В}, \quad H_T = c_{p,T} T_{Г.Т}.
\end{aligned}
\tag{1}$$

Уравнение состояния:

$$p_{1,2,3,4} = \rho_{1,2,3,4} R_{1,2,3,4} T_{1,2,3,4}. \tag{2}$$

Термодинамические уравнения для смеси газа:

$$c_{p1,2,3,4} = c_{p,B} n_{B1,2,3,4} + c_{p,T} n_{T1,2,3,4} + c_{p,a} (1 - n_{B1,2,3,4} - n_{T1,2,3,4}), \tag{3}$$

$$c_{v1,2,3,4} = c_{v.B}n_{B1,2,3,4} + c_{v.T}n_{T1,2,3,4} + c_{v.a}(1 - n_{B1,2,3,4} - n_{T1,2,3,4}),$$

$$R_{1,2,3,4} = R_B n_{B1,2,3,4} + R_T n_{T1,2,3,4} + R_a(1 - n_{B1,2,3,4} - n_{T1,2,3,4}),$$

$$k_{1,2,3,4} = \frac{c_{p1,2,3,4}}{c_{v1,2,3,4}},$$

$V$  – объем;  $H_T$ ,  $H_B$  – энтальпия топлива, воспламенителя соответственно;  $R$  – газовая постоянная;  $S_{\text{п.торц}}$  – площадь переднего торца заряда:  $S_{\text{п.торц}} = \pi(R_{\text{вш}}^2 - R_{\text{вн}}^2)$ ;  $R_{\text{вш}}$  – внешний радиус заряда;  $R_{\text{вн}}$  – радиус центрального канала заряда;  $p_{\text{ат}}$  – атмосфера стандартная;  $G_B$  – приход продуктов сгорания воспламенителя;  $G_{\text{п.торц}}$  – приход продуктов сгорания от переднего торца заряда;  $G_{13}$ ,  $G_{14}$  – расходы продуктов сгорания на границе из переднего объема в центральный канал и в зазор;  $T_{\text{зжг}}$  – температура воспламенения топлива;  $T_w$  – температура поверхности топлива;  $T_{Г.Т}$ ,  $T_{Г.В}$  – температура горения топлива и воспламенителя соответственно;  $c_{p.B}$ ,  $c_{p.T}$ ,  $c_p$  – удельные теплоемкости продуктов сгорания при постоянном давлении воспламенителя, топлива, смеси соответственно;  $c_{v.B}$ ,  $c_{v.T}$ ,  $c_v$  – удельные теплоемкости продуктов сгорания при постоянном объеме воспламенителя, топлива и смеси соответственно;  $e_{0B}$  – начальная толщина воспламенителя (осредненный радиус  $r_B$  зерна);  $e_B$  – толщина сгоревшего свода зерна воспламенителя;  $d_B$  – диаметр зерна воспламенителя (для крупнозернистого пороха размер зерна 0.005...0.010 м);  $k$  – показатель адиабаты;  $\rho_B$  – плотность воспламенителя;  $u_{0B}$  – скорость горения воспламенителя при 1 ат. (м/с);  $m_B$  – масса



воспламенителя;  $S_B$  – текущая площадь горения воспламенителя:

$$S_B = N_3 S_0 \left[ \mu_1 + \mu_2 \frac{e_B}{e_{0B}} + \mu_3 \left( \frac{e_B}{e_{0B}} \right)^2 \right]; \quad N_3 \text{ – количество зерен воспламенителя:}$$

$$N_3 = \frac{6}{\pi} \frac{m_B}{\rho_B d_B^3}; \quad S_0 \text{ – начальная площадь зерна воспламенителя: } S_0 = \pi r_B^2;$$

коэффициенты  $\mu_1, \mu_2, \mu_3$  для сферической формы зерен воспламенителя принимают значения:  $\mu_1 = 1; \mu_2 = -2; \mu_3 = 1$ ; [14]  $n_B$  – массовая доля газов от воспламенителя в смеси;  $n_T$  – массовая доля газов от топлива в смеси.

Система газодинамических одномерных нестационарных уравнений, описывающих течение сжимаемого невязкого газа для центрального канала 3 и зазора 4 [15]:

$$\frac{(\partial \mathbf{U} F)_{3,4}}{\partial t} + \frac{(\partial \mathbf{D}(\mathbf{U}) F)_{3,4}}{\partial x_{3,4}} = \mathbf{H}_{3,4}, \text{ где} \quad (4)$$

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho n_T \\ \rho n_B \\ \rho u \\ \rho E \end{pmatrix}, \quad \mathbf{D}(\mathbf{U}) = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho n_T u \\ \rho n_B u \\ \rho u^2 + p \\ \rho u H \end{pmatrix}, \quad \mathbf{H}_{3,4} = \begin{pmatrix} \rho_T u_{0T} (p_{3,4}/p_{ат})^{v_T} \frac{\Pi_{3,4}}{F_{3,4}} \delta T_w \\ \rho_T u_{0T} (p_{3,4}/p_{ат})^{v_T} \frac{\Pi_{3,4}}{F_{3,4}} \delta T_w \\ 0 \\ 0 \\ \rho_T u_{0T} (p_{3,4}/p_{ат})^{v_T} H_T \frac{\Pi_{3,4}}{F_{3,4}} \delta T_w \end{pmatrix},$$

$$E = \frac{1}{k-1} \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2},$$

$$H = E + \frac{p}{\rho},$$

здесь  $\Pi$  – периметр горячей поверхности;  $u$ ,  $\rho$ ,  $p$ ,  $E$ ,  $H$  – скорость, плотность, давление, полная энергия, полная энтальпия газового потока;  $x$  – продольная координата;  $F$  – площадь поперечного сечения каналов; для зазора:

$$\frac{\Pi_4}{F_4} = \frac{2R_{\text{вн}}}{R_{\text{корп}}^2 - R_{\text{вн}}^2}; \text{ для центрального канала заряда: } \frac{\Pi_3}{F_3} = \frac{2}{R_{\text{вн}}}; R_{\text{корп}} - \text{ радиус}$$

корпуса КС.

Система квазиодномерных нестационарных газодинамических уравнений для конфузора сопла 2:

$$\frac{(\partial \mathbf{U} F)_2}{\partial t} + \frac{(\partial \mathbf{D}(\mathbf{U}) F)_2}{\partial x_2} = \mathbf{H}_2, \text{ где} \quad (5)$$

$$\mathbf{H}_2 = \begin{pmatrix} \rho_{\text{T}} u_{0\text{T}} (p_2/p_{\text{ат}})^{\text{VT}} \frac{\Pi_{\text{з.торц}}}{S_{\text{з.торц}}} \delta T_w \delta G_{\text{з.торц}} \\ \rho_{\text{T}} u_{0\text{T}} (p_2/p_{\text{ат}})^{\text{VT}} \frac{\Pi_{\text{з.торц}}}{S_{\text{з.торц}}} \delta T_w \delta G_{\text{з.торц}} \\ 0 \\ p_2 \frac{\partial F_2}{\partial x} \\ \rho_{\text{T}} u_{0\text{T}} (p_2/p_{\text{ат}})^{\text{VT}} \Pi_{\text{з.торц}} H_{\text{T}} \delta T_w \delta G_{\text{з.торц}} \end{pmatrix};$$

$$\delta G_{\text{з.торц}} = \begin{cases} 1, \text{ если } x_2 = x_{2\text{T}} \\ 0, \text{ если } x_2 > x_{2\text{T}} \end{cases},$$

здесь  $F_2$  – площадь поперечного сечения конфузора сопла;  $S_{\text{з.торц}}$  – площадь заднего торца;  $x_{2\text{T}}$  – продольная координата заднего торца заряда (соответствует границе между конфузуром сопла и зарядом).

Профиль конфузора сопла представляется усеченным конусом с уравнением образующей:

$$R_{\text{сопл}}(x_2) = R_{\text{корп}} + \frac{R_{\text{кр}} - R_{\text{корп}}}{L_{\text{сопл}}} x_2, \text{ где} \quad (6)$$

$R_{\text{кр}}$  – радиус критического сечения;  $L_{\text{сопл}}$  – длина конфузора сопла.

Уравнение для температуры поверхности заряда топлива [16, 17, 18]:

$$\frac{dT_w}{dt} = \frac{4a}{3\lambda_T^2} \frac{\alpha^2 (T - T_w)^3}{(T_w - T_0)(2T - T_w - T_0)}, \text{ где} \quad (7)$$

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_l,$$

$$\alpha_k = 0.023 \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{0.4} \frac{\mu(C_p - R)}{LT},$$

$$\text{Re} = \left(\frac{|u|LT}{\mu}\right)\rho, \quad \text{Pr} = \frac{\mu c_p}{\lambda_T},$$

$$\alpha_l = \varepsilon c_0 (T + T_w) (T^2 + T_w^2),$$

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $\alpha_k$  – коэффициент конвективной теплоотдачи;  $\alpha_l$  – коэффициент лучистой теплоотдачи;  $\varepsilon$  – отношение энергии, излучаемой серым телом, к энергии, излучаемой абсолютно черным телом одинаковой геометрии и равной температуры;  $c_0$  – постоянная Стефана-Больцмана ( $5.67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>К<sup>4</sup>));  $LT$  – характерный размер; для зазора:  $LT_4 = 2(R_{\text{корп}} - R_{\text{вн}})$ , для канала:  $LT_3 = 2R_{\text{вн}}$ ;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости;  $\lambda_T$  – коэффициент теплопроводности топлива;  $a$  – коэффициент температуропроводности топлива.

Начальные условия:

$$p = p_0; \rho = \rho_0; u = 0; T = T_0 = \frac{p_0}{\rho_0 R}; T_w = T_0 + 0.1; e = 0; t = 0;$$

$$n_{T1,2,3,4} = 0; n_{B1,2,3,4} = 0.$$

Граничные условия:

$$\text{На границе } \Gamma_{14}, \Gamma_{13}: G_{14} = (\mathbf{D}(\mathbf{U})^{\langle 1 \rangle} F)_4; G_{T14} = (\mathbf{D}(\mathbf{U})^{\langle 2 \rangle} F)_4; G_{B14} = (\mathbf{D}(\mathbf{U})^{\langle 3 \rangle} F)_4;$$

$$G_{13} = (\mathbf{D}(\mathbf{U})^{\langle 1 \rangle} F)_3; G_{T13} = (\mathbf{D}(\mathbf{U})^{\langle 2 \rangle} F)_3; G_{B13} = (\mathbf{D}(\mathbf{U})^{\langle 3 \rangle} F)_3.$$

На границе между конфузуром сопла и зазором, и центральным каналом соответственно:

$$(\mathbf{D}(\mathbf{U})^{\langle 1 \rangle} F)_3 + (\mathbf{D}(\mathbf{U})^{\langle 1 \rangle} F)_4 = (\mathbf{D}(\mathbf{U})^{\langle 1 \rangle} F)_2;$$

$$(\mathbf{D}(\mathbf{U})^{\langle 2 \rangle} F)_3 + (\mathbf{D}(\mathbf{U})^{\langle 2 \rangle} F)_4 = (\mathbf{D}(\mathbf{U})^{\langle 2 \rangle} F)_2;$$

$$(\mathbf{D}(\mathbf{U})^{\langle 3 \rangle} F)_3 + (\mathbf{D}(\mathbf{U})^{\langle 3 \rangle} F)_4 = (\mathbf{D}(\mathbf{U})^{\langle 3 \rangle} F)_2;$$

$$(\mathbf{D}(\mathbf{U})^{\langle 4 \rangle} F)_3 + (\mathbf{D}(\mathbf{U})^{\langle 4 \rangle} F)_4 + pS_{з.торц} = (\mathbf{D}(\mathbf{U})^{\langle 4 \rangle} F)_2;$$

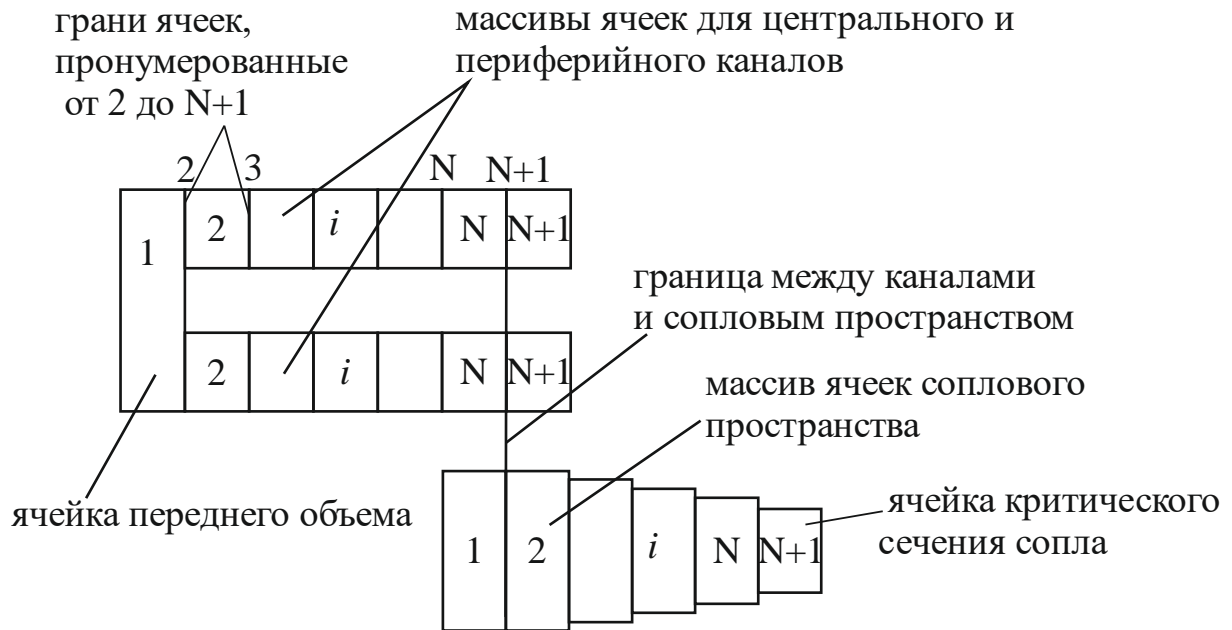
$$(\mathbf{D}(\mathbf{U})^{\langle 5 \rangle} F)_3 + (\mathbf{D}(\mathbf{U})^{\langle 5 \rangle} F)_4 = (\mathbf{D}(\mathbf{U})^{\langle 5 \rangle} F)_2.$$

До срыва заглушки критическое сечение рассматривалось как непроницаемая твердая стенка, после срыва происходит истечение в атмосферу.

### Методика решения

Расчет нестационарных одномерных и нульмерных уравнений, описывающих параметры и движение потоков в КС, проводился в среде Matlab. Расчетные

области, ограниченные зарядом и началом конфузора, а также критическим сечением сопла разбиваются на  $N+1$  ячеек, грани которых пронумерованы от 2 до  $N+1$  (рис. 2).



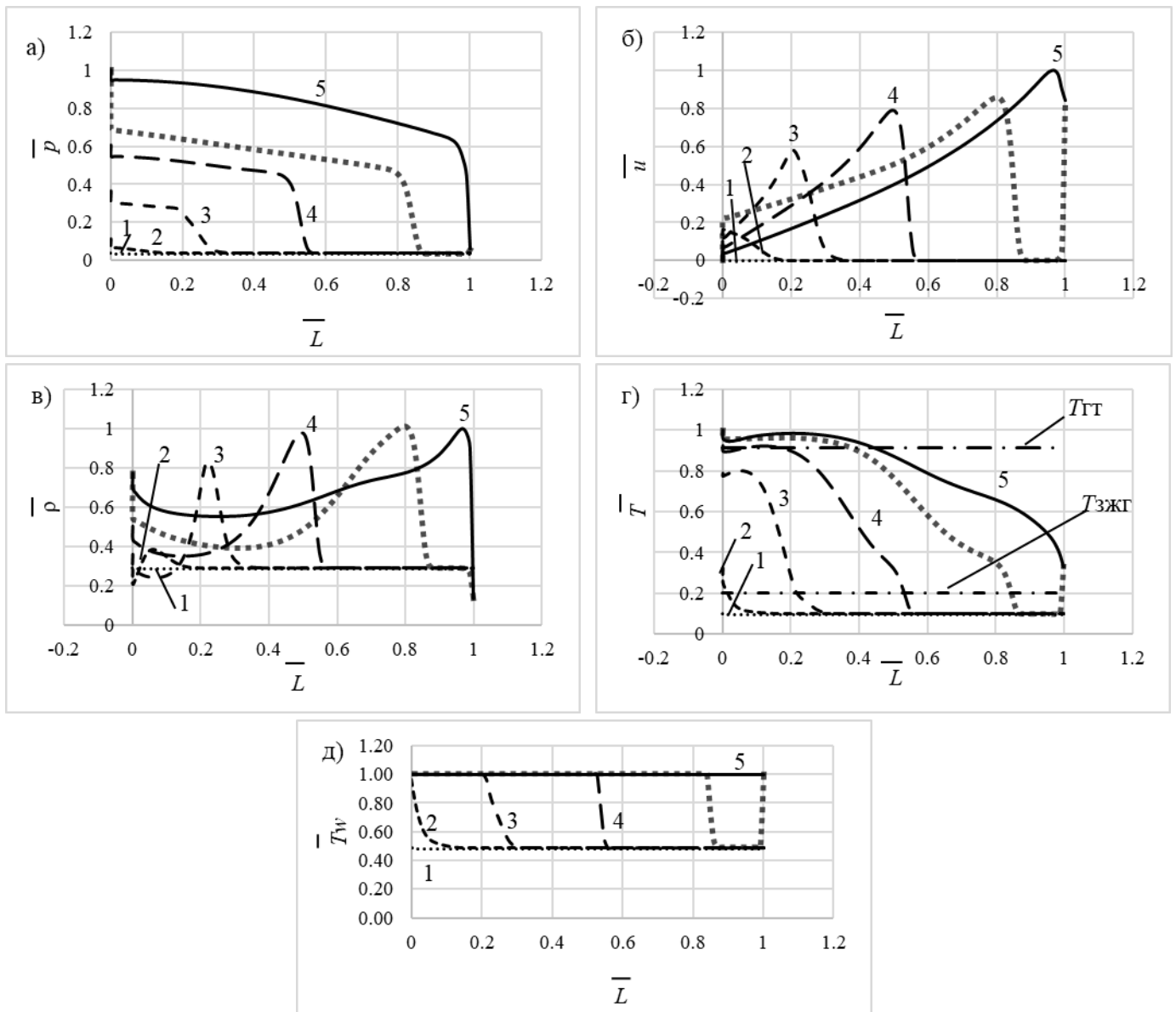
**Рис. 2.** Расчетная схема

При решении уравнений (1-7) использовалась разностная схема первого порядка точности, вычислялись параметры в центрах ячеек по вычисленным потокам на гранях ячеек (использовался метод Ван-Лиры [19]). Расчет в двумерной постановке проводился в Ansys fluent для модели идеального невязкого газа первого порядка точности, метод решения неявный с решением распада разрыва по Roe-FDS (Roe flux-difference splitting).

### Результаты расчетов

На рисунке 3 приведено распределение параметров по длине заряда  $\bar{L} = (x_4)/L_{зр}$  в периферийном канале (зазоре) в процессе воспламенения топлива от

начала работы воспламенителя до воспламенения всей длины заряда  $L_{зр}$ ,  
 полученное в ходе расчета в одномерной постановке.



**Рис. 3.** Распределение параметров в зазоре по длине заряда:

- а) распределение относительного давления  $\bar{p} = p_4(x_4) / p_{4\max}$ ; б) распределение относительной скорости  $\bar{u} = u_4(x_4) / u_{4\max}$ ; в) распределение относительной плотности  $\bar{\rho} = \rho_4(x_4) / \rho_{4\max}$ ; г) распределение относительной температуры  $\bar{T} = T_4(x_4) / T_{4\max}$ ; д) распределение относительной температуры поверхности

$\bar{T}_w = T_{w4}(x_4)/T_{зжг}$ ; 1 – начальный момент времени  $t$ ; 2 – момент времени

$\bar{t} = t/t_{4\text{восп}} = 0.26$ ; 3 – момент времени  $\bar{t} = t/t_{4\text{восп}} = 0.53$ ; 4 – момент времени

$\bar{t} = t/t_{4\text{восп}} = 0.74$ ; 5 – момент времени воспламенения всей длины заряда

$$\bar{t} = t/t_{4\text{восп}} = 1;$$

..... – распределение параметров в центральном канале в момент времени

$$\bar{t} = t/t_{4\text{восп}} = 1$$

Характер распределений параметров потока на рисунке 3 аналогичен кривым распределения параметров потока в канале заряда в различные моменты времени после начала автономной работы воспламенителя, приведенным в [20]. В момент времени воспламенения зазора поверхность заряда в центральном канале воспламенилась не до конца, так как волны сжатия продуктов сгорания воспламенителя и уже воспламенившегося топлива, перемещающиеся к конфузору сопла, не успели прогреть всю поверхность центрального канала. В момент времени  $\bar{t} = t/t_{4\text{восп}} = 1.07$  поверхность центрального канала полностью воспламенилась, но течение продолжает быть неустановившимся, а процесс нестационарным, так как воспламенитель продолжает гореть совместно с зарядом, что приводит к дальнейшему повышению температуры и давления в КС. При  $\bar{L} = 1$  потоки в зазоре и центральном канале достигают границы заряда и конфузора сопла ( $\Gamma_{24}$ ,  $\Gamma_{23}$ ), где параметры потока изменяются скачком и далее поток переходит в расчетную область конфузора сопла. Расчетные данные получены для вкладного заряда с

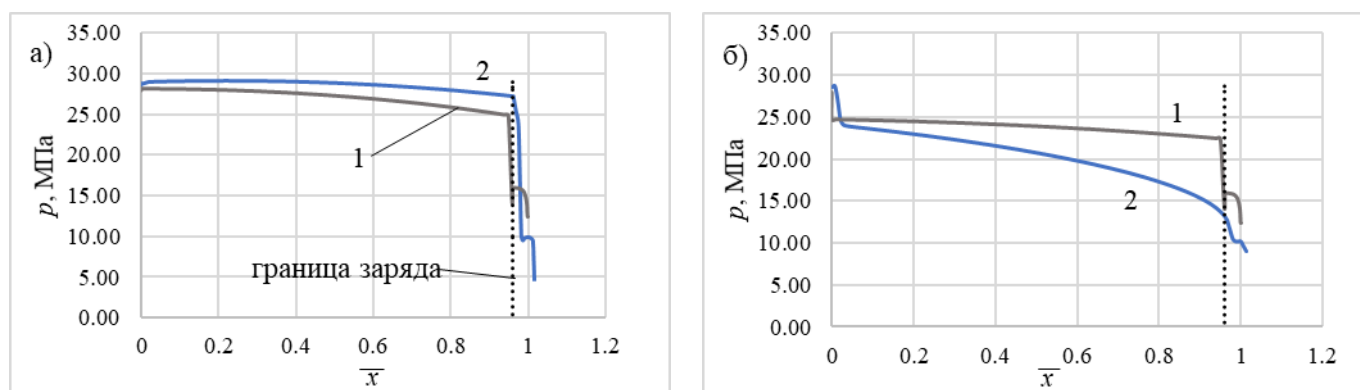
отношением длины к диаметру заряда  $L_{зр}/d_{зр} = 5.7$ , отношением площадей поперечного сечения зазора и центрального канала  $F_4/F_3 = 3.74$ .

Для оценки расчета в одномерной постановке сравним результаты с результатами расчета в двумерной постановке в Ansys fluent (расчетная сетка см. рисунок 4).



**Рис. 4.** Расчетная сетка

На рисунке 5 представлены кривые давления при установившемся режиме в КС в зазоре и центральном канале заряда.



**Рис. 5.** Распределение давления в камере сгорания:

а) в зазоре; б) в центральном канале; 1 – одномерная постановка; 2 – двумерная постановка

Из рисунка видно, что давление в зазоре больше, чем в канале. Кривая распределения давления в зазоре по длине заряда, получившаяся в результате



расчета в одномерной постановке, имеет отклонение от результатов расчета в двумерной постановке не более 9.2 %, в тоже время распределение давления в центральном канале значительно отличается от полученного в ходе двумерного расчета. Поток из центрального канала движется струей в укороченный конфузор сопла, попадая в критическое сечение, у заднего торца заряда возникает застойная зона. При установившемся режиме поверхность раздела потоков оказалась у головного объема в зазоре.

### **Заключение**

С помощью одномерной постановки расчета возможно определение внутрибаллистических и газодинамических параметров газа при воспламенении и выходе на режим двухканального РДТТ с вкладным зарядом всестороннего горения, а также исследование волнового движения газа в каналах.

Различие параметров на установившемся режиме работы РДТТ, в частности, в центральном канале вызвано тем, что в укороченном конфузоре сопла имеет место струйный характер течения, поэтому осреднение по всей площади поперечного сечения проводить не вполне корректно. В этом случае необходимо модифицировать расчетную область конфузора сопла или вести расчет в двумерной постановке.

### **Список источников**

1. Пятунин К.Р., Лугинина Н.С., Диденко Р.А. Тестирование и адаптация новых подходов к моделированию течения в нестационарной постановке для задач

- аэродинамики // Труды МАИ. 2013. № 65. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=35942>
2. Ерохин Б.Т., Липанов А.М. Нестационарные и квазистационарные режимы работы РДТТ. - М.: Машиностроение, 1977. - 200 с.
  3. Амарантов Г.Н., Егоров М.Ю., Егоров С.М., Егоров Д.М., Некрасов В.И. Численное моделирование внутрикамерных процессов при выходе на режим работы ракетного двигателя твёрдого топлива // Вычислительная механика сплошных сред. 2010. Т. 3. № 3. С. 5-17.
  4. Егоров М.Ю., Егоров С.М., Егоров Д.М. Численное исследование переходных внутрикамерных процессов при выходе на режим работы РДТТ // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2010. № 3. С. 41-45.
  5. Краев В.М., Янышев Д.С. Проблемы расчёта переходных процессов в при турбулентном течении в каналах энергетических установок ЛА // Труды МАИ. 2010. № 37. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=13415>
  6. Бондарчук С.С., Борисов Б.В., Жуков А.С. Уравнения расчета параметров выхода РДТТ на стационарный режим для многокомпонентной смеси продуктов сгорания // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. Т. 55. № 9/3. С. 24-26.
  7. Беляков А.Ю. Моделирование поверхности горения твердого топлива с учетом теплопроводящих элементов // Труды МАИ. 2020. № 110. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=112931>. DOI: [10.34759/trd-2020-110-19](https://doi.org/10.34759/trd-2020-110-19)
  8. Райзберг Б.А., Ерохин Б.Т., Самсонов К.П. Основы теории рабочих процессов в ракетных системах на твердом топливе. - М.: Машиностроение, 1972. - 383 с.

9. Бондарчук С.С., Борисов Б.В., Сабырбаев А.Д. Эффективный метод расчета газодинамически напряженных течений РДТТ с вкладными зарядами // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: доклады конференции. - Томск: Изд-во Томского университета, 2000. С. 31-32.
10. Алиев А.В. Внутренняя баллистика РДТТ. - М.: Машиностроение, 2007. - 504 с.
11. Жуков А.С., Борисов Б.В., Бондарчук С.С. Оценка эффективности газодинамической защиты корпуса РДТТ с вкладным комбинированным зарядом // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2011. № 3 (15). С. 83-86.
12. Борисов Б.В., Бондарчук А.С., Жуков С.С., Куриленко Н.И., Мамонтов Г.Я. Применение струи низкотемпературных продуктов сгорания для тепловой защиты корпуса РДТТ с вкладным зарядом // XXIII семинар по струйным, отрывным и нестационарным течениям (с международным участием) (Томск, 26–28 июня 2012): сборник трудов. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2012. С. 41-46.
13. Борисов Б.В. Моделирование течения рабочего тела по многосвязным областям энергетических устройств // Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий» (Томск, 24–26 июня 2010): сборник трудов. - Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2010. С. 90-94.
14. Липанов А.М., Алиев А.В. Проектирование ракетных двигателей твердого топлива. - М.: Машиностроение, 1995. - 400 с.

15. Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я., Крайко Г.П., Прокопов Г.П. Численное решение многомерных задач газовой динамики. - М.: Наука, 1976. - 400 с.
16. 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](https://doi.org/10.17223/19988621/84/5)
17. Беляев Н.М., Рядно А.А.,. Методы нестационарной теплопроводности: учебное пособие для вузов. - М.: Высшая школа, 1978. - 328 с.
18. Goodman T.R., Irvine T., Hartnett J. Integral Methods for nonlinear heat transfer. Advances in Heat Transfer. New-York: Academic Press, 1964, vol. 1, pp. 51-122.
19. Van Leer B. Flux-Vector Splitting for the Euler Equation // Proceedings of the ICNMF Conference, Lecture Notes in Physics, 1982, vol. 170, pp. 507-512.
20. Шишков А.А., Панин С.Д., Румянцев Б.В. Рабочие процессы в ракетных двигателях твердого топлива: Справочник. - М.: Машиностроение, 1988. - 240 с.

## References

1. Pyatunin K.R., Luginina N.S., Didenko R.A. *Trudy MAI*, 2013, no. 65. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=35942>

2. Erokhin B.T., Lipanov A.M. *Nestatsionarnye i kvazistatsionarnye rezhimy raboty RDTT* (Non-stationary and quasi-stationary operating modes of solid rocket motors), Moscow, Mashinostroenie, 1977, 200 p.
3. Amarantov G.N., Egorov M.Yu., Egorov S.M., Egorov D.M., Nekrasov V.I. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred*, 2010, vol. 3, no. 3, pp. 5-17.
4. Egorov M.Yu., Egorov S.M., Egorov D.M. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Aviatsionnaya tekhnika*, 2010, no. 3, pp. 41-45.
5. Kraev V.M., Yanyshchev D.S. *Trudy MAI*, 2010, no. 37. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=13415>
6. Bondarchuk S.S., Borisov B.V., Zhukov A.S. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika*, 2012, vol. 55, no. 9/3, pp. 24-26.
7. Belyakov A.Yu. *Trudy MAI*, 2020, no. 110. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=112931>. DOI: [10.34759/trd-2020-110-19](https://doi.org/10.34759/trd-2020-110-19)
8. Raizberg B.A., Erokhin B.T., Samsonov K.P. *Osnovy teorii rabochikh protsessov v raketnykh sistemakh na tverdom toplive* (Fundamentals of the theory of work processes in solid fuel rocket systems), Moscow, Mashinostroenie, 1972, 383 p.
9. Bondarchuk S.S., Borisov B.V., Sabyrbaev A.D. *Fundamental'nye i prikladnye problemy sovremennoi mekhaniki: doklady konferentsii*, Tomsk, Izd-vo Tomskogo universiteta, 2000, pp. 31-32.
10. Aliev A.V. *Vnutrennyaya ballistika RDTT* (Internal ballistics of solid rocket motors), Moscow, Mashinostroenie, 2007, 504 p.
11. Zhukov A.S., Borisov B.V., Bondarchuk S.S. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika*, 2011, no. 3 (15), pp. 83-86.

12. Borisov B.V., Bondarchuk A.S., Zhukov S.S., Kurilenko N.I., Mamontov G.Ya. *XXIII seminar po struinym, otrivnym i nestatsionarnym techeniyam (s mezhdunarodnym uchastiem)*: sbornik trudov. Tomsk, Natsional'nyi issledovatel'skii Tomskii politekhnicheskii universitet, 2012, pp. 41-46.
13. Borisov B.V. *Vserossiiskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem «Teplofizicheskie osnovy energeticheskikh tekhnologii»*: sbornik trudov. Tomsk, Natsional'nyi issledovatel'skii Tomskii politekhnicheskii universitet, 2010, pp. 90-94.
14. Lipanov A.M., Aliev A.V. *Proektirovanie raketnykh dvigatelei tverdogo topliva* (Design of solid rocket motors), Moscow, Mashinostroenie, 1995, 400 p.
15. Godunov S.K., Zabrodin A.V., Ivanov M.Ya., Kraiko G.P., Prokopov G.P. *Chislennoe reshenie mnogomernykh zadach gazovoi dinamiki* (Numerical solution of multidimensional problems of gas dynamics), Moscow, Nauka, 1976, 400 p.
16. Arkhipov V.A., Bondarchuk S.S., Bondarchuk I.S., Zolotorev N.N., Kozlov E.A., Orlova M.P. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika*, 2023, no. 84, pp. 52-67. DOI: [10.17223/19988621/84/5](https://doi.org/10.17223/19988621/84/5)
17. Belyaev N.M., Ryadno A.A. *Metody nestatsionarnoi teploprovodnosti: uchebnoe posobie dlya vuzov* (Methods of non-stationary thermal conductivity), Moscow, Vysshaya shkola, 1978, 328 p.
18. Goodman T.R. Irvine T., Hartnett J. *Integral Methods for nonlinear heat transfer. Advances in Heat Transfer*. New-York: Academic Press, 1964, vol. 1, pp. 51-122.
19. Van Leer B. Flux-Vector Splitting for the Euler Equation, *Proceedings of the ICNMF Conference, Lecture Notes in Physics*, 1982, vol. 170, pp. 507-512.

20. Shishkov A.A., Panin S.D., Rummyantsev B.V. *Rabochie protsessy v raketnykh dvigatelyakh tverdogo topliva* (Working processes in solid rocket motors), Moscow, Mashinostroenie, 1988, 240 p.

Статья поступила в редакцию 04.06.2024

Одобрена после рецензирования 11.06.2024

Принята к публикации 28.08.2024

The article was submitted on 04.06.2024; approved after reviewing on 11.06.2024; accepted for publication on 28.08.2024