

УДК 004.942:623.526.4

DOI: 10.22213/2410-9304-2025-1-73-81

Компьютерное моделирование и структурно-параметрическая оптимизация ствола артиллерийского орудия с кольцевым поперечным сечением*

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

В статье представлены результаты моделирования продольно-поперечных колебаний ствола артиллерийского орудия с кольцевым поперечным сечением при нагружении внутренним давлением и тепловым воздействием пороховых газов. Форма ствола учитывалась за счет моментов инерции поперечных сечений ствола и внутренних сил. Разработан алгоритм структурно-параметрической оптимизации геометрической формы ствола. В качестве управляемых переменных выбраны: внешние диаметры ствола, диаметры вырезов и расстояния от центра поперечного сечения до центра выреза в ключевых поперечных сечениях. Целевой функцией оптимизационной задачи выбрана амплитуда колебаний, полученная на основе математического моделирования процесса стрельбы очередью. Ограничениями задачи оптимизации являлись: масса и прочность ствола, связанная с толщиной стенки согласно теории наибольших деформаций. Разработан программный комплекс моделирования колебаний и оптимизации формы ствола. С помощью технологии OpenGL была реализована трехмерная визуализация выстрела. По результатам моделирования классического ствола определена амплитуда колебаний, которая составила 915,6 мкм. Показано, что разница амплитуд с учетом и без теплопроводности составляет менее 11 %, что является незначительным при оценке колебаний. Изменение формы ствола без оптимизации его геометрических размеров позволяет уменьшить амплитуду колебаний на 9,7 %. Оптимизация классического ствола позволила сократить амплитуду колебаний на 72,2 % с 915,6 до 254,4 мкм. Ребра жесткости 1-го типа сокращают амплитуду на 73,5 % до 242,1 мкм, 2-го типа – на 73,6 % до 241,6 мкм. Наибольший эффект достигается для ствола с 3 ребрами жесткости 2-го типа.

Ключевые слова: компьютерная модель, колебания ствола, напряженно-деформированное состояние, структурно-параметрическая оптимизация, программно-вычислительный комплекс.

Введение

Амплитуда колебаний, достигаемая у дульного среза, непосредственно влияет на углы вылета снарядов и точность стрельбы. Это особенно актуально для автоматических пушек, которые работают с высокой скорострельностью. Амплитуда колебаний зависят от множества факторов [1, 2]: длины, толщины и геометрии ствола, параметров материала, давления газов, темпа стрельбы и т. д.

Одним из ключевых аспектов повышения эффективности стрельбы является оптимизация конструкции стволов. Однако увеличение толщины стенок стволов для достижения этой цели может вступать в противоречие с техническими и экономическими требованиями. В связи с этим возникает необходимость найти баланс между снижением веса, повышением огневой мощи и обеспечением жесткости конструкции. Проблему можно разделить на две части: улучшение теплового рассеивания и увеличение жесткости ствола для поддержания точности без увеличения его веса.

Изменение геометрии ствола, как показано в исследовании [3], может существенно снизить амплитуду колебаний и повысить точность

стрельбы. В [4] показано, что на расстоянии 1500 м разброс снарядов вследствие колебаний равен 1,102 м, каждые 100 мкм амплитуды колебаний дульного среза приводят к увеличению разброса на 0,12 м. Определение оптимальной формы ствола требует значительных компьютерных ресурсов и времени. Для оценки амплитуды колебаний ствола заданной формы необходимо решать множество задач: определение параметров внутрибаллистических процессов [5], тепловых процессов в стволе [6] и напряженно-деформированного состояния ствола с учетом различных факторов [7–9].

Необходимость решения широкого круга трудоемких задач, направленных на оптимизацию формы ствола, требует разработки единого программного комплекса. Важным аспектом при разработке программного комплекса является точность и достоверность результатов, которая достигается путем верификации, подтверждающей корректность расчетов [10].

Цель исследования – разработать квазиодномерную компьютерную модель колебаний ствола, алгоритм структурно-параметрической оптимизации формы ствола и программный комплекс математического моделирования.

Квазиодномерная компьютерная модель колебаний ствола

Воспользуемся уравнением баланса сил для компьютерной модели колебаний ствола. Ствол представлен в виде трубы переменного сечения с длиной L , площадью канала ствола $S(x)$ и площадью поперечного сечения $F(x)$. На каждый элемент ствола действуют следующие силы: сила инерции, обусловленная ускорением элемента ствола и массой данного элемента; внутренние силы за счет напряжений в материале ствола при его деформации; внешние силы, включающие силу давления внутри ствола и силу взаимодействия снаряда со стволом [11]:

$$\rho F \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\rho F g \sin \varphi - q_1 + \frac{\partial}{\partial x} (F \sigma^{xx}) - p_1 \frac{\partial S}{\partial x}, \quad (1)$$

где $u(x, t)$ – величина продольных колебаний ствола; ρ – плотность материала ствола; $F = F(x)$ – площадь поперечного сечения ствола; $S = S(x)$ – площадь канала ствола; g – ускорение силы тяжести; φ – угол возвышения ствола; $q_1 = q_1(x, t)$ – распределенные внешние силы, действующие в продольном направлении; $p_1 = p_1(x, t)$ – распределение избыточного давления внутри ствола; $\sigma^{xx} = \sigma^{xx}(x, t)$ – величина продольных напряжений

$$\sigma^{xx} = E \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\nu}{F} \int_F (\sigma^{yy} + \sigma^{zz}) df - \frac{\alpha E}{F} \int_F T(x, r, t) df, \quad (2)$$

где E – Модуль Юнга; ν – коэффициент Пуассона; α – коэффициент линейного теплового расширения; $T(x, r, t)$ – температура ствола, определяемая из квазиодномерной математической модели [12].

Второе слагаемое в соотношении (2) определяется на основе решения задачи Ламе [13]:

$$\frac{1}{F} \int_F (\sigma^{yy} + \sigma^{zz}) df = 2p_1 \frac{r_1^2}{r_2^2 - r_1^2}, \quad (3)$$

где r_1 , r_2 – переменные внутренний и внешний радиусы ствола соответственно.

В случае ствола неколеблющегося сечения используется следующая формула:

$$\frac{1}{F} \int_F (\sigma^{yy} + \sigma^{zz}) df = 2p_1 \frac{r_1^2}{(F + S)/\pi - r_1^2}. \quad (4)$$

Уравнение (1) решается с учетом следующих начальных условий:

$$u(x, 0) = u_0(x), \quad \left. \frac{\partial u}{\partial t} \right|_{t=0} = 0, \quad (5)$$

где $u_0(x)$ – первоначальное смещение ствола в продольном направлении, полученное из решения стационарной задачи о деформации ствола под влиянием силы тяжести.

На границе казенного среза считаем, что ствол закреплен и продольные смещения равны нулю:

$$u(0, t) = u_0(0), \quad (6)$$

на дульном срезе отсутствуют внешние силы, действующие на ствол:

$$FE \left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x=L} = 0. \quad (7)$$

Уравнение поперечных колебаний ствола в вертикальной плоскости Oxy имеет вид:

$$\begin{aligned} \rho F \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = & -\rho F g \cos \phi - q_2 + \\ & + (F \sigma^{xx} + p_1 S) \frac{\partial^2 (v + v_{00})}{\partial x^2} + \\ & + \nu \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\int_F (\sigma^{yy} + \sigma^{zz}) y df \right) - \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EJ_z \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right) - \\ & - \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\alpha E \int_F T(x, r, t) y df \right), \end{aligned} \quad (8)$$

с начальными условиями:

$$v(x, 0) = v_0(x), \quad \left. \frac{\partial v}{\partial t} \right|_{t=0} = 0 \quad (9)$$

и граничными условиями:

$$v(0, t) = v_0(0), \quad \left. \frac{\partial v}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad (10)$$

$$EJ_z \left. \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right|_{x=L} = 0, \quad \left. \frac{\partial}{\partial x} \left(EJ_z \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right) \right|_{x=L} = 0,$$

где $v = v(x, t)$ – величина поперечных колебаний в вертикальной плоскости; $v_0 = v_0(x)$ – величина начального прогиба в вертикальной плоскости; $q_2 = q_2(x, t)$ – распределенные внешние силы, действующие по оси Oy ; $v_{00} = v_{00}(x)$ – технологическое смещение центра канала ствола относительно оси Oy ; $J_z = J_z(x)$ – момент инерции сечения относительно оси Oz .

Разностная аппроксимация дифференциальных уравнений в частных производных проводилась численно [14]. Уравнения колебаний были проинтегрированы по пространственной $[x_{i-1/2}, x_{i+1/2}]$ и временной области $[t_n, t_{n+1}]$, уравнение продольных колебаний:

$$\int_{t_n}^{t_{n+1}} \int_{x_{i-1/2}}^{x_{i+1/2}} \left(\rho F \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{\partial}{\partial x} \left(FE \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \rho F g \sin \varphi + q_1 - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{2Fv p_1 r_1^2}{(F+S)/\pi - r_1^2} - \alpha_T E \int_F T_c(x, r, t) df \right) + p_1 \frac{\partial S}{\partial x} \right) dx dt = 0, \quad (11)$$

поперечных колебаний:

$$\int_{t_n}^{t_{n+1}} \int_{x_{i-1/2}}^{x_{i+1/2}} \left(\rho F \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EJ_z \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial x^2} \right) - M \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial x^2} + F_y(x, t) \right) dx dt = 0, \quad (12)$$

$$F_y(x, t) = \rho F g \cos \varphi + q_2 - \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\alpha E \int_F T(x, r, t) y df \right),$$

$$M = M(x, t) = \left(FE \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{2Fv p_1 r_1^2}{(F+S)/\pi - r_1^2} + p_1 S \right),$$

численное интегрирование осуществлялось методом трапеции.

Преимуществом данного подхода является возможность построить разностную схему для моделей с негладкими и разрывными коэффициентами.

Постановка задачи оптимизации формы ствола

В работе рассматриваются три формы стволов: классический с кольцевым сечением и два типа с ребрами жесткости. Поперечное сечение классического образовано двумя окружностями с общим центром. Канал ствола всех типов стволов считаем круглой формы. Оптимизация классического ствола проводится за счет изменения вектора $\mathbf{x} = (D_0, D_1, \dots, D_N)$ внешних диаметров в $N+1$ сечениях, как показано на рис. 1.

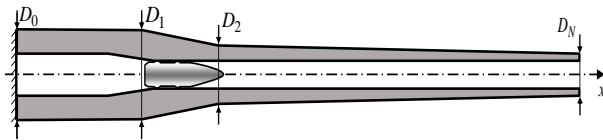


Рис. 1. Продольное сечение ствола с обозначением внешних диаметров на ключевых участках ствола

Fig. 1. The longitudinal section of the trunk with the designation of external diameters in key sections of the trunk

При оптимизации стволов ребрами жесткости вводятся дополнительные переменные: диаметр окружности, удаляемой или добавляемой на i -м поперечном сечении ($D_{b,i}$), и расстояние от центра канала ствола до центра этой окружности ($H_{b,i}$), как показано на рис. 2. В результате, наш вектор оптимизируемых переменных будет представлен в виде

$$\mathbf{x} = (D_0, D_1, \dots, D_N, D_{b,0}, D_{b,1}, \dots, D_{b,N}, H_{b,0}, H_{b,1}, \dots, H_{b,N}).$$

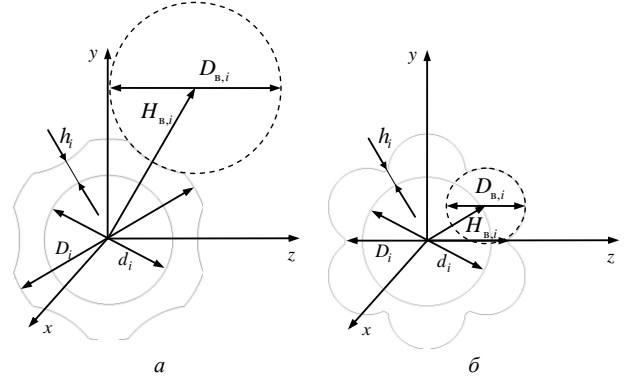


Рис. 2. Определение управляемых переменных для ствола с ребрами жесткости: а – 1-го типа; б – 2-го типа

Fig. 2. Definition of controlled variables for a barrel with stiffeners: a) type 1; б) type 2

Система ограничений Γ для задачи оптимизации формы ствола учитывает массу и прочность ствола согласно теории наибольших деформаций:

$$\begin{cases} h_i \geq h_{\min,i}, & i = \overline{0, N}, \\ m \leq m_{\max}, \end{cases} \quad (13)$$

$$h_{\min,i} = \frac{D_{\min,i} - d_i}{2}, \quad D_{\min,i} = d_i \sqrt{\frac{1,5\sigma_e + k_i \cdot p_{\max,i}}{1,5\sigma_e - 2k_i \cdot p_{\max,i}}}, \quad i = \overline{0, N}, \quad (14)$$

где h_i – толщина ствола в i -м сечении; m_{\max} – допустимая масса ствола; d_i – внутренний диаметр в i -м сечении камеры или ствола; $p_{\max,i}$ – максимальное давление в i -м сечении; σ_e – предел пропорциональности материала ствола; k_i – запас прочности в i -м сечении.

Сформулируем критерий оптимизации. Полагая, что разброс снарядов в среднем снижается с уменьшением амплитуды колебаний дульного среза ствола, в качестве целевой функции оптимизации рассмотрим функцию вида:

$$A = f(\mathbf{x}) = \max_t \left(\sqrt{(v_d(t, \mathbf{x}) - v_0(\mathbf{x}))^2 + (w_d(t, \mathbf{x}) - w_0(\mathbf{x}))^2} \right) \rightarrow \min, \quad (15)$$

где $v_d(t, \mathbf{x})$, $w_d(t, \mathbf{x})$ – перемещения дульного среза в плоскостях Oxy и Oxz соответственно для рассматриваемого вектора \mathbf{x} ; $v_0(\mathbf{x})$, $w_0(\mathbf{x})$ – начальное положение дульного среза в плоскостях Oxy и Oxz соответственно для рассматриваемого вектора \mathbf{x} .

Поиск минимума проводился с помощью метода Нелдера – Мида [15], в основе которого лежит построение n -мерного симплекса с $n + 1$ вершиной.

В каждой вершине симплекса определяется численное решение задачи колебаний ствола (11), (12) и рассчитывается значение целевой функции (15), далее по результатам сравнения значений функции в вершинах происходит одна из операций: растяжение, сжатие, отражение или редукция (глобальное сжатие) симплекса.

Для учета ограничений применяется метод штрафных функций:

$$\begin{cases} f = f(\mathbf{x}), & \mathbf{x} \in G, \\ f = f(\mathbf{x}) + F_{\text{ш}}, & \mathbf{x} \notin G, \end{cases} \quad (16)$$

где $F_{\text{ш}}$ – штрафная функция, принимающая достаточно большое значение, которое позволяет исключить выход вектора управляемых параметров за область ограничений G . В работе значение штрафной функции принималось равным $F_{\text{ш}} = 1000000$.

Создание программно-вычислительного комплекса компьютерного моделирования колебаний ствола при выстреле

Для разработки был выбран язык программирования C# и среда разработки MS Visual Studio. Для обеспечения обмена данными между компонентами комплекса был принят формат JSON.

Графическое отображение результатов проводится с использованием библиотеки ScottPlot, что позволяет создавать интерактивные графики с минимальными затратами времени на разработку.

Визуализация трехмерных моделей объектов, а также динамическое отображение колебаний и траектории движения снаряда осуществляется с помощью библиотеки SharpGL, поддерживающей технологии OpenGL.

Это позволяет добиться интерактивности и реалистичности при представлении исследуемых процессов, на рис. 3 представлено главное окно.

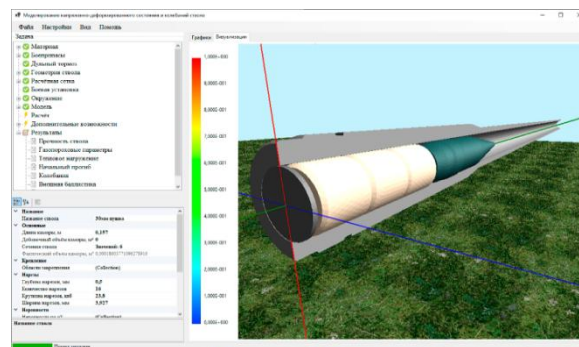


Рис. 3. Главное окно программно-вычислительного комплекса

Fig. 3. The main window of the software and computing complex

Программно-вычислительный комплекс предоставляет пользователям возможность задавать физико-геометрические параметры пороха, характеристики снаряда, а также свойства материала и геометрию ствола. В рамках данного комплекса реализованы методы математического моделирования, охватывающие внутреннюю и внешнюю баллистику, радиальные и продольно-поперечные колебания, при этом учитываются температурные эффекты, технологические неровности ствола и наличие ребер жесткости. Программный комплекс способен моделировать как одиночные выстрелы, так и стрельбу очередями с учетом вариаций в массе пороха и снаряда, временных интервалов между выстрелами и скорости горения пороха.

Результаты моделирования колебаний ствола

Расчет внутренней баллистики 30-мм пушки с учетом эффекта последействия выполняется на основе модели, предполагающей одномерное распределение параметров газов [16]. Длительность процесса выстрела составляет 4 мс, после чего моделируется истечение газов из канала ствола [17]. В рамках исследования была рассмотрена очередь из 10 выстрелов с интервалом в 182 мс. Зафиксированное максимальное давление равно 344 МПа.

Задача напряженно-деформированного состояния и динамических колебаний, была решена для ствола, изготовленного из оружейной стали. Свойства стали включают в себя: модуль Юнга $E = 200$ ГПа; коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$; плотность $\rho = 7850$ кг/м³; удельную теплопроводность $\lambda = 32$ Вт/(м·К); удельную теплоемкость $c = 567$ Дж/(кг·К); коэффициент линейного теплового расширения $\alpha = 12,5 \cdot 10^{-6}$ 1/К.

Шаг интегрирования выбирался из условия достижения точности 1 % по амплитуде колебаний. По времени шаг составил $\tau = 20$ мкс, по пространству $N = 150$ узлов. Выбранные значения шагов обеспечили время вычислений не более 3 минут на 1 расчет, что позволяет проводить дальнейшую оптимизацию ствола.

Динамика вертикальных колебаний дульного среза ствола с учетом движения снаряда и влияния теплового нагружения при выстреле представлена на рис. 4.

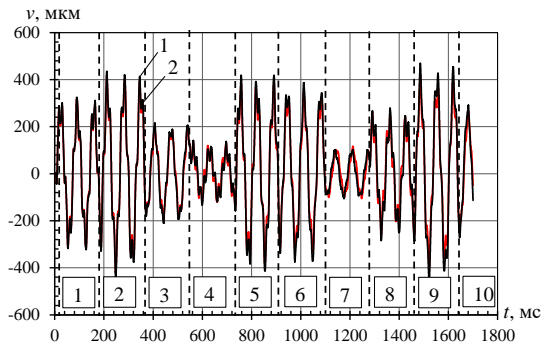


Рис. 4. Сравнение динамики колебаний дульного среза по оси Oy при длинной очереди из 10 выстрелов: 1 – без учета теплового нагружения; 2 – с учетом теплового нагружения

Fig. 4. Comparison of the dynamics of muzzle vibrations along the Oy axis with a long queue of 10 shots: 1 – without taking into account thermal loading; 2 – taking into account thermal loading

Разница амплитуды с учетом и без теплопроводности (см. рис. 4) составляет менее 11 %, что можно считать незначительным отклонением при оценке величины колебаний.

Изучим возможность снижения амплитуды колебаний дульного среза путем модификации формы поперечного сечения ствола с помощью ребер жесткости, как показано на рис. 5.

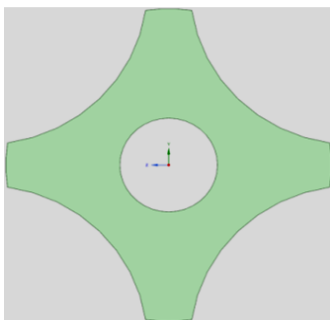


Рис. 5. Поперечное сечение ствола с 4 ребрами жесткости

Fig. 5. Cross section of the barrel with 4 stiffeners

На рис. 6 представлено сравнение колебаний дульного среза классического ствола и ствола с 4 ребрами жесткости. Масса обоих стволов одинакова и составляет 36 кг.

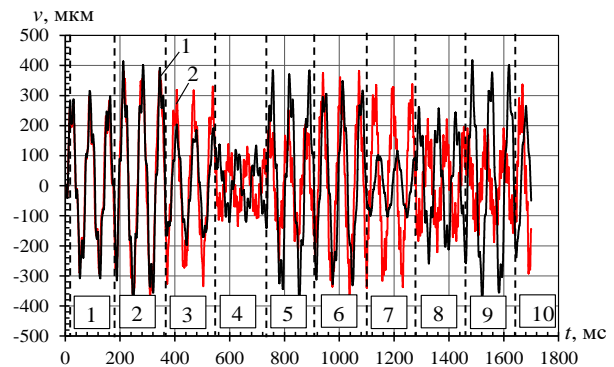


Рис. 6. Сравнение динамики колебаний дульного среза по оси Oy при короткой очереди из 10 выстрелов для стволов: 1 – кольцевого поперечного сечения; 2 – с 4 ребрами жесткости

Fig. 6. Comparison of the dynamics of muzzle vibrations along the Oy axis with a short burst of 10 shots for barrels: 1 – annular cross-section; 2 – 4 stiffeners

Согласно данным, представленным на рис. 6, использование не кольцевого поперечного сечения приводит к изменениям в фазе и частоте колебаний, при этом амплитуда колебаний уменьшается на 9,7 %. Однако это снижение не имеет систематического характера и наблюдается лишь в определенные моменты времени. В рамках данного исследования ставится задача выбора геометрии, которая могла бы обеспечить стабильное снижение амплитуды колебаний на протяжении всего процесса стрельбы.

Результаты оптимизации

Во избежание утяжеления ствола установим максимально допустимую массу на уровне массы классического ствола $m_0 = m_{\max} = 36$ кг. Используя метод деформируемого многогранника, определяется оптимальное значение x .

Оптимизация проводилась на компьютере с процессором Intel Core I7-4770K, среднее время выполнения 1 итерации для классического ствола составило 43,2 с, общее время поиска оптимальной геометрии классического ствола 21 600 с.

Время выполнения 1 итерации для ствола с ребрами жесткости составило 160 с, общее время поиска составило 80 000 с. График сходимости амплитуды колебаний дульного среза в зависимости от итерации для различных форм ствола представлен на рис. 7.

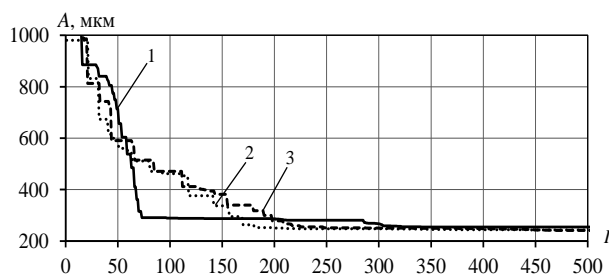


Рис. 7. Сходимость алгоритма оптимизации амплитуды колебаний ствола: 1 – классический; 2 – с ребрами жесткости 1-го типа; 3 – с ребрами жесткости 2-го типа

Fig. 7. Convergence of the barrel oscillation optimization algorithm: 1 – the classic; 2 – 1st type stiffeners; 3 – 2nd type stiffeners

Из рис. 7 видно, что для классического ствола область оптимального решения определяется за 70 итераций, далее на 330-й итерации решение перестает изменяться и фиксируется на 254,4 мкм, полученная и исходная геометрии представлены на рис. 8. Для стволов с ребрами жесткости график сходимости имеет более плавный вид и поиск области оптимального решения занимает 230 итераций. Амплитуда колебаний устанавливается на 242,1 и 241,6 мкм для ствола с ребрами жесткости 1-го и 2-го типа соответственно.

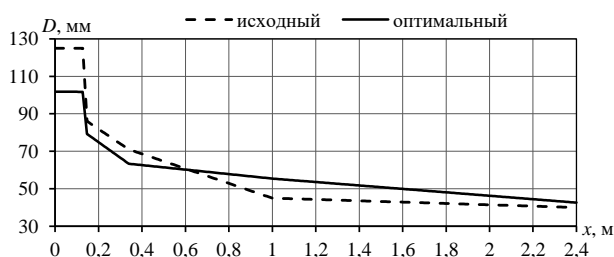


Рис. 8. Результаты оптимизации геометрических параметров классического ствола

Fig. 8. The results of optimization of the geometric parameters of the classical barrel

Из рис. 8 видно, что у оптимизированного классического ствола диаметр камеры на 23 мм меньше, чем у исходного ствола, тогда как диаметр в средней части и у дульного среза, наоборот, больше на 2,5–10 мм.

На рис. 9 представлено сравнение колебаний дульного среза исходного ствола и после оптимизации геометрии.

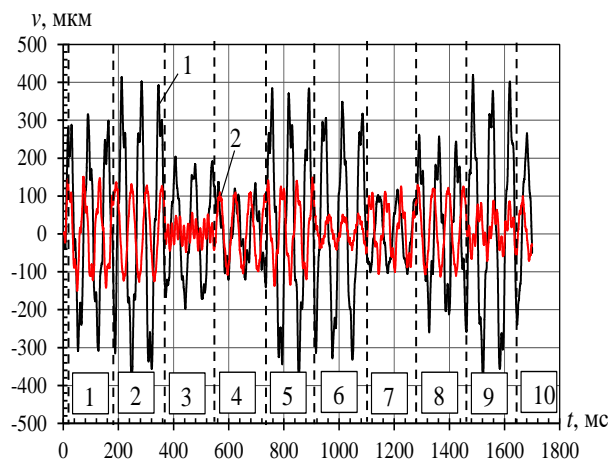


Рис. 9. Сравнение колебаний дульного среза по оси Oy: 1 – исходного ствола; 2 – оптимизированного

Fig. 9. Comparison of muzzle vibrations along the Oy axis: 1 – the original barrel; 2 – optimized

Из рис. 9 видно, что амплитуда оптимального ствола на 72,2 % меньше, чем у исходного.

В таблице приведены результаты оптимизации параметров колебаний, полученные путем добавления ребер жесткости.

Результаты оптимизации амплитуды колебаний за счет ребер жесткости

The results of optimizing the amplitude of vibrations due to stiffeners

Количество ребер жесткости	Ребра жесткости 1-го типа	Ребра жесткости 2-го типа
	A, мкм	A, мкм
3	249,1	241,6
4	254,3	242,8
5	249,4	247,8
6	243,2	243,1
7	243,7	244,2
8	242,1	253,6
9	246,3	254,2
10	250,5	243,8

Сравнительный анализ таблицы показал, что ребра жесткости 1-го типа уменьшают амплитуду на 4,8 %, а ребра жесткости 2-го типа – на 5,0 % относительно классического ствола.

На рис. 10 представлены ствол с 8 ребрами жесткости первого типа и ствол с 3 ребрами жесткости второго типа, полученные в ходе оптимизации.

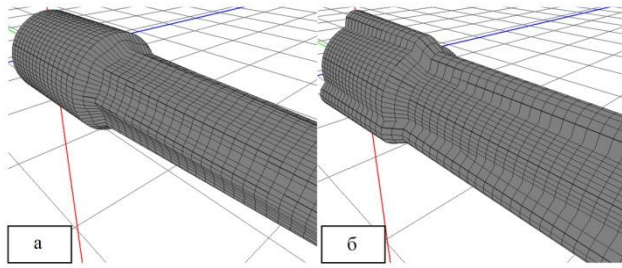


Рис. 10. Сравнение оптимальных конфигураций стволов: а – с 8 ребрами жесткости 1-го типа; б – с 3 ребрами жесткости 2-го типа

Fig. 10. Comparison of optimal barrel configurations: а) 8 stiffeners of the 1st type; б) 3 stiffeners of the 2nd type

Как показали расчеты, оптимизация классического ствола позволяет сократить амплитуду колебаний A на 72,2 % с 915,6 до 254,4 мкм, что позволит снизить разброс снарядов, вызванный колебаниями ствола, на расстоянии 1500 м на 0,793 м (с 1,102 до 0,309 м).

Заключение

Разработана квазиодномерная компьютерная модель колебаний ствола с учетом инерционных сил, деформации ствола, давления газопороховой смеси и взаимодействия снаряда со стволом.

Разработан алгоритм структурно-параметрической оптимизации геометрической формы ствола. Оптимизация классического ствола проводилась за счет изменения внешних диаметров в поперечных сечениях ствола и была направлена на уменьшение амплитуды колебаний дульного среза. Для стволов с ребрами жесткости оптимизировались размеры и положение ребер жесткости. В ходе оптимизации учитывались ограничения на массу и прочность ствола согласно теории наибольших деформаций.

Модели были реализованы в программно-вычислительном комплексе на языке программирования C#, создана трехмерная визуализация выстрела, включающая модели ствола, заряда и снаряда.

Получены результаты математического моделирования колебаний классического ствола. Показано, что разница амплитуд с учетом и без теплопроводности составляет менее 11 %, что является незначительным при оценке колебаний. Сравнение с колебаниями ствола с ребрами жесткости показало, что изменение формы ствола без оптимизации геометрии уменьшает амплитуду колебаний на 9,7 %. Однако это снижение не имеет систематического характера и наблюдается лишь в определенные моменты времени.

Оптимизация классического ствола позволила сократить амплитуду колебаний на 72,2 % с 915,6 до 254,4 мкм. Ребра жесткости 1-го типа

сокращают амплитуду на 73,5 % до 242,1 мкм, 2-го типа – на 73,6 % до 241,6 мкм. Наибольший эффект достигается для ствола с 3 ребрами жесткости 2-го типа.

Библиографические ссылки

1. Zieliński M., Koniorczyk P., Surma Z. Influence of the Shrinkage of the Inner Layer of Steel Tubes on Permissible Thermal Load. *Energies*. Vol. 17.702. 18 p. 2024. doi: 10.3390/en17030702.
2. Chaturvedi E. Numerical investigation of dynamic interaction with projectile and harmonic behaviour for T-finned machine gun barrels. Vol. 16. pp. 460-469. 2019. doi: 10.1016/j.dt.2019.07.018.
3. 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.
4. Русяк 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.
5. Русяк И. Г., Тененев В. А., Дряхлов Р. Р. Влияние размерности математической модели внутренней баллистики на расчетные параметры выстрела // Интеллектуальные системы в производстве. 2020. Т. 18, № 2. С. 106–116. DOI: 10.22213/2410-9304-2020-2-106-116.
6. Alan Suyadnya K., Tarwidi D., Budi Setiawan E., FebrianUmbara R. Numerical Modeling of Heat Transfer in Gun Barrel with Experimental Validation. *International Journal of Engineering & Technology*. Vol. 8. pp. 62-66. 2019. doi: 10.14419/ijet.v8i1.9.26369.
7. Игнатов А. В., Богомолов С. Н., Федянин Н. Д. Метод расчета свободных поперечных колебаний ствола автоматической пушки при заданном условии закрепления // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. Вып. 11. Ч. 2. С. 70–77.
8. Karahan F., Pakdemirli M. Vibration analysis of a beam on a nonlinear elastic foundation. *Structural Engineering and Mechanics*. Vol. 62. No. 2. 2017. Pp. 171-178. DOI: 10.12989/sem.2017.62.2.171.
9. Суфиянов В. Г. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния ствола при выстреле // Интеллектуальные системы в производстве. 2016. № 3 (30). С. 13–17.
10. Верификация и валидация компьютерных моделей / А.В. Сальников, М.С. Французов, К. А. Виноградов, К. Р. Пятунин, А. С. Никулин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2022. № 9 (750). С. 100–115. DOI: 10.18698/0536-1044-2022-9-100-115.
11. Суфиянов В. Г., Русяк И. Г., Клюкин Д. А. Математическое моделирование колебаний ствола с учетом технологических отклонений при стрельбе

очередями // *Фундаментальные основы баллистического проектирования* / под ред. Б. Э. Кэрта. СПб. : БГТУ «Военмех», 2022. С. 90–97. DOI 10.53403/9785951505071_2022_386.

12. 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.

13. Kravchuk A., Kravchuk A., Lopatin S. Complete solution of lame problem for a thick-walled composite nonlinearly deformable cylinder. *Construction Materials and Products*. Vol. 2. 2019. Pp. 64-72. 10.34031/2618-7183-2019-2-4-64-72.

14. Coccozza-Thivent C. Numerical Methods. *Markov Renewal and Piecewise Deterministic Processes*. 2021. 252 p. doi: 10.1007/978-3-030-70447-6.

15. Nelder J.A., Mead R. A simplex method for function minimization // *Computer Journal*. 1965. vol. 7. p. 308-313. doi: 10.1093/COMJNL/7.4.308.

16. Русак 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.

17. Лупанов А. М., Русак 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.

References

1. Zieliński M., Koniorczyk P., Surma Z. Influence of the Shrinkage of the Inner Layer of Steel Tubes on Permissible Thermal Load. *Energies*. Vol. 17. 702. 18 p. 2024. doi: 10.3390/en17030702

2. Chaturvedi E. Numerical investigation of dynamic interaction with projectile and harmonic behaviour for T-finned machine gun barrels. Vol. 16. pp. 460-469. 2019. doi: 10.1016/j.dt.2019.07.018

3. Rusyak I.G., Sufiyarov V.G., Klyukin D.A. One-dimensional mathematical model of vibrations of a barrel with a cross section of an arbitrary shape // *Bulletin of Tomsk State University. Mathematics and mechanics*. 2022. No. 80. pp. 133-146. doi: 10.17223/19988621/80/12.

4. Rusyak I.G., Sufiyarov V.G., Klyukin D.A. [Study of the influence of the shape of the barrel of an automatic gun on its vibration and temperature characteristics]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2023. Vol. 21, no. 4. Pp. 81-87 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2023-4-81-87.

5. Rusyak I.G., Tenenev V.A., Dryakhlov R.R. [The influence of the dimension of the mathematical model of internal ballistic on the calculated parameters of the shot]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2020. Vol. 18,

no. 2. Pp. 106-116 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2020-2-106-116.

6. Alan Suyadnya K., Tarwidi D., Budi Setiawan E., FebrianUmbara R. Numerical Modeling of Heat Transfer in Gun Barrel with Experimental Validation. *International Journal of Engineering & Technology*. Vol. 8. pp. 62-66. 2019. doi: 10.14419/ijet.v8i1.9.26369

7. Ignatov A.V., Bogomolov S.N., Fedyanin N.D. [Method for calculating free transverse oscillations of the barrel of an automatic gun under a given condition of fixation]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2017. Issue. 11. Part. 2. Pp. 70-77 (in Russ.).

8. Karahan F., Pakdemirli M. Vibration analysis of a beam on a nonlinear elastic foundation. *Structural Engineering and Mechanics*. Vol. 62. No. 2. 2017. pp. 171-178. doi: 10.12989/sem.2017.62.2.171

9. Sufiyarov V.G. [Mathematical modeling of the stress-strain state of the barrel when fired]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2016. No. 3. Pp. 13-17 (in Russ.).

10. Salnikov A.V., Frenchov M.S., Vinogradov K.A., Pyatunin K.R., Nikulin A.S. [Verification and validation of computer models]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroyeniye*. 2022. No. 9 (750). pp. 100-115 (in Russ.). DOI: 10.18698/0536-1044-2022-9-100-115.

11. Sufiyarov V.G., Rusyak I.G., Klyukin D.A. *Matematicheskoe modelirovanie kolebaniy stvola s uchetom tekhnologicheskikh otklonenii pri strel'be ocheredyami* [Mathematical modeling of barrel vibrations taking into account technological deviations when firing bursts]. *Fundamental'nye osnovy ballisticheskogo proektirovaniya* [Fundamental principles of ballistic design]. Edited by B.E. Kert. Saint Petersburg. BSTU "Voennemeh". 2022. Pp. 90-97 (in Russ.). DOI: 10.53403/9785951505071_2022_386.

12. Klyukin D.A. Matematicheskoe modelirovanie teplovogo nagruzheniya stvola artilleriiskogo orudiya pri vystrele [Mathematical modeling of the thermal loading of the barrel of an artillery piece when fired]. *Vystavka innovatsii – 2022 (vesenniyaya sessiya) : sbornik materialov XXXIII Respublikanskoi vystavki-sessii studentcheskikh innovatsionnykh projektov*. [Exhibition of innovations - 2022 (spring session): Collection of materials of the XXXIII Republican exhibition-session of student innovative projects]. Izhevsk. April 29, 2022. Izhevsk: Izhevsk State Technical University named after M.T. Kalashnikov. 2022. pp. 176-182 (in Russ.). doi: 10.22213/ie022124.

13. Kravchuk A., Kravchuk A., Lopatin S. Complete solution of lame problem for a thick-walled composite nonlinearly deformable cylinder. *Construction Materials and Products*. Vol. 2. 2019. pp. 64-72. 10.34031/2618-7183-2019-2-4-64-72.

14. Coccozza-Thivent C. Numerical Methods. *Markov Renewal and Piecewise Deterministic Processes*. 2021. 252 p. doi: doi.org/10.1007/978-3-030-70447-6.

15. Nelder J.A., Mead R. A simplex method for function minimization // *Computer Journal*. 1965. vol. 7. p. 308-313. doi: 10.1093/COMJNL/7.4.308.

16. Rusyak I.G., Tenenev V.A. [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 (in Russ.). DOI: 10.20537/2076-7633-2020-12-5-1123-1147.

17. Lipanov A.M., Rusyak I.G., Sufiyanov V.G. [Investigation of the effect of barrel vibrations on the angle of projectile departure when fired]. *Vestnik Toms'kogo gosudarstvennogo universiteta: Matematika i mekhanika*. 2020. Pp. 80-94 (in Russ.). DOI: 10.17223/19988621/68/8..

Computer Modeling and Structural and Parametric Optimization of the Artillery Gun Barrel with Non-circular Cross Section

D. A. Klyukin, Post-graduate, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

The article presents the results of modeling longitudinal and transverse vibrations of the artillery gun barrel with a non-circular cross section being loaded with internal pressure and thermal effects of powder gases. The barrel shape was taken into account by means of the inertia moments of the barrel cross sections and internal forces. An algorithm for structural and parametric optimization of the barrel geometry has been developed. The external barrel diameters, the cutout diameters and the distances from the center of the cross section to the center of the cutout in key cross sections are selected as controlled variables. The oscillation amplitude obtained on the basis of mathematical modeling of firing in bursts is chosen as the target function of the optimization problem. The limitations of the optimization problem were: the mass and strength of the barrel specified by the wall thickness according to the maximum strain theory. A software package for modeling vibrations and optimizing barrel shape has been developed. Implementing OpenGL technology, a three-dimensional visualization of the shot was implemented. Based on the results of modeling the classical barrel, the vibration amplitude was determined, which constituted to 915.6 microns. It is shown that the difference in amplitudes with and without thermal conductivity is less than 11%, which is insignificant when estimating vibrations. Changing the barrel shape without optimizing its geometric dimensions makes it possible to reduce the amplitude of vibrations by 9.7%. Optimization of the classical barrel made it possible to reduce the amplitude of vibrations by 72.2% from 915.6 microns to 254.4 microns. Stiffeners of type 1 reduce the amplitude by 73.5% to 242.1 microns, type 2 - by 73.6% to 241.6 microns. The greatest effect is achieved for a barrel with 3 stiffeners of type 2.

Keywords: computer model, barrel vibrations, strain-stress state, structural and parametric optimization, software and computing complex.

Получено: 17.09.24

Образец цитирования

Клюкин Д. А. Компьютерное моделирование и структурно-параметрическая оптимизация ствола артиллерийского орудия с некольцевым поперечным сечением // Интеллектуальные системы в производстве. 2025. Т. 23, № 1. С. 73–81. DOI: 10.22213/2410-9304-2025-1-73-81.

For Citation

Klyukin D.A. [Computer modeling and structural-parametric optimization of the barrel of an artillery piece with a non-circular cross section]. *Intellectual'nye sistemy v proizvodstve*. 2025, vol. 23, no. 1, pp. 73-81. DOI: 10.22213/2410-9304-2025-1-73-81.