

МЕХАНИКА

MECHANICS

Научная статья

УДК 004.942:623.526.4

doi: 10.17223/19988621/96/4

**Валидация квазиодномерной модели
продольно-поперечных колебаний ствола при выстреле****Даниил Анатольевич Клюкин¹, Вадим Гарайханович Суфиянов²,
Елена Александровна Федорова³***^{1, 2, 3} Ижевский государственный технический университет
имени М.Т. Калашникова, Ижевск, Россия**¹ anatoliikljukin@mail.ru**² vsufiy@mail.ru**³ iso@istu.ru*

Аннотация. Представлены результаты сравнения результатов натурных экспериментов и математического моделирования продольно-поперечных колебаний ствола при выстреле в квазиодномерной постановке. Валидация модели колебаний ствола осуществлялась по данным отстрелов винтовочных патронов на баллистическом стволе. Колебания ствола фиксировались с помощью высокоскоростной камеры в высоком разрешении и обрабатывались с помощью специализированного программного обеспечения. Результаты валидации показали, что компьютерная модель достаточно точно описывает колебания ствола в процессе выстрела, позволяет оценивать амплитуду и динамику колебаний.

Ключевые слова: продольно-поперечные колебания ствола при выстреле, валидация математической модели, баллистический ствол

Благодарности: Работа выполнена в рамках программы развития научных и научно-педагогических кадров ИжГТУ имени М.Т. Калашникова (НИР, КДА-23, приказ ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова» от 27.12.2023 № 1566).

Для цитирования: Клюкин Д.А., Суфиянов В.Г., Федорова Е.А. Валидация квазиодномерной модели продольно-поперечных колебаний ствола при выстреле // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2025. № 96. С. 42–52. doi: 10.17223/19988621/96/4

Validation of a quasi-one-dimensional model of longitudinal and transverse vibrations of the barrel on firing

Daniil A. Klyukin¹, Vadim G. Sufyanov², Elena A. Fyodorova³

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

¹ anatoliikljukin@mail.ru

² vsufiy@mail.ru

³ iso@istu.ru

Abstract. This paper presents a comparison of the results of field experiments and mathematical modeling of longitudinal and transverse vibrations of the barrel on firing in a quasi-one-dimensional formulation. The validation of the barrel vibration model is carried out according to the data of the rifle cartridges fired from a ballistic barrel. The vibrations of the barrel are detected using a high-speed camera at high resolution and processed with a specific software. The validation shows that the computer model accurately describes the vibrations of the barrel during firing and allows estimating the amplitude and dynamics of the vibrations.

Keywords: longitudinal and transverse vibrations of the barrel on firing, validation of the mathematical model, ballistic barrel

Acknowledgments: This research was financially supported by the Program for the development of scientific and scientific-pedagogical personnel of the M.T. Kalashnikov Izhevsk State Technical University.

For citation: Klyukin, D.A., Sufyanov, V.G., Fyodorova, E.A. (2025) Validation of a quasi-one-dimensional model of longitudinal and transverse vibrations of the barrel on firing. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 96. pp. 42–52. doi: 10.17223/19988621/96/4

Введение

При проектировании военной техники широко применяется математическое моделирование физических процессов, протекающих в разрабатываемых изделиях и оказывающих существенное влияние на их тактико-технические характеристики [1]. Важной характеристикой автоматических пушек является точность, и кучность стрельбы и колебания ствола в процессе стрельбы очередями играют весьма значительную роль.

В данной статье рассматривается вопрос об адекватности квазиодномерной модели напряженно-деформированного состояния ствола [2] для исследования его колебаний. Точность и достоверность результатов моделирования имеют критическое значение для эффективной разработки новых орудий, улучшения их характеристик и обеспечения надежности эксплуатации [3]. Одним из методов анализа и оптимизации работы стволов является проведение компьютерного моделирования колебаний ствола во время выстрела [3].

Верификация и валидация компьютерных моделей стали неотъемлемой частью исследований в области вычислительной механики [4, 5], они позволяют убедиться в точности и достоверности математических моделей, используемых для анализа различных физических процессов [6]. Мы рассмотрим процесс валидации квазиодномерной компьютерной модели продольно-поперечных колебаний ствола при выстреле. Валидация реализованной компьютерной модели на основе сравнения с экспериментальными данными позволяет оценить ее достоверность и возможность использования для моделирования и анализа колебаний ствола в процессе выстрела и стрельбы очередями. В данном контексте верификация и валидация компьютерной модели имеют ключевое значение для подтверждения ее соответствия исследуемым физическим процессам.

Цель исследования состоит в сравнении результатов моделирования колебаний баллистического ствола с данными, полученными в эксперименте. В ходе исследования проведена валидация компьютерной квазиодномерной модели продольно-поперечных колебаний ствола на основе сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными.

Условия эксперимента

При проведении эксперимента был использован баллистический ствол калибра 7.62 мм, устанавливаемый в универсальный баллистический затвор UZ-2002 [6]. Ствол состоит из цилиндрических участков постоянного внешнего диаметра, геометрия ствола представлена на рис. 1.

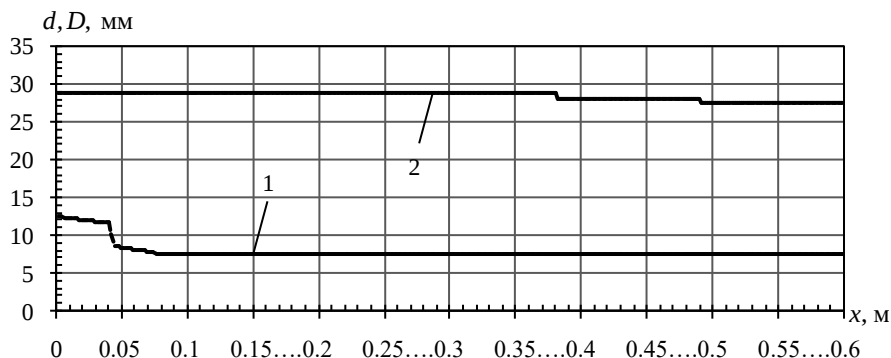


Рис. 1. Геометрия баллистического ствола: 1 – внутренний диаметр; 2 – внешний диаметр
Fig. 1. Geometry of a ballistic barrel: (1) inner and (2) outer diameters

Ствол закреплялся в казенной части в универсальном баллистическом затворе, схема закрепления ствола представлена на рис. 2.

Стрельба проводилась винтовочными патронами $7.62 \times 54 R$, которые являются одними из самых старых патронов, все еще активно используемых во многих странах в различных винтовках и пулеметах [7].

Давление в стволе измерялось с помощью пьезодатчика давления, обладающего высокой точностью измерений, быстрым откликом на изменения давления, широким диапазоном рабочих температур, надежностью и долговечностью [8]. Пьезодатчик давления располагался на расстоянии 580 мм от дульного среза. Баллистическая установка в сборе представлена на рис. 3.

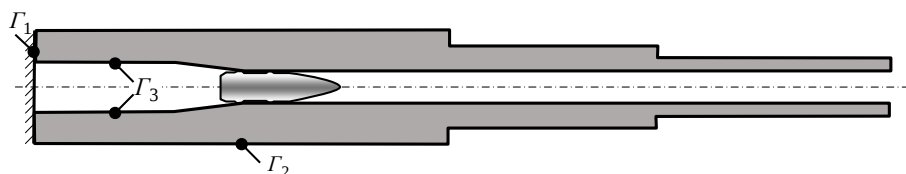


Рис. 2. Схема закрепления баллистического ствола

Fig. 2. Schematic diagram of the barrel fixing



Рис. 3. Баллистическая установка

Fig. 3. Ballistic installation

Фиксация колебаний ствола проводилась с помощью высокоскоростной камеры Olympus i-speed 3 с частотой съемки 10 000 кадров в секунду в разрешении $1\,280 \times 1\,024$ пикселей [9], это позволило точно отследить динамику движения ствола и избежать засветов изображения при выстреле. Для обеспечения хорошей освещенности во время съемки стенд, на котором располагался баллистический ствол, освещался прожектором Digital pro 1200x (рис. 4).



Рис. 4. Высокоскоростная камера, прожектор и результаты фиксации положения ствола на экране

Fig. 4. High-speed camera, searchlight, and fixed position of the barrel on the screen

Использование представленного на рис. 4 экспериментального оборудования позволило получить качественную видеозапись колебаний ствола.

Результаты эксперимента

Ниже представлены экспериментальные результаты по отстрелу трех винтовочных патронов на баллистическом стволе. Полученные данные были проанализированы с использованием специализированного программного обеспечения для определения кривых колебаний дульного среза и давления в камере. Результаты измерения давления для трех выстрелов представлены на рис. 5.

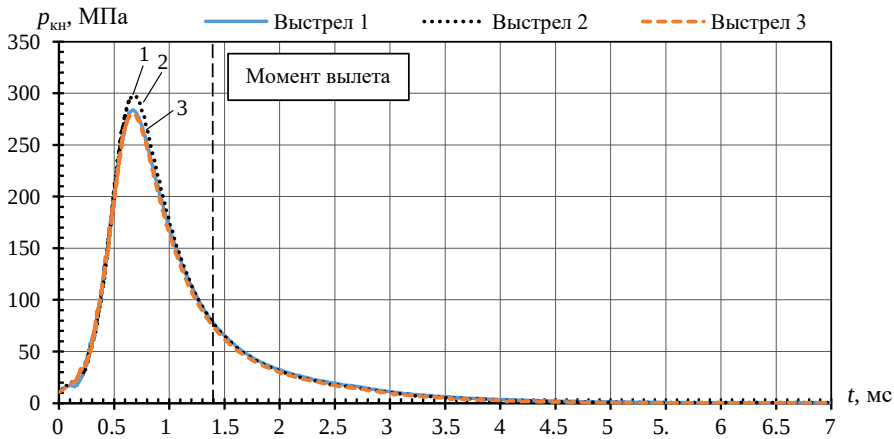


Рис. 5. Экспериментальные данные давления в камере баллистического ствола:

1 – выстрел 1; 2 – выстрел 2; 3 – выстрел 3

Fig. 5. Experimental pressure in the chamber of the ballistic barrel:

1, Shot 1; 2, Shot 2; and 3, Shot 3

Из рис. 5 видно, что экспериментальные кривые давления хорошо повторяют друг друга, максимальное давление составило 280, 283 и 298 МПа для 1-го, 2-го и 3-го выстрелов соответственно. Полученные экспериментальные кривые давления использовались в качестве исходных данных в квазиодномерной модели колебаний ствола.

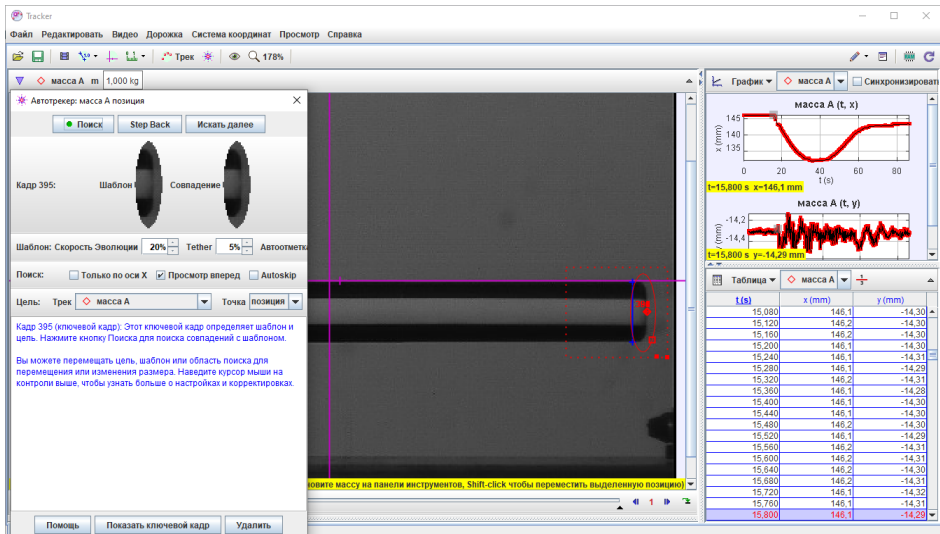


Рис. 6. Определение колебаний дульного среза баллистического ствола по видео в программе Tracker

Fig. 6. Detection of muzzle vibrations of the ballistic barrel by video in the Tracker program

Обработка видео колебаний дульного среза ствола проводилась в специализированном программном обеспечении Tracker [10], которое позволяет отслеживать

перемещения исследуемого объекта с помощью технологии машинного зрения. Пример результатов обработки видео представлен на рис. 6.

Кривые колебаний дульного среза были получены для всех трех выстрелов, и проведена их обработка: определено время выстрела, графики были приведены к одному моменту времени, проведены сглаживание данных с помощью скользящего окна по 11 точкам и совмещение графиков по осям (рис. 7, 8). Погрешность определения координат составила не более 0.01 мм.

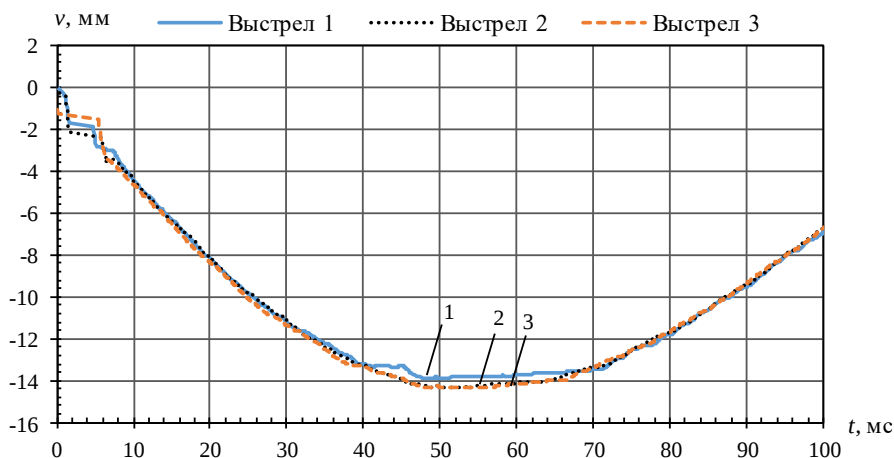


Рис. 7. Продольные колебания дульного среза баллистического ствола:

1 – выстрел 1; 2 – выстрел 2; 3 – выстрел 3

Fig. 7. Longitudinal vibrations of the muzzle of the ballistic barrel:

1, Shot 1; 2, Shot 2; and 3, Shot 3

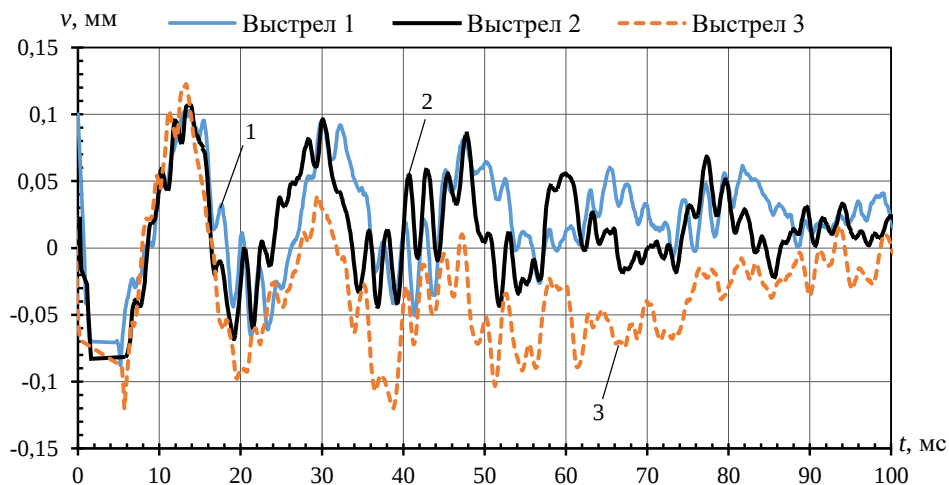


Рис. 8. Вертикальные колебания дульного среза баллистического ствола

Fig. 8. Vertical vibrations of the muzzle of the ballistic barrel

Из рис. 7 видно, что за 50 мс баллистический ствол откатывается при выстреле на 14 мм и далее возвращается к исходному положению.

На рис. 8 показано, что экспериментальные кривые динамики поперечных колебаний ствола в вертикальной плоскости достаточно хорошо повторяют друг друга, при этом амплитуды колебаний, равные 0.25 мм, также совпадают.

Сравнение экспериментальных данных с результатами моделирования

Рассмотрим квазиодномерную математическую модель колебаний ствола [2, 11]. Уравнение баланса сил, действующих в продольном направлении по оси Ox , записывается в виде:

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

где $u(x, t)$ – величина продольных колебаний ствола; ρ – плотность материала ствола; k – коэффициент демпфирования колебаний; 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.

Уравнение поперечных колебаний ствола в вертикальной плоскости Oxy имеет вид:

$$\rho F \left(\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + k \frac{\partial v}{\partial t} \right) = -\rho F g \cos \varphi - q_2 + (F \sigma^{xx} + p_1 S) \frac{\partial^2 (v + v_{00})}{\partial x^2} + \\ + v \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\int_F (\sigma^{yy} + \sigma^{zz}) y df \right) - \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(E J_z \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right) - \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\alpha E \int_F T(x, r, t) y df \right), \quad (2)$$

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 .

Добавим в модель в качестве граничных условий на казенном срезе Γ_1 учет движения ствола при откате:

$$u(0, t) = u_o(t) \quad (3)$$

где $u(x, t)$ – величина продольных колебаний ствола; $u_o(t)$ – движение ствола при откате.

Баллистический ствол сделан из высокопрочной стали, характеристики которой были приняты равными: плотность $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$, модуль Юнга $E = 200 \text{ ГПа}$, коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$, коэффициент демпфирования $k = 25 \text{ с}^{-1}$, масса ствола 4.6 кг.

Распределение давления внутри ствола определялось на основе экспериментальных данных, расчет движения снаряда проводился на основе решения задачи внутренней баллистики в термодинамической постановке [12], давление внутри ствола в период последействия определялось по модели [13]. Моделирование осуществлялось в программе [14]. Результаты сравнения рассчитанных колебаний ствола на дульном срезе с экспериментальными данными представлены на рис. 9.

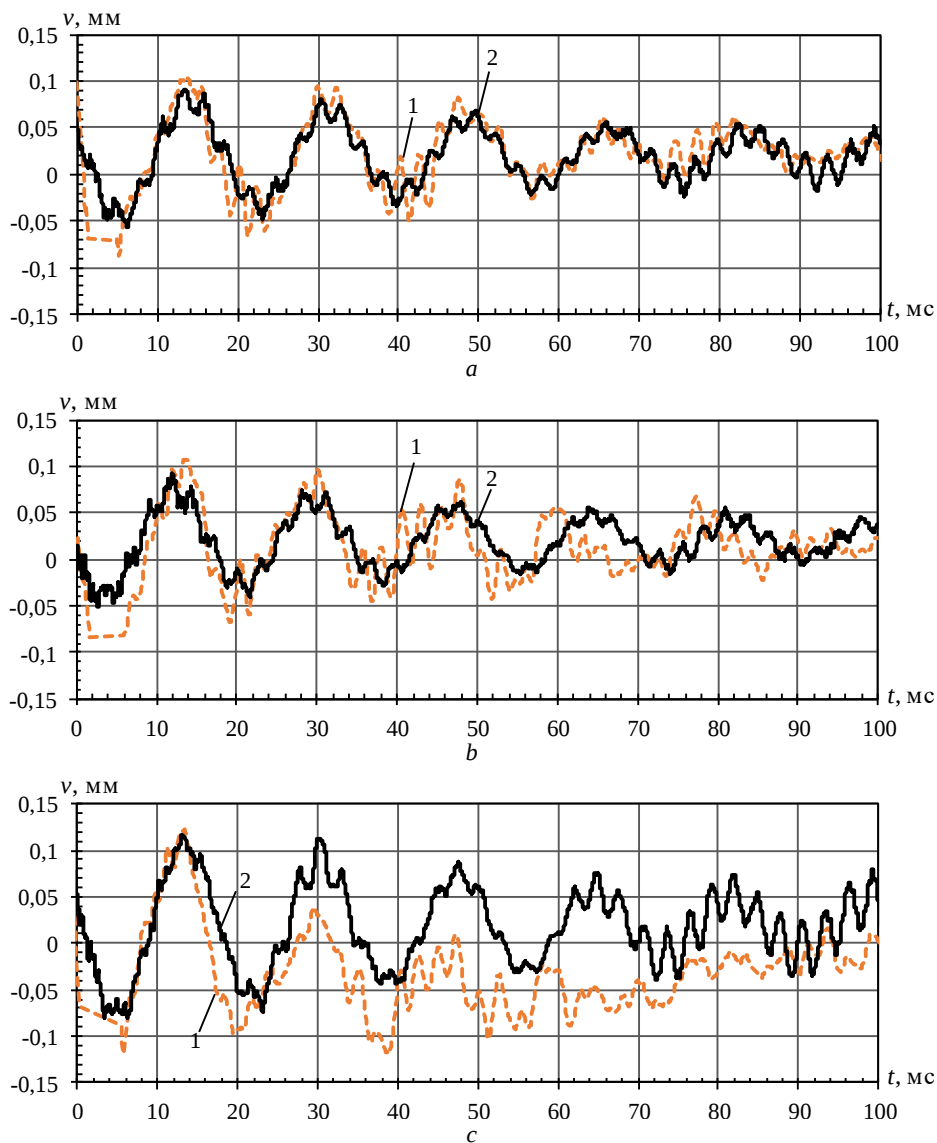


Рис. 9. Сравнение результата расчета вертикальных колебаний ствола с экспериментальными данными: 1 – эксперимент; 2 – расчетные значения;
а – выстрел 1; б – выстрел 2; в – выстрел 3

Fig. 9. Comparison of the calculated vertical vibrations of the barrel with the experimental data:
1, experiment and 2, calculation; (a) Shot 1; (b) Shot 2; and (c) Shot 3

Результаты сравнения экспериментальных и модельных колебаний ствола показывают, что модель позволяет достаточно точно описать поведение ствола в процессе выстрела и оценить амплитуду и период колебаний дульного среза. Полученные результаты показывают, что квазиодномерная модель адекватно описывает динамику колебаний ствола в процессе выстрела, при этом квазиодно-

мерная математическая модель требует меньших затрат временных ресурсов по сравнению с трехмерным моделированием.

Заключение

В работе представлены результаты валидации компьютерной квазиодномерной модели упругих продольно-поперечных колебаний ствола на основе сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными, полученными в результате отстрелов трех винтовочных патронов на баллистическом стволе, установленном в универсальный баллистический затвор.

Моделирование продольно-поперечных колебаний ствола осуществлялось с использованием экспериментальных данных по динамике давления, которая фиксировалась с помощью пьезодатчиков давления, и динамике отката ствола, которая определялась на основе обработки данных видеосъемки на специализированной высокоскоростной камере в высоком разрешении. Поперечные колебания дульного среза ствола также были получены на основе обработки данных видеосъемки высокоскоростной камерой с использованием специального программного обеспечения.

В ходе эксперимента было проведено три выстрела винтовочным патроном из баллистического ствола. Сравнение графиков модельных и экспериментальных колебаний дульного среза при выстреле показало, что результаты квазиодномерного моделирования колебаний ствола качественно совпадают, при этом амплитуды и период колебаний практически совпадают. Таким образом, валидация квазиодномерной модели показала, что она позволяет достаточно точно описывать перемещения ствола при выстреле и дает возможность оценить амплитуду и динамику его колебаний.

Список источников

1. Новиков И.А., Мешков С.А., Мелехин А.А. Адекватность алгоритмов пакета ANSYS и спектрального анализа измеренных свободных колебаний ствольного узла орудия // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2023. № 1 (126). С. 96–104.
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. O'Neil D. The Optimization of Rifle Barrel Harmonics // Graduate College Dissertations and Theses. 2022. 1608. 72 p.
4. American Society of Mechanical Engineers. Standard for Verification and validation in computational solid mechanics. ASME V&V 10-2019. 2020. 44 p.
5. Сальников А.В., Французов М.С., Виноградов К.А., Пятунин К.Р., Никулин А.С. Верификация и валидация компьютерных моделей // Известия вузов. Машиностроение. 2022. № 9 (750). С. 100–115. doi: 10.18698/0536-1044-2022-9-100-115
6. UZ-2002 Universal ballistic breech // Prototypa. URL: <http://www.prototypa.com/uz-2002-universal-ballistic-breech-1> (Дата обращения 13.07.2024).
7. 7,62-мм винтовочно-пулеметные патроны 7,62 × 54 // Большая Российская энциклопедия. URL: <https://bigenc.ru/c/7-62-mm-vintovochno-pulemiotnye-patrony-7-62x54-eeeeaf1> (дата обращения: 13.07.2024).
8. Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В. Пьезоэлектрические датчики. М.: Техносфера, 2006. 628 с. (Мир электроники).
9. i-SPEED 3 series high-speed cameras // iX Cameras. URL: <https://www.ix-cameras.com/3-Series/> (accessed: 13.07.2024).

10. Tracker. Tracker Video Analysis and Modeling Tool. URL: <https://physlets.org/tracker/> (accessed: 13.07.2024).
11. Клюкин Д.А., Суфиянов В.Г., Русяк И.Г. Верификация одномерной компьютерной модели продольно-поперечных колебаний ствола артиллерийского орудия при выстреле // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2023. № 86. С. 79–93. doi: 10.17223/19988621/86/6
12. Русяк И.Г., Тененев В.А. Моделирование баллистики артиллерийского выстрела с учетом пространственного распределения параметров и противодействия // Компьютерные исследования и моделирование. 2020. Т. 12, № 5. С. 1123–1147. doi: 10.20537/2076-7633-2020-12-5-1123-1147.
13. 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. № 68. С. 80–94. doi: 10.17223/19988621/68/8
14. Суфиянов В.Г., Клюкин Д.А. Разработка программы для расчета продольно-поперечных колебаний ствола артиллерийского орудия // I Липановские научные чтения: материалы регион. науч. конф., Ижевск, 15–16 июня 2021 г. Ижевск: Ижевск. гос. техн. ун-т им. М.Т. Калашникова, 2021. С. 106–111.

References

1. Novikov I.A., Meshkov S.A., Melekhin A.A. (2023) Adekvatnost' algoritmov paketa ANSYS i spektral'nogo analiza izmerennykh svobodnykh kolebaniy stvol'nogo uzla orudiya [Adequacy of the algorithms of the ANSYS package and spectral analysis of the measured free vibrations of the gun barrel assembly]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii raketnykh i artilleriyskikh nauk – Proceedings of the Russian Academy of Missile and Artillery Sciences*. 1(126). pp. 96–104.
2. Homenko Yu.P., Ishchenko A.N., Kasimov V.Z. (1999) *Matematicheskoe modelirovanie vnutriballisticheskikh protsessov v stvol'nykh sistemakh* [Mathematical modeling of intra-ballistic processes in stem systems]. Novosibirsk: Izdatel'stvo SO RAN.
3. O'Neil D. (2022) *The Optimization of Rifle Barrel Harmonics*. Graduate College Dissertations and Theses. 1608.
4. ASME V&V 10-2019 (2020) *Standard for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics*.
5. Sal'nikov A.V., Frantsuzov M.S., Vinogradov K.A., Pyatunin K.R., Nikulin A.S. (2022) Verifikatsiya i validatsiya komp'yuternykh modeley [Digital simulation verification and validation]. *Izvestiya vuzov. Mashinostroyeniye – BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 9(750). pp. 100–115. doi: 10.18698/0536-1044-2022-9-100-115
6. Prototypa. UZ-2002 Universal ballistic breech. [Electronic resource]. URL: <http://www.prototypa.com/uz-2002-universal-ballistic-breech-1> (Date of access: 13.07.2024).
7. Bol'shaya Rossiyskaya entsiklopediya. 7,62-mm vintovочно-pulemyotnye patrony 7,62×54. [Electronic resource]. URL: <https://bigenc.ru/c/7-62-mm-vintovочно-pulemyotnye-patrony-7-62x54-eeeeaf1> (Date of access: 13.07.2024).
8. Sharapov V.M., Musienko M.P., Sharapova E.V. (2006) *P'ezoelektricheskie datchiki* [Piezo-electric sensors]. Moscow: Tekhnosfera.
9. iX Cameras. i-SPEED 3 series high-speed cameras. [Electronic resource]. URL: <https://www.ix-cameras.com/3-Series/> (Date of access: 13.07.2024).
10. Tracker. Tracker Video Analysis and Modeling Tool. [Electronic resource]. URL: <https://physlets.org/tracker/> (Date of access: 13.07.2024).
11. Klyukin D.A., Sufiyanov V.G., Rusyak I.G. (2023) Verifikatsiya odnomernoy komp'yuternoy modeli prodol'no-poperechnykh kolebaniy stvola artilleriyskogo orudiya pri vystrele [Verification of a one-dimensional computer model of longitudinal-transverse vibrations of an artillery gun barrel on firing]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 86. pp. 79–93. doi: 10.17223/19988621/86/6

12. Rysyak I.G., Tenenev V.A. (2020) Modelirovanie ballistiki artilleriyskogo vystrela s uchetom prostranstvennogo raspredeleniya parametrov i protivodavleniya [Modeling the ballistics of an artillery shot taking into account the spatial distribution of parameters and backpressure]. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie – Computer Research and Modeling*. 12(5). pp. 1123–1147. doi: 10.20537/2076-7633-2020-12-5-1123-1147
13. Lipanov A.M., Rysyak I.G., Sufiyanov V.G. (2020) Issledovanie vliyaniya kolebaniy stvola na ugol vyleta snaryada pri vystrele [Investigation of the effect of barrel vibrations on the angle of projectile departure when fired]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. pp. 80–94. doi: 10.17223/19988621/68/8
14. Sufiyanov V.G., Klyukin D.A. (2021) Razrabotka programmy dlya rascheta prodol'no-poperechnykh kolebaniy stvola artilleriyskogo orudiya [Development of a program for calculating longitudinal and transverse vibrations of the barrel of an artillery piece]. *I Lipanovskie nauchnye chteniya: Materialy regional'noy nauchnoy konferentsii – The I Lipanovsky Scientific Readings: Proceedings of the Regional Scientific Conference*. pp. 106–111.

Сведения об авторах:

Клюкин Даниил Анатольевич – аспирант, инженер-программист 1-й категории, ассистент кафедры «Прикладная математика и информационные технологии» Ижевского государственного технического университета имени М.Т. Калашникова (Ижевск, Россия). E-mail: anatoliikljukin@mail.ru

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

Федорова Елена Александровна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Стрелковое оружие», заведующая лабораторией «Разработка и производство стрелкового оружия» Ижевского государственного технического университета имени М.Т. Калашникова (Ижевск, Россия). E-mail: iso@istu.ru

Information about the authors:

Klyukin Daniil A. (1st Category Software Engineer, Assistant, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation). E-mail: anatoliikljukin@mail.ru

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

Fedorova Elena A. (Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Laboratory, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation). E-mail: iso@istu.ru

Статья поступила в редакцию 01.08.2024; принята к публикации 01.08.2025

The article was submitted 01.08.2024; accepted for publication 01.08.2025