

УДК 519.862.6

DOI: 10.22213/2410-9304-2023-4-81-87

Исследование влияния формы ствола автоматической пушки на его колебательные и температурные характеристики*

И. Г. Русяк, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

В. Г. Суфиянов, доктор технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Д. А. Клюкин, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

В работе проведены исследования влияния внешней формы ствола с ребрами жесткости в поперечном сечении на колебания, охлаждение ствола и кучность стрельбы. Представлена квазиодномерная математическая модель теплопроводности ствола с учетом формы внешней поверхности в виде коэффициента формы, рассчитываемого на основе периметра внешней границы поперечного сечения ствола с ребрами жесткости. При моделировании стрельбы очередью из 30-мм пушки решалась задача внутренней баллистики в термодинамической постановке, учитывающей распределение параметров газопороховой смеси по длине ствола и противодавление; в промежутках времени между выстрелами решалась задача истечения газа из ствола. Продольно-поперечные колебания ствола рассчитывались по квазиодномерной математической модели. Траектория снаряда рассчитывалась по уравнениям движения снаряда с учетом сопротивления воздуха, вращения и колебаний относительно центра масс. Краевые задачи решались с помощью интегроинтерполяционного метода. Задачи Коши – явным методом Рунге – Кутты 4-го порядка точности. Рассчитана допустимая толщина ствола при выстреле. Представлены результаты моделирования для ствола с ребрами жесткости. Проведена верификация квазиодномерной модели теплопроводности путем сравнения с двумерной моделью в ANSYS для ствола с ребрами жесткости. Показано, что амплитуда колебаний ствола с ребрами жесткости меньше амплитуды колебаний цилиндрического ствола на 36 %. Разброс точек поражения при стрельбе по вертикальной мишени на расстоянии 1,5 км сокращается на 67 %. Определена максимальная температура внутренней поверхности ствола, равная 1002 К. Температура внешней поверхности ствола для очереди из 10 выстрелов снижается в среднем на 25 %. При стрельбе очередью из 100 выстрелов – на 16 %.

Ключевые слова: оптимизация, колебания ствола, теплопроводность; автоматическая пушка, баллистика, численные методы.

Введение

Ресурс ствола автоматической пушки является узким местом, который ограничивает улучшение характеристик оружия. Исследования различных авторов показали, что эрозия внутреннего канала ствола является прямой причиной, влияющей на срок его службы. В свою очередь, эрозия внутренней поверхности ствола вызывается воздействиями силового и теплового нагружений, а также химического воздействия, при этом тепловой режим играет ведущую роль [1, 2].

Известно, что износ тесно связан с максимальной температурой поверхности канала ствола [3]. Поэтому при проектировании цикличности стрельбы важно поддерживать температуру до 1300 К, установленную производителем в качестве максимальной температуры при испытании срока службы ствола.

Из работ [4–6] известно, что во время стрельбы температура внутренней поверхности ствола может достигать 1300 К в зависимости от темпа стрельбы и типа боеприпасов.

В работе [7] было показано, что амплитуда колебаний ствола автоматической пушки может быть снижена за счет изменения формы поперечного сечения ствола. Примером артиллерийского орудия с кольцевым поперечным сечением является 30-мм автоматическая пушка Mk. 44 Bushmaster II

(рис. 1) [8], разработанная в США и стоящая на вооружении в Бельгии, Чехии, Польше, Литве, Норвегии и других странах НАТО.



Рис. 1. 30-мм автоматическая пушка Mk. 44 Bushmaster II

Fig. 1. 30 mm automatic cannon Mk. 44 Bushmaster II

Данная пушка получила широкое применение, она устанавливается на БМП (Bionix-II AFV, CV90 AFV, KTO Rosomak), боевые роботы (EMAV-MCA), турели (MSI Mk38 Mod4, Mk 46 Mod 2 GWS), самолеты огневой поддержки (Lockheed AC-130) [9].

Широкое применение Mk. 44 Bushmaster II вызывает значительный интерес к исследованию характеристик орудий с не кольцевым сечением ствола.

© Русяк И. Г., Суфиянов В. Г., Клюкин Д. А., 2023

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Программы развития научных и научно-педагогических кадров ИжГТУ имени М. Т. Калашникова.

Данная работа посвящена исследованию влияния внешней формы ствола с точки зрения улучшения его колебательных и температурных характеристик.

Геометрические характеристики и форма ствола с ребрами жесткости

Рассмотрим форму поперечного сечения, аналогичную Mk. 44 Bushmaster II с ребрами жесткости, полученными в результате круговых вырезов в поперечном сечении (рис. 2).

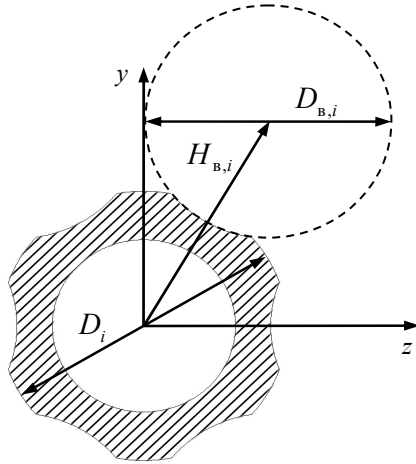


Рис. 2. Поперечное сечение ствола с ребрами жесткости

Fig. 2. Cross section of the barrel with 6 stiffeners

Продольное сечение ствола представлено на рис. 3. На каждом из ключевых участков задается внешний диаметр ствола D_i , диаметр выреза $D_{B,i}$ и расстояние от центра сечения до центра выреза $H_{B,i}$, $i = 0, \overline{N}$ (см. рис. 2). Вырезы располагаются равномерно вокруг сечения ствола.

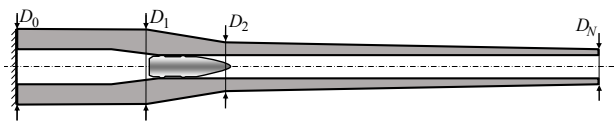


Рис. 3. Продольное сечение ствола

Fig. 3. Longitudinal section of the barrel

Будем считать, что ствол удовлетворяет условиям прочности, если выполняется неравенство

$$h_i \geq h_{\min,i}, \quad i = 0, \overline{N}, \quad (1)$$

где h_i – толщина ствола в i -м сечении (рис. 4); $h_{\min,i}$ – минимальная, с точки зрения прочности, толщина ствола цилиндрической формы в i -м сечении, определяемая по теории наибольших линейных деформаций [10]:

$$h_{\min,i} = \frac{d_i}{2} \left(\sqrt{\frac{1,5\sigma_e + n \cdot p_{\max,i}}{1,5\sigma_e - 2n \cdot p_{\max,i}}} - 1 \right), \quad (2)$$

где d_i – внутренний диаметр ствола в i -м сечении; σ_e – предел пропорциональности материала ствола;

n – запас прочности; $p_{\max,i}$ – максимальное давление в i -м сечении.

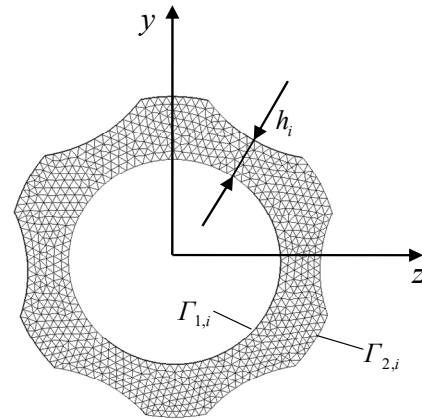


Рис. 4. Триангулированное поперечное сечение ствола

Fig. 4. Triangulated barrel cross-section

Толщина h_i определяется на основе поиска ближайших двух точек, находящихся на внутренней $\Gamma_{1,i}$ и внешней $\Gamma_{2,i}$ границах в заданных сечениях ствола:

$$h_i = \min_{P_{1,i} \in \Gamma_{1,i}, P_{2,i} \in \Gamma_{2,i}} \left(\sqrt{P_{1,i}^2 + P_{2,i}^2} \right), \quad (3)$$

где $P_{1,i} = P_{1,i}(y, z)$ – точка, принадлежащая внутренней границе $\Gamma_{1,i}$ сечения ствола; $P_{2,i} = P_{2,i}(y, z)$ – точка, принадлежащая внешней границе $\Gamma_{2,i}$ сечения ствола.

Математическая модель теплопроводности ствола

Построим квазиодномерную математическую модель теплопроводности ствола не кольцевого сечения. Для этого рассмотрим одномерную радиальную задачу теплопроводности для каждого сечения ствола [11]. Внутренний радиус ствола равен $d/2$ (здесь и ниже индекс i опускаем), в качестве внешнего диаметра запишем осредненное значение $\bar{D} = \sqrt{d^2 + 4F}$, справедливое для кольцевого сечения площадью F .

Запишем дифференциальное уравнение теплопроводности в радиальном направлении для некоторого поперечного сечения ствола:

$$\frac{\partial(c\rho T(r, t))}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r\lambda \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \right), \quad (4)$$

где $T(r, t)$ – значение температуры в точке ствола с координатой r по радиусу в момент времени t ; ρ, c, λ – плотность, удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности материала ствола соответственно.

Начальное условие:

$$T(r, 0) = T_0. \quad (5)$$

В качестве граничных условий рассмотрим конвективный теплообмен по закону Ньютона – Рихмана:

$$\begin{aligned} \lambda \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} \Big|_{r=d/2} + \alpha_r(t)(T_r(t) - T(d/2,t)) &= 0, \\ \lambda \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} \Big|_{r=\bar{D}/2} + \varepsilon_\phi \alpha_b(t)(T(\bar{D}/2,t) - T_b) &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь $T_r(t)$ – температура газов внутри ствола; T_b – температура внешней среды; $\alpha_r(t)$ – значение коэффициента теплообмена от газов ко внутренней поверхности ствола [12, 13]; α_b – значение коэффициента теплообмена с внешней средой; ε_ϕ – коэффициент формы внешней поверхности ствола, примем $\varepsilon_\phi = \Pi/\Pi_3$, где Π – внешний периметр ствола с ребрами жесткости; Π_3 – внешний периметр ствола кольцевого сечения эквивалентной площади.

Результаты моделирования колебательных и температурных характеристики ствола автоматической пушки с ребрами жесткости

Моделирование внутренней баллистики осуществлялось в термодинамической постановке, учитывающей распределение давления и скорости пороховых газов по заснарядному пространству и противодействие воздуха [14].

В промежутках времени между выстрелами решалась задача последействия [15], колебания ствола рассчитывались по квазиодномерной математической модели. Траектория снаряда для оценки влияния колебания ствола на точность стрельбы рассчитывалась по математической модели [16] с учетом колебаний снаряда относительно центра масс [17].

Численные решения задач внутренней и внешней баллистики были получены с помощью явного метода Рунге – Кутты 4-го порядка.

Неявные разностные аппроксимации краевых задач теплопроводности и колебаний ствола осуществлялись интегро-интерполяционным методом, где в результате разностной аппроксимации формируется система линейных алгебраических уравнений, которая решается методом прогонки [18].

На основе исследования сеточной сходимости для достижения точности 0,1 % в евклидовой норме шаг интегрирования для задач внутренней баллистики, теплопроводности и колебаний ствола был выбран $\tau = 1$ мкс, для задачи внешней баллистики $\tau = 100$ мкс.

Рассмотрим 30-мм автоматическую пушку, характеристики материала ствола которой приведены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики материала

Table 1. Material characteristics

Характеристика	Размерность	Значение
Плотность ρ	кг/м ³	7850
Модуль Юнга E	ГПа	200
Коэффициент Пуассона ν	–	0,3
Удельная теплоемкость c	Дж/(кг·К)	567
Коэффициент теплопроводности λ	Вт/(м·К)	32
Коэффициент линейного теплового расширения α	1/К	$12,5 \cdot 10^{-6}$

Моделировался процесс стрельбы с поверхности Земли по неподвижной цели, находящейся на расстоянии 1500 м, угол возвышения орудия 20 градусов, откат артиллерийского орудия не учитывался, в табл. 2 даны основные параметры стрельбы.

Таблица 2. Параметры стрельбы

Table 2. Shooting conditions

Характеристика	Размерность	Значение
Интервал между выстрелами	мс	182
Длина очереди	штук	10
Угол возвышения	градус	20
Расстояние до цели	м	1 500

В табл. 3 приведены внутренние и внешние диаметры ствола в основных сечениях.

Таблица 3. Геометрия ствола 30-мм автоматической пушки

Table 3. Geometry of the barrel of 30 mm automatic cannon

Координата x сечения, мм	Внутренний диаметр, мм	Внешний диаметр, мм
0	40	125
127	40	125
147	30	86
339	30	71
1000	30	45
2400	30	40

На рис. 5 представлена фактическая толщина ствола 30-мм автоматической пушки и минимальная допустимая толщина ствола цилиндрической формы, рассчитанная для эпоры максимального давления штатного выстрела.

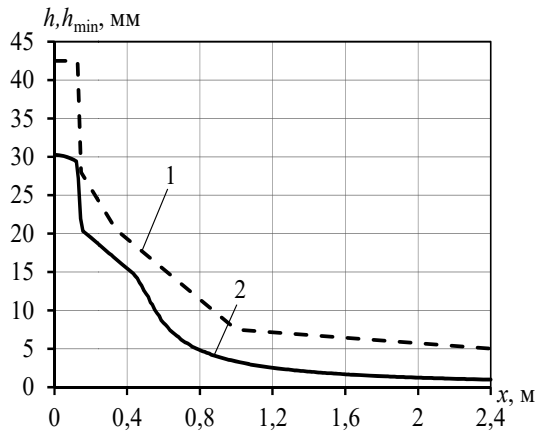


Рис. 5. Толщина ствола цилиндрической формы при выстреле: 1 – фактическая; 2 – минимальная допустимая

Fig. 5. The thickness of the barrel of cylindrical shape when fired: 1 – actual; 2 – minimum allowable

Построим геометрию ствола с 6 ребрами жесткости (рис. 6), с массой, равной массе ствола цилиндрической формы $m = 36$ кг. Внешние диаметры D_i , диаметры вырезов $D_{в,i}$ и расстояния до центра вырезов $H_{в,i}$, $i = 0, N$, были выбраны на основе решения задачи колебаний ствола с ребрами и без ребер жесткости, исходя из минимизации амплитуды колебаний дульного среза.

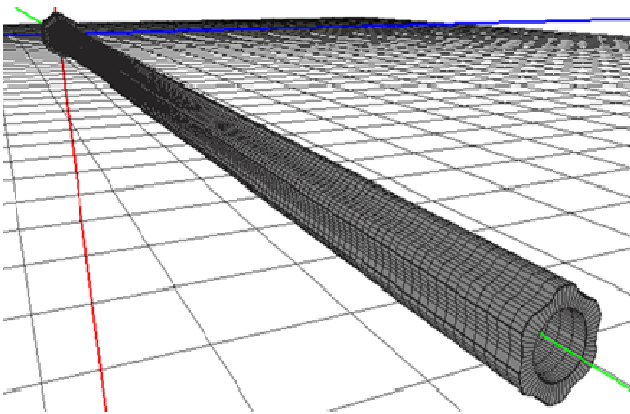


Рис. 6. Ствол с 6 ребрами жесткости

Fig. 6. Barrel with 6 stiffeners

На рис. 7 представлено сравнение вертикальных перемещений $v = v(t)$ дульного среза ствола без ребер жесткости и с ребрами жесткости при стрельбе очередью из 10 выстрелов.

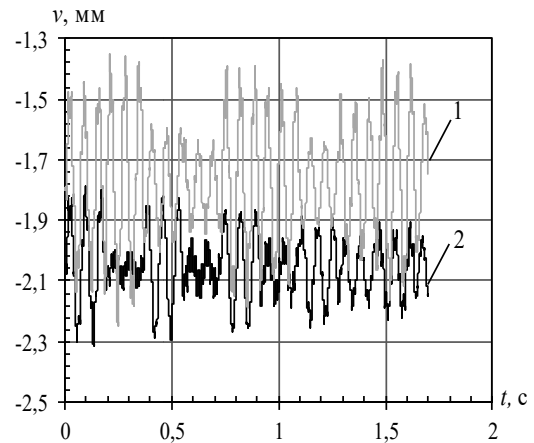


Рис. 7. Сравнение вертикальных перемещений дульного среза: 1 – без ребер жесткости; 2 – с ребрами жесткости

Fig. 7. Comparison of vertical movements of the muzzle: 1 – without stiffeners; 2 – with stiffeners

Как показали расчеты, амплитуда колебаний ствола с ребрами жесткости равна 291 мкм, что на 167 мкм (на 36 %) меньше, чем для ствола без ребер жесткости (см. рис. 7).

На рис. 8 приведено сравнение разброса снарядов при стрельбе по вертикальной мишени на расстоянии 1500 м.

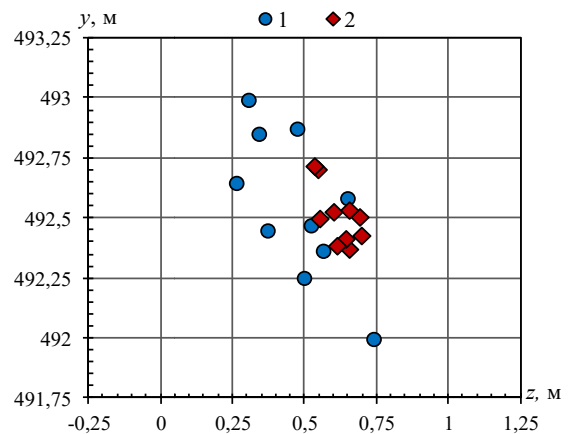


Рис. 8. Разброс снарядов на расстоянии 1 500 м: 1 – без ребер жесткости; 2 – с ребрами жесткости

Fig. 8. The spread of projectiles at a distance of 1,500 m: 1 – without stiffeners; 2 – with stiffeners

Из рис. 8 видно, что с ребрами жесткости кучность стрельбы возрастает, разброс снарядов сокращается на 67 % с 1,102 до 0,367 м.

Проведем верификацию квазиодномерной модели теплопроводности путем сравнения с двумерной моделью в ANSYS для ствола с ребрами жесткости. Смоделируем стрельбу очередью из 10 выстрелов. На рис. 9 представлено сравнение графиков температур на внешней поверхности ствола с ребрами жесткости в точке дульного среза $x = 2,4$ м, полученных из решений квазиодномерной и двумерной задач теплопроводности, при этом для двумерного решения представлено среднее по периметру границы значение.

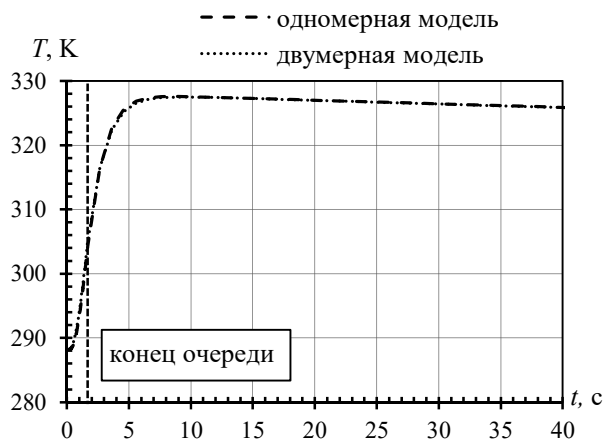


Рис. 9. Сравнение графиков температур на внешней поверхности ствола с ребрами жесткости по квазиодномерной и двумерной моделям

Fig. 9. Comparison of temperature graphs on the outer surface of the barrel with stiffeners by quasi-one-dimensional and two-dimensional models

Сравнение показывает, что средние температуры, полученные в результате решения по квазиодномерной и двумерной моделям, практически совпадают.

На рис. 10 представлена эпюра максимальных температур на внутренней поверхности ствола при стрельбе очередью из 10 выстрелов.

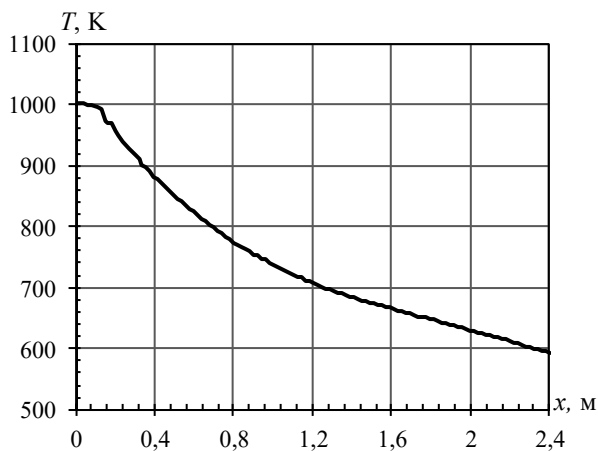


Рис. 10. Эпюра максимальных температур на внутренней поверхности ствола

Fig. 10. Epure of the maximum temperatures on the inner surface of the barrel

Расчетная максимальная температура внутренней поверхности ствола равна 1002K, что хорошо коррелирует с известными данными.

Сравним динамику изменения температуры внутренней поверхности ствола цилиндрической формы и ствола с ребрами жесткости. Соответствующие графики температуры в камере при $x = 0$ м для очереди из 10 выстрелов с последующим охлаждением ствола в периоде последействия, в зависимости от времени представлено на рис. 11.

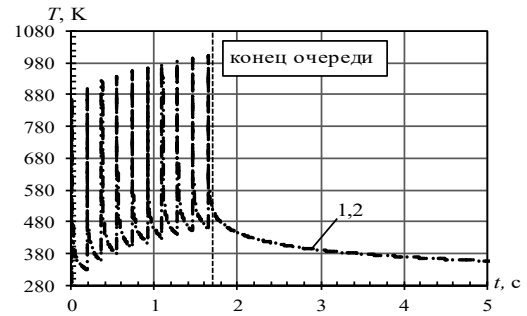


Рис. 11. Температура внутренней поверхности ствола при $x = 0$ для очереди из 10 выстрелов: 1 – без ребер жесткости; 2 – с ребрами жесткости

Fig. 11. The temperature of the inner surface of the barrel at $x = 0$ for burst of 10 shots: 1 – without stiffeners; 2 – with stiffeners

Оказалось, что температура в камере при $x = 0$ м на внутренней поверхности ствола с ребрами жесткости близка к соответствующей температуре ствола без ребер жесткости.

Рассмотрим теперь, как форма ствола влияет на температуру внешней поверхности ствола. Сравнение средних по площади значений температуры на внешней поверхности ствола в зависимости от времени представлено на рис. 12 для очереди из 10 выстрелов и на рис. 13 – для очереди из 100 выстрелов.

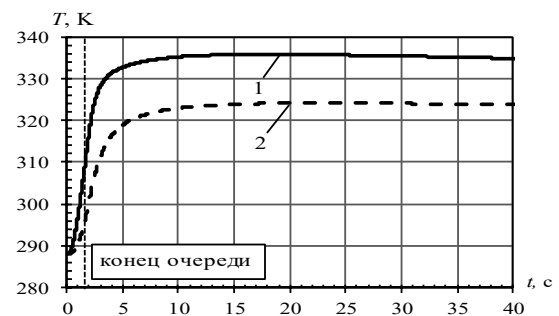


Рис. 12. Изменение средних по площади значений температуры на внешней поверхности ствола для очереди из 10 выстрелов: 1 – без ребер жесткости; 2 – с ребрами жесткости

Fig. 12. Changing the average area temperature values on the outer surface of the barrel for a burst of 10 shots: 1 – without stiffeners; 2 – with stiffeners

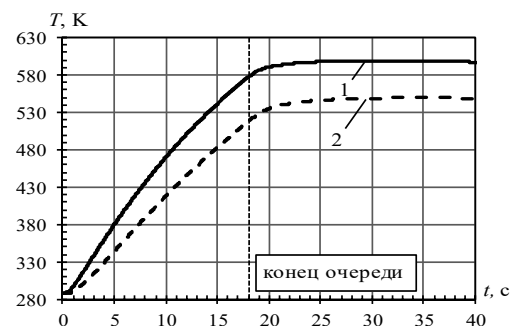


Рис. 13. Изменение средних по площади значений температуры на внешней поверхности ствола для очереди из 100 выстрелов: 1 – без ребер жесткости; 2 – с ребрами жесткости

Fig. 13. Changing the average area temperature values on the outer surface of the barrel for a burst of 100 shots: 1 – without stiffeners; 2 – with stiffeners

Как показывают расчеты, средняя по площади температура внешней поверхности ствола с ребрами жесткости при стрельбе очередью из 10 выстрелов достигает значения 324 К, что на 12 К (на 25 %) ниже, чем для ствола без ребер жесткости. При стрельбе очередью из 100 выстрелов достигает значения 549 К, что на 50 К (на 16 %) ниже, чем для ствола без ребер жесткости.

Заключение

Исследовано влияние ребер жесткости на колебания и охлаждение ствола, а также на кучность стрельбы. Предложен способ уменьшения амплитуды колебаний и температуры ствола за счет изменения его формы.

Разработана квазиодномерная математическая модель теплопроводности ствола, учитывающая форму внешней поверхности ствола через коэффициент формы. Сравнение с двумерной моделью показало хорошее совпадение средних по периметру значений температуры на внешней поверхности ствола.

Рассмотрен ствол с 6 ребрами жесткости, удовлетворяющий условиям прочности, масса которого равна массе ствола цилиндрической формы. Смоделирована стрельба очередью из 10 выстрелов из ствола цилиндрической формы и с ребрами жесткости. Показано, что изменение формы ствола приводит к сокращению амплитуды колебаний ствола на 36 %. Разброс снарядов при стрельбе по вертикальной мишени сокращается на 67 %. Температура внешней поверхности ствола с ребрами жесткости при стрельбе очередью из 10 выстрелов на 25 % ниже, чем для ствола без ребер жесткости, а при стрельбе очередью из 100 выстрелов – на 16 % ниже.

Из полученных результатов следует, что форма ствола существенно влияет на колебания ствола, разброс снарядов и температурный режим ствола.

Библиографические ссылки

1. Feng GT., Zhou KD., Zhang YQ., He L., Li JS., Wang J. The Study of Gun Barrel's Two-Dimensional Nonlinear Thermal Conduction // *Int J Thermophys.* 2019. 40(37) DOI: 10.1007/s10765-019-2502-8.
2. Sopok S., Rickard C., Dunn S. Thermal-chemical-mechanical gun bore erosion of an advanced artillery system part one: theories and mechanisms // *Wear.* vol. 258. Issues 1–4. 2005. p 659-670. DOI: 10.1016/j.wear.2004.09.031.
3. Mishra A., Hameed A., Lawton B. A Novel Scheme for Computing Gun Barrel Temperature History and Its Experimental Validation // *ASME. J. Pressure Vessel Technol.* 2010. 132(6): 061202. DOI: 10.1115/1.4001740.
4. Zieliński M., Koniorczyk P., Surma Z., Zmywaczyk J., Preiskorn M. Numerical Study of Heat Transfer in a Gun Barrel Made of Selected Steels // *Energies.* 2022. 15(5):1868. DOI: 10.3390/en15051868.
5. Koniorczyk P., Zmywaczyk J., Debski A., Zielinski M., Preiskorn M., Sienkiewicz J. Investigation of Thermophysical Properties of Three Barrel Steels // *Metals.* 2020. 10, 573. DOI: 10.3390/met10050573.
6. Пушкарев А. М., Вольф И. Г., Ихтисанов И. И. Исследование теплового состояния стволов оружия и влияния его на начальную скорость снаряда // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки.* 2020. № 11. С. 26–31.
7. Русяк И. Г., Суфиянов В. Г., Клюкин Д. А. Одномерная математическая модель колебаний ствола с попереч-

ным сечением произвольной формы // *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика.* 2022. № 80. С. 133–146. DOI: 10.17223/19988621/80/12.

8. UT30MK2 & MT30. Unmanned and Manned Turrets // Elbit Systems Ltd. URL: https://elbitsystems.com/media/UTMT-30-6pgs_3_PRINT.pdf (дата обращения 06.07.2023 г.).

9. Mk44 Bushmaster II // *Wikipedia.* URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Mk44_Bushmaster_II (дата обращения 06.07.2023).

10. Орлов Б. В., Ларман Э. К., Маликов В. Г. Устройство и проектирование стволов артиллерийских орудий. М. : Машиностроение, 1976. 432 с.

11. Клюкин Д. А. Математическое моделирование теплового нагружения ствола артиллерийского орудия при выстреле // *Выставка инноваций – 2022 (весенняя сессия): Сборник материалов XXXIII Республиканской выставки-сессии студенческих инновационных проектов.* Ижевск. 29 апреля 2022 года. Ижевск: Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова. 2022. С. 176–182. DOI: 10.22213/ie022124.

12. Самарский А. А., Вабищевич П. Н. Вычислительная теплопередача. М. : Едиториал УРСС, 2002. 784 с.

13. Михеев М. А., Михеева И. М., Основы теплопередачи. Изд. 2-е, стереотип. М. : Энергия, 1977. 344 с.

14. Русяк И. Г., Тенев В. А. Моделирование баллистики артиллерийского выстрела с учетом пространственного распределения параметров и противодействия // *Компьютерные исследования и моделирование.* 2020. С. 1123–1147. DOI: 10.20537/2076-7633-2020-12-5-1123-1147.

15. Липанов А. М., Русяк И. Г., Суфиянов В. Г. Исследование влияния колебаний ствола на угол вылета снаряда при выстреле // *Вестник Томского государственного университета : математика и механика.* 2020. С. 80–94. DOI: 10.17223/19988621/68/8.

16. Дмитриевский А. А., Лысенко Л. Н. Внешняя баллистика : монография. М. : Машиностроение, 2005. 608 с.

17. Королев С. А., Липанов А. М., Русяк И. Г. К вопросу о точности решения прямой задачи внешней баллистики // *Вестник Томского государственного университета : математика и механика.* 2017. № 47. С. 63–74.

18. Самарский А. А., Гулин А. В. Численные методы. М. : Наука, 1989. 432 с.

References

1. Feng GT., Zhou KD., Zhang YQ., He L., Li JS., Wang J. The Study of Gun Barrel's Two-Dimensional Nonlinear Thermal Conduction // *Int J Thermophys.* 2019. 40(37) DOI: 10.1007/s10765-019-2502-8.
2. Sopok S., Rickard C., Dunn S. Thermal-chemical-mechanical gun bore erosion of an advanced artillery system part one: theories and mechanisms // *Wear.* vol. 258. Issues 1–4. 2005. pp 659-670. DOI: 10.1016/j.wear.2004.09.031.
3. Mishra A., Hameed A., Lawton B. A Novel Scheme for Computing Gun Barrel Temperature History and Its Experimental Validation // *ASME. J. Pressure Vessel Technol.* 2010. 132(6): 061202. DOI: 10.1115/1.4001740.
4. Zieliński M., Koniorczyk P., Surma Z., Zmywaczyk J., Preiskorn M. Numerical Study of Heat Transfer in a Gun Barrel Made of Selected Steels // *Energies.* 2022. 15(5):1868. DOI: 10.3390/en15051868.
5. Koniorczyk P., Zmywaczyk J., Debski A., Zielinski M., Preiskorn M., Sienkiewicz J. Investigation of Thermophysical Properties of Three Barrel Steels // *Metals.* 2020. 10, 573. DOI: 10.3390/met10050573.
6. Pushkarev A.M., Vol'f I.G., Ihtisanov I.I. [Investigation of the thermal state of weapon barrels and its effect on the initial velocity of the projectile]. *Izvestiya Tul'skogo gos-*

darstvennogo universiteta. *Tekhnicheskie nauki*. 2020. No. 11. Pp. 26-31. (in Russ.).

7. Rusyak I.G., Sufiyarov V.G., Klyukin D.A. [One-dimensional mathematical model of barrel vibrations with a cross-section of arbitrary shape]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika*. 2022. No. 80. Pp. 133-146. DOI: 10.17223/19988621/80/12 (in Russ.).

8. UT30MK2 & MT30. Unmanned and Manned Turrets // Elbit Systems Ltd. Available at: https://elbitsystems.com/media/UTMT-30-6pgs_3_PRINT.pdf (date of application 06.07.2023).

9. Mk44 Bushmaster II // Wikipedia. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Mk44_Bushmaster_II (date of application 06.07.2023).

10. Orlov B.V., Larman E.K., Malikov V.G. *Ustrojstvo i proektirovanie stvolov artillerijskih orudij* [Construction and design of artillery barrels]. Moscow: Mashinostroenie Publ. 1976. 432 p. (in Russ.).

11. Klyukin D.A. *Matematicheskoe modelirovanie teplovo nagruzheniya stvola artillerijskogo orudiya pri vystrele* [Mathematical modeling of the thermal loading of the barrel of an artillery piece when fired]. *Vystavka innovacij - 2022 (vesennaya sessiya): Sbornik materialov XXXIII Respublikanskoj vystavki-sessii studencheskij innovacionnyh proektov*. Izhevsk. 29 aprelya 2022 goda. Izhevsk: Izhevskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitetimeni M.T. Kalashnikova. 2022. Pp. 176-182. DOI: 10.22213/ie022124 (in Russ.).

12. Samarskij A.A., Vabishchevich P.N. *Vychislitel'naya teploperedacha* [Computational heat transfer]. Moscow: Editorial URSS. 2002. 784 p. (in Russ.).

13. Miheev M.A., Miheeva I. M. *Osnovy teploperedachi* [Basics of heat transfer]. Izd. 2-e, stereotip. Moscow: Energiya Publ. 1977. 344 p. (in Russ.).

14. Rusyak I.G., Tenenev V.A. *Modelirovanie ballistiki artillerijskogo vystrela s uchetom prostranstvennogo raspredeleniya parametrov i protivodavleniya* [Modeling the ballistics of an artillery shot taking into account the spatial distribution of parameters and back pressure]. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie*. 2020. Pp. 1123-1147. DOI: 10.20537/2076-7633-2020-12-5-1123-1147 (in Russ.).

15. Lipanov A.M., Rusyak I.G., Sufiyarov V.G. *Issledovanie vliyaniya kolebanij stvola na ugol vyleta snaryada pri vystrele* [Investigation of the effect of barrel vibrations on the angle of projectile departure when fired]. *Vestn. Tomsk. gos. un-ta.: Matem. imekh.* 2020. Pp. 80-94. DOI: 10.17223/19988621/68/8.

16. Dmitrievskij A.A., Lysenko L.N. *Vneshnyaya ballistika: monografiya* [External ballistics: a monograph]. Moscow: Mashinostroenie Publ. 2005. 608 p. (in Russ.).

17. Korolev S. A., Lipanov A. M., Rusyak I. G. *K voprosu o tochnosti resheniya pryamoj zadachi vneshnej ballistiki* [On the question of the accuracy of solving the direct problem of external ballistics]. *Vestnik Tom. gos. un-ta. Matematikaimekhanika*. 2017. No. 47. Pp. 63-74 (in Russ.).

18. Samarskij A.A., Gulin A.V. *CHislennye metody* [Numerical methods]. Moscow: Nauka Publ., 1989. 432 p. (in Russ.).

* * *

Investigation of Automatic Cannon Barrel Shape Impact on Oscillatory and Temperature characteristics

I. G. Rusyak, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia
V. G. Sufiyarov, DSc in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia
D. A. Kljukin, Post-graduate, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

The paper studies the effect of stiffeners in cross-section on the vibrations, barrel cooling, and firing accuracy. A quasi-one-dimensional mathematical model of barrel thermal conductivity is presented, taking into account the shape of the outer surface by the shape coefficient calculated on the basis of the perimeter of the barrel outer surface with stiffeners. When modeling the firing of a burst from a 30-mm cannon, the problem of internal ballistics was solved in a thermodynamic formulation, taking into account the distribution of the parameters of the gas-powder mixture along the length of the barrel and back pressure; in the time intervals between shots, the problem of gas outflow from the barrel was solved. Longitudinal-transverse vibrations of the barrel were calculated using a quasi-one-dimensional mathematical model. Boundary-value problems were solved using the integral-interpolation method. Cauchy problems were solved by the Runge-Kutta method. The permissible thickness of the barrel when fired is calculated. The results of modeling for a barrel with stiffeners are presented. It is shown that the amplitude of vibrations of a barrel with stiffeners is 36% less than the amplitude of vibrations of a cylindrical barrel. The spread of points of destruction when shooting at a vertical target at a distance of 1.5 km is reduced by 67%. The temperature of the outer surface of the barrel for each of 10 shots is reduced by 25% and when firing a burst of 100 shots it is reduced by 16%.

Keywords: optimization, barrel vibrations, thermal conductivity; automatic cannon, ballistics, numerical methods.

Получено: 02.08.23

Образец цитирования

Русьяк И. Г., Суфиянов В. Г., Клюкин Д. А. Исследование влияния формы ствола автоматической пушки на его колебательные и температурные характеристики // Интеллектуальные системы в производстве. 2023. Т. 21, № 4. С. 81–87. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-4-81-87.

For Citation

Rusyak I.G., Sufiyarov V.G., Kljukin D.A. [Investigation of Automatic Cannon Barrel Shape Impact on Oscillatory and Temperature characteristics]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2023, vol. 21, no. 4, pp. 81-87. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-4-81-87.