

Научная статья

УДК 004.942:623.526.4

doi: 10.17223/19988621/80/12

Одномерная математическая модель колебаний ствола с поперечным сечением произвольной формы

Иван Григорьевич Русяк¹, Вадим Гарайханович Суфиянов²,
Даниил Анатольевич Клюкин³

^{1, 2, 3} *Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова,*

Ижевск, Россия

¹ *primat@istu.ru*

² *vsufiy@mail.ru*

³ *anatoliikljukin@mail.ru*

Аннотация. Рассмотрена одномерная математическая модель решения задачи о продольно-поперечных колебаниях ствола автоматической пушки с поперечными сечениями различной формы. Разностная схема для решения одномерных нестационарных уравнений напряженно-деформированного состояния ствола при выстреле построена на основе интегро-интерполяционного метода; напряженно-деформированное состояние ствола в плоскостях поперечных сечений аппроксимировано с использованием аналитического решения Ламе. Проведено исследование влияния формы сечения канала ствола на величину начального прогиба и амплитуду поперечных колебаний дульного среза при стрельбе очередями.

Ключевые слова: математическая модель, численные методы, колебания ствола, автоматическая пушка, повышение жесткости

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-01-00072.

Для цитирования: Русяк И.Г., Суфиянов В.Г., Клюкин Д.А. Одномерная математическая модель колебаний ствола с поперечным сечением произвольной формы // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2022. № 80. С. 133–146. doi: 10.17223/19988621/80/12

Original article

A one-dimensional mathematical model of barrel vibrations with arbitrary cross-sectional shapes

Ivan G. Rusyak¹, Vadim G. Sufiyarov², Daniil A. Klyukin³

^{1, 2, 3} *Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation*

¹ *primat@istu.ru*

² vsufiy@mail.ru³ anatoliikljukin@mail.ru

Abstract. The problem of longitudinal and transverse vibrations of a barrel with arbitrary cross-sectional shapes is considered and solved in the framework of a one-dimensional model. The study shows that the amplitude of transverse vibrations in the vertical plane significantly exceeds that in the horizontal plane. This paper proposes to reduce the amplitude of vibrations by changing the shape of the barrel cross-section, namely by adding stiffeners. The numerical algorithm for solving the problem is developed on the basis of the integro-interpolation method. The verification of the numerical integration method is carried out, and the grid convergence is verified by means of the modeling of barrel vibrations for a 30 mm automatic cannon. The study of the impact of the barrel cross-section shape shows that the use of stiffeners can reduce the initial deflection and the amplitude of muzzle vibrations when firing in bursts. The obtained results demonstrate a narrow spread of projectile departure angles, and, consequently, the improved shooting accuracy of the automatic cannon.

Keywords: mathematical model, numerical methods, barrel vibrations, automatic cannon, stiffening

Acknowledgments: The reported study was funded by RFBR, project number 20-01-00072.

For citation: Rusyak, I.G., Sufiyarov, V.G., Klyukin, D.A. (2022) A one-dimensional mathematical model of barrel vibrations with arbitrary cross-sectional shapes. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 80. pp. 133–146. doi: 10.17223/19988621/80/12

Введение

Основная задача исследований в области проектирования орудий – повышение мощности, надежности, живучести стволов и точности стрельбы, а также удешевление производства стволов автоматических пушек [1]. Повышение характеристик эффективности стрельбы неизбежно приводит к увеличению толщины стенок стволов, что входит в противоречие с техническими и экономическими требованиями их изготовления. В этой связи необходимо искать компромисс между меньшим весом, высокой огневой мощью и жесткостью конструкции.

Математическое моделирование позволяет проводить анализ влияния различных факторов на эффективность функционирования артиллерийских орудий еще на этапе проектирования стволов [1, 2]. В данной работе рассматривается вопрос уменьшения поперечных колебаний ствола автоматической пушки в вертикальной плоскости. Одним из способов решения данной проблемы является усовершенствование формы ствола, например с помощью ребер жесткости [3]. Существуют известные разработки 30 мм автоматических пушек, например Mk44 Bushmaster II [4], которые имеют неколеблющее сечение ствола (рис. 1).



Рис. 1. Стрельба из 30 мм автоматической пушки Mk44 Bushmaster II
Fig. 1. Firing from a 30 mm Mk44 Bushmaster II automatic cannon

Жесткость конструкции имеет важное значение для автоматических пушек, так как из-за высокого темпа стрельбы из этих орудий имеет место большой разброс траекторий движения снарядов. Рассмотрим поперечные сечения ствола различной формы трех типов (рис. 2). Будем считать базовым типом кольцевое сечение ствола пушки (см. рис. 2, *a*). В остальных случаях (см. рис. 2 *a, b*) для обеспечения одинакового веса площади поперечных сечений выбирались равными площади поперечного сечения базового типа.

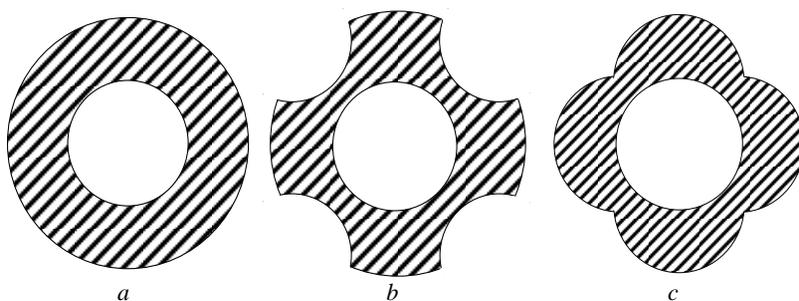


Рис. 2. Поперечные сечения стволов:

(*a*) без ребер жесткости, (*b*) ребра жесткости 1-го типа, (*c*) ребра жесткости 2-го типа

Fig. 2. Cross sections of barrels:

(*a*) without stiffeners, (*b*) type 1 stiffeners, and (*c*) type 2 stiffeners

Трехмерные модели пушек с соответствующими типами ребер жесткости представлены на рис. 3.

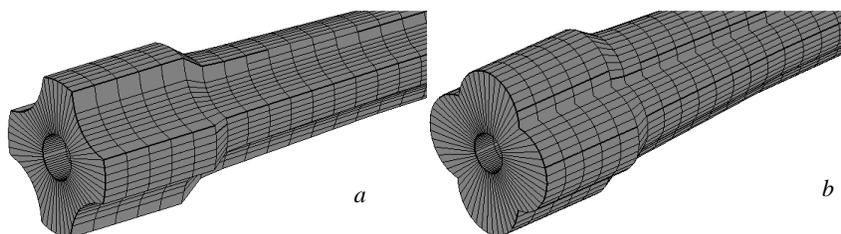


Рис. 3. 3D модели стволов 30 мм пушки:

a – ребра жесткости 1-го типа, *b* – ребра жесткости 2-го типа

Fig. 3. 3D models of 30 mm gun barrels: (*a*) type 1 and (*b*) type 2 stiffeners

Целью данной работы является анализ влияния формы поперечного сечения ствола автоматической пушки на величину начального прогиба ствола под действием сил тяжести и определение амплитуды колебаний ствола автоматической пушки на основе математического моделирования процесса стрельбы очередями.

1. Математическая модель

Рассмотрим систему дифференциальных уравнений начального прогиба ствола, направленного под углом возвышения φ [2, 5, 6], с учетом произвольной формы сечения ствола автоматической пушки. Помимо силы тяжести самого ствола будем учитывать силы, действующие на ствол со стороны снаряда при его дви-

жении по каналу: $q_1^0(x)$ – по оси Ox , $q_2^0(x)$ – по оси Oy ; $q_3^0(x)$ – по оси Oz , где ось Ox направлена вдоль оси ствола, ось Oy вверх, ось Oz направлена так, что единичные орты образуют правую тройку векторов [6]. Модель учитывает технологические дефекты изготовления ствола, а именно отклонения центров масс сечений ствола v_{00} и w_{00} от оси симметрии канала ствола с кольцевым сечением [2].

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(FE \frac{\partial u_0}{\partial x} \right) &= \rho F g \sin \varphi - q_1^0(x), \\ \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EJ_z \frac{\partial^2 v_0}{\partial x^2} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(FE \frac{\partial u_0}{\partial x} \frac{\partial (v_0 + v_{00})}{\partial x} \right) &= -\rho F g \cos \varphi + q_2^0(x), \\ \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EJ_y \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(FE \frac{\partial u_0}{\partial x} \frac{\partial (w_0 + w_{00})}{\partial x} \right) &= q_3^0(x), \end{aligned} \quad (1)$$

где $u_0 = u_0(x)$ – величина начального прогиба по оси Ox ; $v_0 = v_0(x)$ – величина начального прогиба по оси Oy ; $w_0 = w_0(x)$ – величина начального прогиба по оси Oz ; E – модуль Юнга; $F = F(x)$ – площадь поперечного сечения в точке с координатой x ; ρ – плотность материала ствола; g – ускорение силы тяжести; $J_y = J_y(x)$ – момент инерции сечения относительно оси Oy ; $J_z = J_z(x)$ – момент инерции сечения относительно оси Oz . Площадь поперечного сечения F , моменты инерции J_y и J_z вычисляются по формулам

$$F = \int_F df, \quad J_y = \int_F z^2 df, \quad J_z = \int_F y^2 df, \quad (2)$$

Запишем граничные условия у казенного среза. Считая, что ствол жестко закреплен, будем иметь:

$$\begin{aligned} u_0(0) &= 0, \\ v_0(0) = 0, \quad \left. \frac{\partial v_0(x)}{\partial x} \right|_{x=0} &= 0, \\ w_0(0) = 0, \quad \left. \frac{\partial w_0(x)}{\partial x} \right|_{x=0} &= 0, \end{aligned} \quad (3)$$

граничные условия для дульного среза запишутся в виде:

$$\begin{aligned} \left. FE \frac{\partial u_0(x)}{\partial x} \right|_{x=L} &= 0, \\ EJ_z \left. \frac{\partial^2 v_0(x)}{\partial x^2} \right|_{x=L} = 0, \quad \left. \frac{\partial}{\partial x} \left(EJ_z \frac{\partial^2 v_0(x)}{\partial x^2} \right) \right|_{x=L} &= 0, \\ EJ_z \left. \frac{\partial^2 w_0(x)}{\partial x^2} \right|_{x=L} = 0, \quad \left. \frac{\partial}{\partial x} \left(EJ_z \frac{\partial^2 w_0(x)}{\partial x^2} \right) \right|_{x=L} &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Процесс колебаний ствола в одномерной постановке рассматривается как задача о колебаниях стержня, которая описывается системой дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned}
 \rho F \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= -\rho F g \sin \varphi + q_1(x, t) + \frac{\partial}{\partial x} (F \sigma^x) - p_1 \frac{\partial S}{\partial x}, \\
 \rho F \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= -\rho F g \cos \varphi + q_2(x, t) + \frac{\partial}{\partial x} \left((F \sigma^x - p_1 S) \frac{\partial (v + v_{00})}{\partial x} \right) + \\
 &+ v \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\int_F (\sigma^{yy} + \sigma^{zz}) y df \right) - \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EJ_z \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right), \\
 \rho F \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= q_3(x, t) + \frac{\partial}{\partial x} \left((F \sigma^x - p_1 S) \frac{\partial (w + w_{00})}{\partial x} \right) + \\
 &+ v \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\int_F (\sigma^{yy} + \sigma^{zz}) z df \right) - \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EJ_y \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right), \quad (5) \\
 \sigma^x &= E \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{v}{F} \int_F (\sigma^{yy} + \sigma^{zz}) df,
 \end{aligned}$$

где $u = u(x, t)$ – величина продольных колебаний ствола по оси Ox ; $v = v(x, t)$ – величина поперечных колебаний ствола по оси Oy ; $w = w(x, t)$ – величина поперечных колебаний ствола по оси Oz ; v – коэффициент Пуассона. На ствол действуют внешние динамические силы $q_1(x, t)$, $q_2(x, t)$ и $q_3(x, t)$. В рамках допущений работы будем рассматривать только силу взаимодействия снаряда со стволом. Нагружение ствола внутренним давлением определяется из решения задачи внутренней баллистики с учетом периода последствия в термодинамической постановке [7, 8].

В качестве допущения одномерной модели распределение суммы напряжений $\sigma^{yy} + \sigma^{zz}$ в поперечном сечении определим на основе решения задачи Ламе [9] для всего интервала углов $\alpha \in [0, 2\pi)$ (рис. 4) по формуле

$$\sigma^{yy} + \sigma^{zz} = 2p_1 \frac{r_1^2}{r_2^2 - r_1^2}, \quad (6)$$

где p_1 – давление внутри канала ствола.

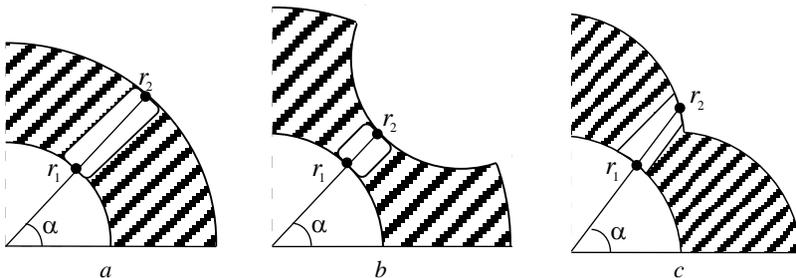


Рис. 4. К использованию решения задачи Ламе для сечений:

a – без ребер жесткости, b – с ребрами жесткости 1-го типа, c – с ребрами жесткости 2-го типа

Fig. 4. To the Lamé problem solution for sections:

(a) without stiffeners, (b) type 1 stiffeners, and (c) type 2 stiffeners

Погрешность представления (6) определялась с помощью расчета напряженно-деформированного состояния сечений ствола в пространственной постановке в ANSYS. При сравнении результатов расчета значений интегралов $\int_F (\sigma^{yy} + \sigma^{zz}) df$

при нагружении внутренним давлением $p = 400$ МПа отклонения составили: для сечения базового типа – 0,01%, для сечения с ребрами жесткости 1-го типа – 15,7%, для сечения с ребрами жесткости 2-го типа – 1,5%.

Система уравнений (5) решается при следующих начальных условиях:

$$\begin{aligned} u(x,0) &= u_0(x), \quad \left. \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} \right|_{t=0} = 0, \\ v(x,0) &= v_0(x), \quad \left. \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} \right|_{t=0} = 0, \\ w(x,0) &= w_0(x), \quad \left. \frac{\partial w(x,t)}{\partial t} \right|_{t=0} = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Граничные условия закрепления для казенного среза:

$$\begin{aligned} u(0,t) &= u_0(0), \\ v(0,t) &= v_0(0), \quad \left. \frac{\partial v(x,t)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \\ w(0,t) &= w_0(0), \quad \left. \frac{\partial w(x,t)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Граничные условия для дульного среза при отсутствии внешних сил имеют вид:

$$\begin{aligned} FE \left. \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} \right|_{x=L} &= 0, \\ EJ_z \left. \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2} \right|_{x=L} &= 0, \quad \left. \frac{\partial}{\partial x} \left(EJ_z \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2} \right) \right|_{x=L} = 0, \\ EJ_y \left. \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} \right|_{x=L} &= 0, \quad \left. \frac{\partial}{\partial x} \left(EJ_y \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} \right) \right|_{x=L} = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Решение уравнений (1)–(9) проводится на расчетной сетке в пространственной области $0 \leq x \leq l = L_{\text{км}} + L_{\text{д}}$:

$$\Omega = \left\{ x_i = i \cdot h \mid i \in \{0, 1, \dots, I\}, h = \frac{l}{I} \right\}, \quad (10)$$

а шаги по времени определяются в области $0 \leq t \leq T$:

$$\Xi = \left\{ t_n = n \cdot \tau \mid i \in \{0, 1, \dots, N\}, \tau = \frac{T}{N} \right\}, \quad (11)$$

где I – количество узлов в пространственной области; $L_{\text{км}}$, $L_{\text{д}}$ – длины камеры и ствола соответственно; N – количество узлов во временной области; T – конечное время решения задачи.

Неявная разностная аппроксимация дифференциальных уравнений в узлах расчетной сетки осуществляется интегро-интерполяционным методом [10]. В результате получается система алгебраических уравнений диагонального вида, решение которой определяется методом прогонки [11].

2. Построение сечения произвольной формы и верификация результатов численного интегрирования

Рассмотрим методы построения различных типов сечений, представленных на рис. 2. Границы областей поперечных сечений определяются из параметрического уравнения окружности:

$$y = y_c + r \sin(t), \quad z = z_c + r \cos(t), \quad t \in [0, 2\pi], \quad (12)$$

где y_c, z_c, r – координаты центра и радиус окружности. В случае отсутствия ребер жесткости внутренняя граница сечения канала ствола определяется окружностью радиуса $r = r_1$, а внешняя граница – окружностью радиуса $r = r_2$.

Внешние границы сечения канала ствола с ребрами жесткости 1-го типа образуются из кольцевого сечения удалением областей, удовлетворяющих неравенствам

$$(y - y_c)^2 + (z - z_c)^2 \leq r. \quad (13)$$

Внешние границы сечений канала ствола с ребрами жесткости 2-го типа образуются добавлением к внешней части кольцевого сечения областей, определяемых по формуле (13).

Для обеспечения одинакового веса рассматриваемых типов стволов сечения каналов с ребрами жесткости строились таким образом, чтобы на каждом срезе их площади сечений, расположенных на одном и том же расстоянии от казенного среза, совпадали с площадями сечений ствола с круговым сечением.

В рассматриваемых сечениях вычисляются площади сечений F , а также моменты инерции относительно соответствующих осей и другие параметры в системе уравнений (5). Численное интегрирование производится в сечениях ствола, разбитых на треугольные конечные элементы. На рис. 5 представлены результаты дискретизации области интегрирования методом триангуляции Делоне [12].

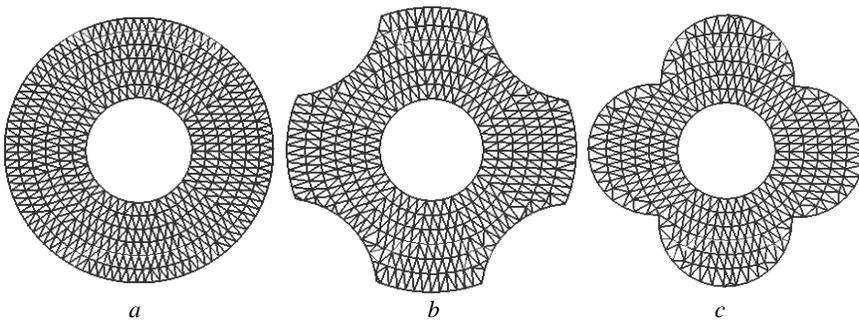


Рис. 5. Триангулированные поперечные сечения:

a – без ребер жесткости, b – с ребрами жесткости 1-го типа, c – с ребрами жесткости 2-го типа

Fig. 5. Triangulated cross sections:

(a) without stiffeners, (b) type 1 stiffeners, and (c) type 2 stiffeners

Проведем сравнение аналитических решений и результатов численного интегрирования для F , J_y , J_z по формулам (2). На рис. 6–8 представлено сравнение аналитического (сплошная линия) и численного (точки) интегрирования площади поперечного сечения F и моментов инерции J_y , J_z ствола без ребер жесткости на различных расстояниях Ox от казенного среза.

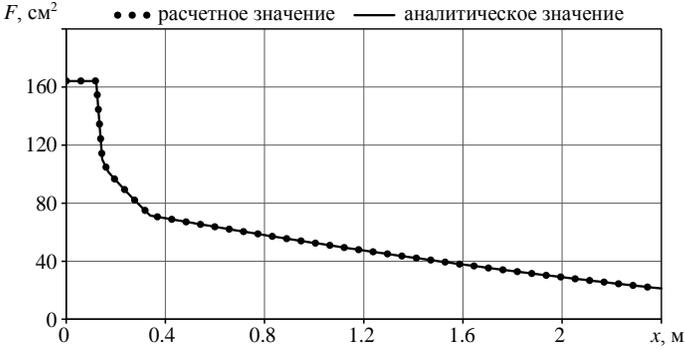


Рис. 6. Сравнение аналитического и расчетного значений площади поперечного сечения F
Fig. 6. Comparison of the calculated and analytical values of the cross-sectional area F

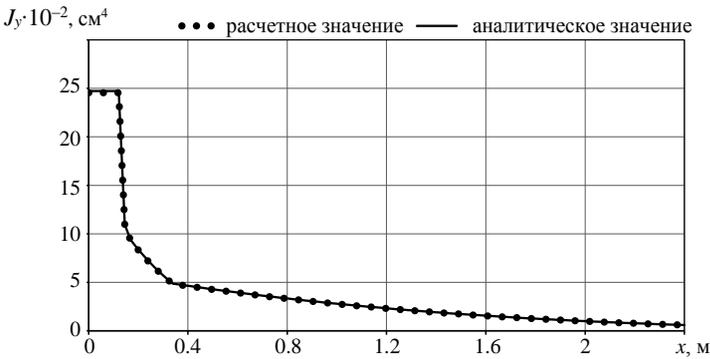


Рис. 7. Сравнение аналитического и расчетного значений момента инерции J_y
Fig. 7. Comparison of the calculated and analytical values of the moment of inertia J_y

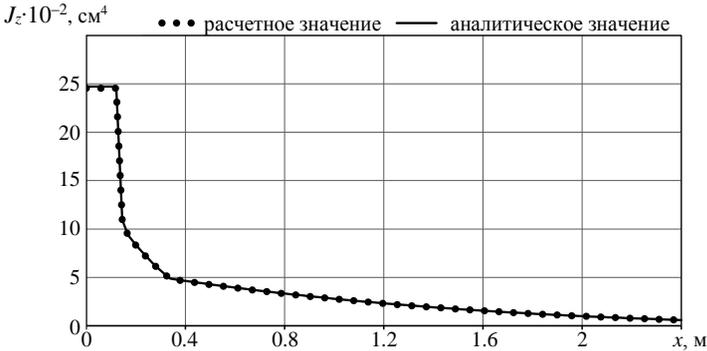


Рис. 8. Сравнение аналитического и расчетного значений момента инерции J_z
Fig. 8. Comparison of the calculated and analytical values of the moment of inertia J_z

Отклонение расчетных и аналитических значений определяется согласно норме

$$\|y^* - \tilde{y}\| = \frac{1}{I} \sum_{i=0}^l \frac{|y_i^* - \tilde{y}_i|}{|y_i^*|} \cdot 100\%, \quad (14)$$

где y^* – аналитическое значение параметра; \tilde{y} – расчетное значение параметра.

Погрешность численного интегрирования на расчетной сетке из 3 000 треугольных элементов составила

$$\|F^* - \tilde{F}\| = 0.16\%, \quad \|J_y^* - \tilde{J}_y\| = 0.39\%, \quad \|J_z^* - \tilde{J}_z\| = 0.39\%.$$

На рис. 9, 10 представлено сравнение распределений моментов инерции по длине ствола для рассматриваемых типов сечений.

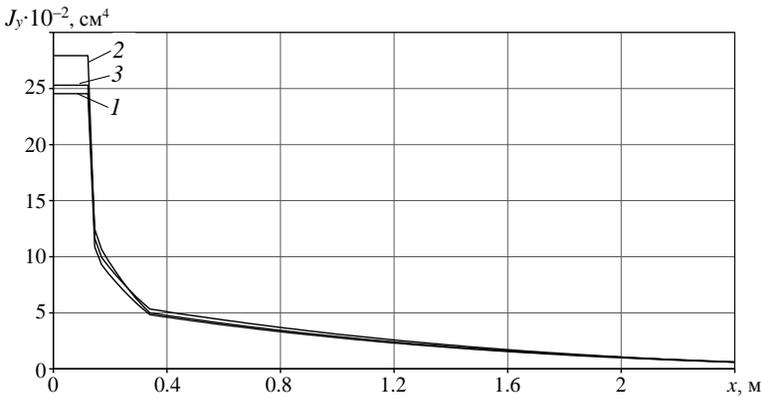


Рис. 9. Сравнение расчетных значений момента инерции J_y :

1 – без ребер жесткости, 2 – с ребрами жесткости 1-го типа, 3 – с ребрами жесткости 2-го типа

Fig. 9. Comparison of the calculated values of the moment of inertia J_y :

(1) without stiffeners, (2) type 1 stiffeners, and (3) type 2 stiffeners

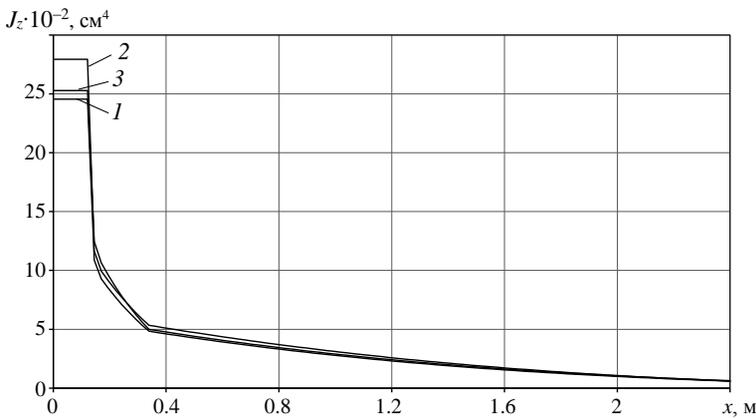


Рис. 10. Сравнение расчетных значений момента инерции J_z :

1 – без ребер жесткости, 2 – с ребрами жесткости 1-го типа, 3 – с ребрами жесткости 2-го типа

Fig. 10. Comparison of the calculated values of the moment of inertia J_z :

(1) without stiffeners, (2) type 1 stiffeners, and (3) type 2 stiffeners

Сходимость результатов численного интегрирования в зависимости от числа конечных элементов K на примере ствола с ребрами жесткости 2-го типа показана на рис. 11. Аналогичные результаты были получены и для других типов сечений.

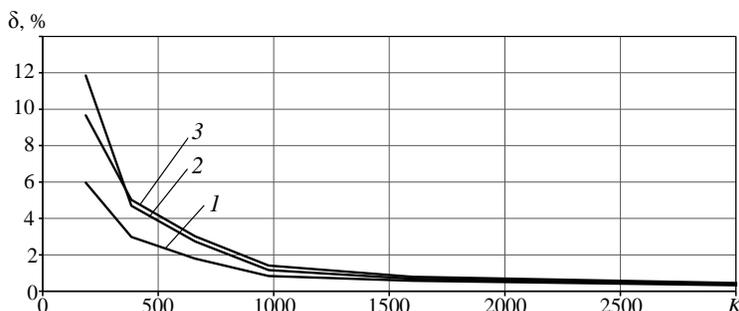


Рис. 11. Зависимость погрешности расчета от числа конечных элементов в сечении: 1 – площадь поперечного сечения F ; 2 – момент инерции J_y ; 3 – момент инерции J_z

Fig. 11. Calculation error as a function of the number of finite elements in the section: (1) cross-sectional area F , (2) moment of inertia J_y ; and (3) moment of inertia J_z

Из рис. 11 видно, что для достижения точности 1% необходимо 1 500 конечных элементов в сечении. Далее при моделировании использовалось именно такое количество элементов.

3. Результаты математического моделирования

Решим основную задачу внутренней баллистики (ОЗВБ) в термодинамической постановке для выстрела из 30 мм автоматической пушки с осколочно-фугасным снарядом. Кривые давлений и скорости снаряда представлены на рис. 12.

Согласно теории наибольших деформаций [1] вычислим допустимое давление с запасом прочности n по формуле

$$p_{\max} = \frac{3}{2n} \sigma_e \frac{(r_2/r_1)^2 - 1}{2 \cdot (r_2/r_1)^2 + 1}, \quad (15)$$

откуда можно определить зависимость допустимой толщины ствола h_{\min} от давления p :

$$h_{\min} = r_1 \left(\sqrt{\frac{1,5\sigma_e + n \cdot p}{1,5\sigma_e - 2n \cdot p}} - 1 \right), \quad (16)$$

где σ_e – предел пропорциональности материала, для стали $\sigma_e = 784$ МПа.

Построим эпюру максимальных давлений и определим допустимую толщину в каждой точке ствола с запасом прочности 20% ($n = 1, 2$) (рис. 13).

При построении ребер жесткости 1-го и 2-го типов минимальная толщина ствола принималась равной минимально допустимой толщине (16) с запасом прочности $n = 1, 2$.

Проведем моделирование колебаний ствола при стрельбе очередью из 5 выстрелов с интервалом 15 мс между выстрелами при стрельбе под углом возвышения $\varphi = 5^\circ$. Сравнение начальных прогибов и колебаний дульного среза для различных типов поперечных сечений представлено на рис. 14.

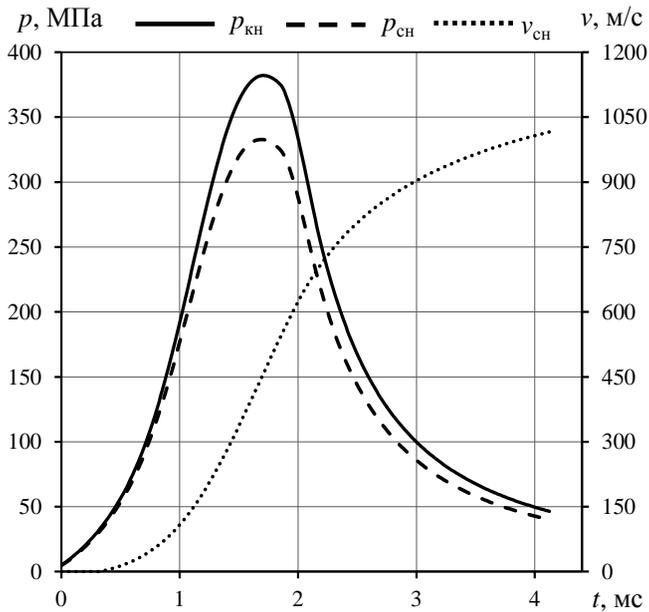


Рис. 12. Зависимости давления газа у дна канала, у дна снаряда от времени при решении ОЗВБ в термодинамической постановке

Fig. 12. Gas pressure at the face of the breech and at the bottom of the projectile and the projectile velocity as functions of time when solving the problem of internal ballistics in a thermodynamic formulation

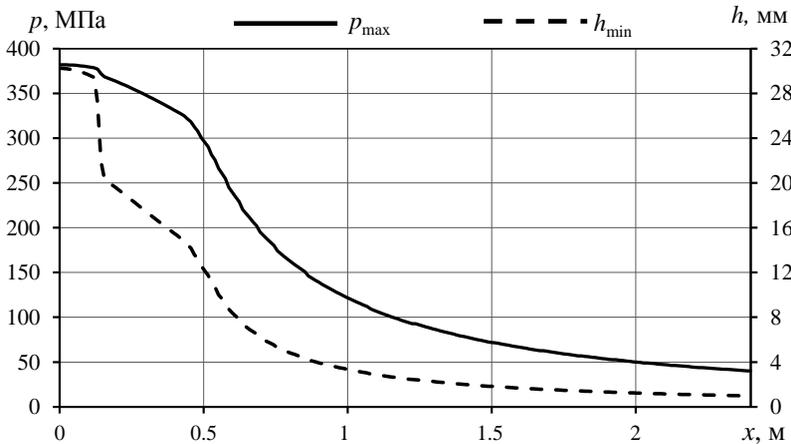


Рис. 13. Эпюра максимальных давлений и допустимая толщина ствола

Fig. 13. Diagram of maximum pressures and allowable barrel thickness

Из рис. 14, *a* видно, что стволы с ребрами жесткости испытывают меньший начальный прогиб, чем без ребер жесткости. Так, для ствола без ребер жесткости прогиб составил 1.07 мм, для 1-го типа ребер – 1.00 мм, для 2-го типа ребер – 1.03 мм. При этом существенно уменьшается амплитуда колебаний (рис. 14, *b*):

для ствола без ребер жесткости амплитуда составила 55 мкм, для 1-го типа ребер – 22 мкм, для 2-го типа ребер – 32 мкм. Полученный результат, очевидно, должен привести к меньшему разбросу углов вылета снаряда, а следовательно, и повышению точности при стрельбе очередями.

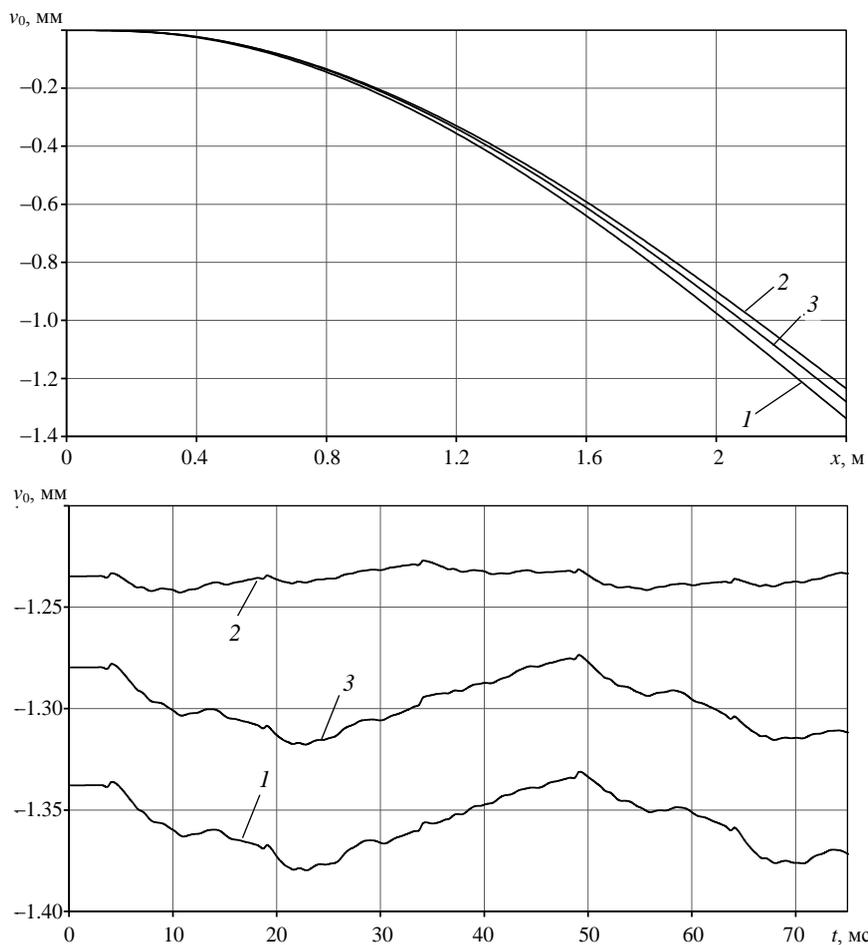


Рис. 14. Начальный прогиб (а) и колебания дульного среза (б) 30-мм автоматической пушки: 1 – без ребер жесткости, 2 – с ребрами жесткости 1-го типа, 3 – с ребрами жесткости 2-го типа

Fig. 14. (a) Initial deflection and (b) muzzle vibrations for a 30 mm automatic cannon: (1) without stiffeners, (2) type 1 stiffeners, and (3) type 2 stiffeners

Заключение

1. Разработана и реализована математическая модель продольно-поперечных колебаний ствола автоматической пушки при наличии ребер жесткости с учетом влияния давления пороховых газов и взаимодействия снаряда со стволом.

2. Определены амплитуды колебаний дульного среза для стволов различных поперечных сечений на основе решения задачи о продольно-поперечных колебаниях при стрельбе из 30 мм автоматической пушки.

3. Исследовано влияние ребер жесткости на величину начального прогиба и амплитуду колебаний. Расчеты показали, что прогиб ствола для ребер жесткости 1-го типа уменьшается на 8,1%, для 2-го типа – на 4,6% по сравнению с кольцевым сечением ствола пушки. При этом амплитуда колебаний дульного среза ствола для ребер жесткости 1-го типа уменьшается в 2 раза, для 2-го типа – почти в 1,5 раза.

Список источников

1. Орлов Б.В., Ларман Э.К., Маликов В.Г. Устройство и проектирование стволов артиллерийских орудий. М. : Машиностроение, 1976. 432 с.
2. Хоменко Ю.П., Ищенко А.Н., Касимов В.З. Математическое моделирование внутрибаллистических процессов в ствольных системах. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 1999. 256 с.
3. Антоненко Е.Д., Егоров В.В., Кудряшова И.А., Филенко А.В. Исследование решений для уменьшения изгиба артстволов // Калашниковские чтения : материалы VII Всерос. науч.-практ. online-конф., в рамках III Молодеж. форума студентов и курсантов оборонных специальностей вузов России «С именем Калашникова». Ижевск : Изд-во ИжГТУ им. М.Т. Калашникова, 2020. С. 71–75.
4. Mk44 Bushmaster II // Wikipedia contributors. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Mk44_Bushmaster_II (accessed: 13.02.2022)
5. Ахромеев С.Ф. Военный энциклопедический словарь. М. : Воениздат, 1986. 863 с.
6. Русяк И.Г., Суфиянов В.Г., Клюкин Д.А. Исследование влияния упругих деформаций и колебаний ствола на точность стрельбы // Интеллектуальные системы в производстве. 2020. Т. 18, № 4. С. 98–108. doi: 10.22213/2410-9304-2020-4-98-108
7. Серебряков М.Е. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет. М. : Оборонгиз, 1962. 703 с.
8. Русяк И.Г., Липанов А.М., Ушаков В.М. Физические основы и газовая динамика горения порохов в артиллерийских системах. М. ; Ижевск : Ижевский ин-т компьютерных иссл.-, 2016. 456 с.
9. Работнов Ю.Н. Сопrotивление материалов. М. : Физматгиз, 1963. 456 с.
10. Самарский А.А. Введение в теорию разностных схем. М. : Наука, 1971. 552 с.
11. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы. М. : Наука, 1989. 432 с.
12. Скворцов А.В., Мирза Н.С. Алгоритмы построения и анализа триангуляции. Томск : Изд-во Том. ун-та, 2006. 168 с.

References

1. Orlov B.V., Larman E.K., Malikov V.G. (1976) *Ustroystvo i proektirovanie stvolov artilleriyskikh orudiy* [Arrangement and design of artillery barrels]. Moscow: Mashinostroenie.
2. Khomenko Yu.P., Ishchenko A.N., Kasimov V.Z. (1999) *Matematicheskoe modelirovanie vnutriballisticheskikh protsessov v stvol'nykh sistemakh* [Mathematical modelling of interior ballistic processes in barrel systems]. Novosibirsk: SB RAS Publishing House.
3. Antonenko E.D., Egorov V.V., Kudryashova I.A., Filenko A.V. (2020) *Issledovanie resheniy dlya umen'sheniya izgiba artstvolov* [A study of approaches to reduce the bending of guns]. *Proceedings of the VII All-Russian Scientific and Practical Online Conference "Kalashnikovskie chteniya"*, Izhevsk. pp. 71–75.
4. Mk44 Bushmaster II. Wikipedia contributors. Access mode: https://en.wikipedia.org/wiki/Mk44_Bushmaster_II

5. Akhromeev S.F. (1986) *Voennyi entsiklopedicheskiy slovar'* [Military encyclopedic dictionary]. Moscow: Voenizdat.
6. Rusyak I.G., Sufiyarov V.G., Klyukin D.A. (2020) Issledovanie vliyaniya uprugikh deformatsiy i kolebaniy stvola na tochnost' strel'by [Study of elastic barrel deformations and vibrations impact on shooting accuracy]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve – Intelligent Systems in Manufacturing*, 18(4). pp. 98–108. doi: 10.22213/2410-9304-2020-4-98-108
7. Serebryakov M.E. (1962) *Vnutrennyaya ballistika stvol'nykh sistem i porokhovyykh raket* [Internal ballistics of barrel systems and powder rockets]. Moscow: Oborongiz.
8. Rusyak I.G., Lipanov A.M., Ushakov V.M. (2016) *Fizicheskie osnovy i gazovaya dinamika goreniya porokhov v artilleriyskikh sistemakh* [Physical principles and gas dynamics of the gunpowder combustion in artillery systems]. Moscow–Izhevsk: Institute of Computer Science.
9. Rabotnov Yu.N. (1963) *Soprotivlenie materialov* [Strength of materials]. Moscow: Fizmatgiz.
10. Samarskiy A.A. (1971) *Vvedenie v teoriyu raznostnykh skhem* [Introduction to the theory of difference schemes]. Moscow: Nauka.
11. Samarskiy A.A., Gulin A.V. (1989) *Chislennyye metody* [Numerical methods]. Moscow: Nauka.
12. Skvortsov A.V., Mirza N.S. (2006) *Algoritmy postroeniya i analiza triangulyatsiy*. [Algorithms for constructing and analyzing triangulations]. Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo universiteta.

Сведения об авторах:

Русяк Иван Григорьевич – доктор технических наук, профессор, действительный член Российской академии ракетных и артиллерийских наук, заведующий кафедрой «Прикладная математика и информационные технологии» Ижевского государственного технического университета им. М.Т. Калашникова, Ижевск, Россия. E-mail: primat@istu.ru

Суфиянов Вадим Гарайханович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Прикладная математика и информационные технологии» Ижевского государственного технического университета им. М.Т. Калашникова, Ижевск, Россия. E-mail: vsufiy@mail.ru

Клюкин Даниил Анатольевич – аспирант, ассистент кафедры «Прикладная математика и информационные технологии» Ижевского государственного технического университета им. М.Т. Калашникова, Ижевск, Россия. E-mail: anatoliikljukin@mail.ru

Information about the authors:

Rusyak Ivan G. (Doctor of Technical Sciences, Professor, Full Member of the Russian Academy of Missile and Artillery Sciences Russian Federation, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation). E-mail: primat@istu.ru

Sufiyarov Vadim G. (Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation). E-mail: vsufiy@mail.ru

Klyukin Daniil A. (Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation). E-mail: anatoliikljukin@mail.ru

Статья поступила в редакцию 27.04.2022; принята к публикации 01.12.2022

The article was submitted 27.04.2022; accepted for publication 01.12.2022