

УДК 004.942, 623.526.4

В. Г. Суфиянов, кандидат физико-математических наук
ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТВОЛА ПРИ ВЫСТРЕЛЕ

В статье рассматривается вопрос динамического влияния давления пороховых газов на напряженно-деформированное состояние ствола артиллерийского орудия. Рассматривается математическая модель напряженно-деформированного состояния ствола с граничными условиями, полученными в результате решения задачи внутренней баллистики в газодинамической постановке для комбинированных зарядов. Проведено исследование влияния переменного давления на параметры напряженно-деформированного состояния для гладкоствольной пушки.

Ключевые слова: артиллерийский выстрел, напряженно-деформированное состояние, ствол орудия, динамические граничные условия.

При проектировании артиллерийских установок необходимо, чтобы снаряд плотно прилегал к стволу, не пропуская пороховые газы, которые под большим давлением выталкивают снаряд. Плотное прилегание обеспечивается использованием различных обтюрирующих поясков на снарядах. Увеличение давления внутри ствола приводит к появлению зазора между снарядом и каналом ствола. Появление зазора вызывает прорыв газов [1] и приводит к биению снаряда при его движении по каналу ствола [2]. Последнее обстоятельство наиболее опасно для подкалиберных снарядов, у которых обтюрирующая поверхность находится в центре снаряда, а хвостовая часть снаря-

да – в области повышенного давления. В результате увеличивается угол колебательного движения снаряда, что вызывает изменение угла вылета и уменьшение начальной скорости снаряда. Данные обстоятельства существенно ухудшают точность стрельбы.

Ствол является основным компонентом артиллерийской установки и применяется для бросания снарядов в заданном направлении и заданной скоростью. Характеристики ствола зависят от применяемых материалов и технологии производства [3]. Общий вид артиллерийского ствола и его закрепление к казеннику представлено на рис. 1.

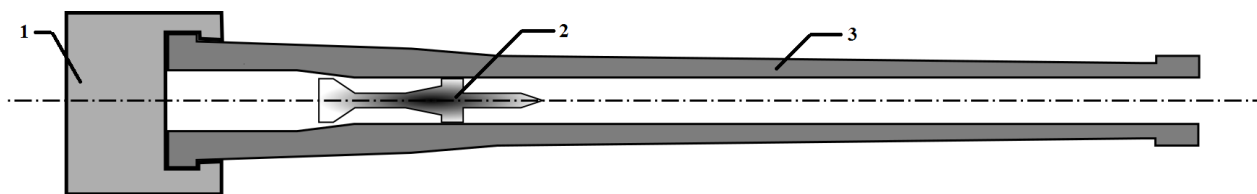


Рис. 1. Конструкция закрепления ствола: 1 – казенник; 2 – снаряд; 3 – ствол

Наибольшее влияние на конструкцию ствола оказывают поверхностные силы давления пороховых газов. Под воздействием этих сил возникают напряжения, которые приводят к деформации канала ствола.

Математическая модель напряженно-деформированного состояния

Напряженно-деформированное состояние твердого тела описывается системой дифференциальных уравнений [4]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} + F_x = \rho_s \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} + F_y = \rho_s \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + F_z = \rho_s \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2}, \end{cases} \quad (1)$$

где $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$ – нормальные напряжения; $\sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx}$ – тангенциальные напряжения; F_x, F_y, F_z – проекции объемных сил на координатные оси x, y, z ,

отнесенных к единице объема тела; u_x, u_y, u_z – проекции вектора перемещений на координатные оси x, y, z ; ρ_s – плотность материала ствола.

Тензоры скоростей деформации описываются системой уравнений [5]:

$$\begin{cases} \epsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x}, \\ \epsilon_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y}, \\ \epsilon_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z}, \\ \epsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right), \\ \epsilon_{yz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right), \\ \epsilon_{zx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \right), \end{cases} \quad (2)$$

где $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}$ – линейные деформации по соответствующим осям; $\varepsilon_{xy}, \varepsilon_{yz}, \varepsilon_{zx}$ – тангенциальные деформации.

Физическая модель напряженно-деформированного состояния изотропного тела, связывающая напряжения и деформации тела, описывается обобщенным законом Гука. В теории упругости напряжения и деформации связаны линейным соотношением. С увеличением деформаций зависимость становится нелинейной. В работе использовалась модель пластичности Джонсона – Кука [6, 7], которая зависит от эквивалентной деформации, скорости деформации и температуры:

$$\sigma_n = (A + B\varepsilon_p^n) \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right], \quad (3)$$

где σ_n – предел текучести; A, B, C – параметры материала; ε_p – эквивалентная пластическая дефор-

мация Мизеса; $\dot{\varepsilon}_p$ – скорость эквивалентной пластической деформации; $\dot{\varepsilon}_0$ – относительная скорость деформации; T – текущая температура; T_m – температура плавления; T_r – нормальная температура; n – коэффициент твердости; μ – показатель теплового размягчения.

Граничные условия задаются внутри канала ствола и на ее внешней границе (рис. 2). Заштрихованная часть соответствует границе закрепления ствола Γ_1 . В этой области скорости перемещения равны нулю. На внешней границе ствола Γ_2 напряжение соответствует атмосферному давлению P_n . Внутри канала ствола задаются две области: в области заснарядного пространства Γ_3 напряжение обусловлено давлением пороховых газов $p = p(x, t)$; в области Γ_4 – напряжение создается атмосферным давлением P_n .

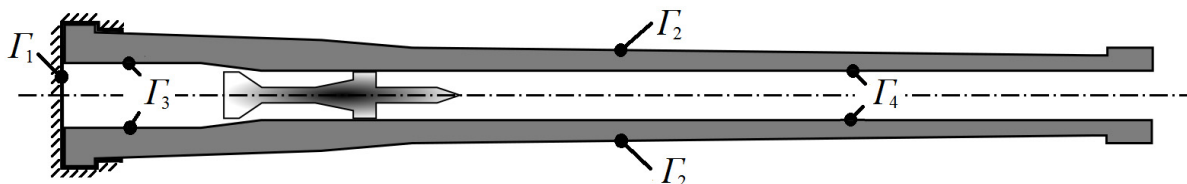


Рис. 2. Граничные условия для напряженно-деформированного состояния ствола: Γ_1 – граница закрепления ствола; Γ_2 – внешняя граница ствола; Γ_3 – внутренняя граница канала ствола для заснарядного пространства; Γ_4 – внутренняя граница канала ствола для пространства перед снарядом

Граничные условия определяются из следующих соотношений:

$$\begin{cases} \frac{\partial u_x}{\partial t} \Big|_{\Gamma_1} = 0, & \frac{\partial u_y}{\partial t} \Big|_{\Gamma_1} = 0, & \frac{\partial u_z}{\partial t} \Big|_{\Gamma_1} = 0, \\ \sigma \Big|_{\Gamma_2} = P_n, \\ \sigma \Big|_{\Gamma_3} = p(x, t), \\ \sigma \Big|_{\Gamma_4} = P_n, \end{cases} \quad (4)$$

где $p = p(x, t)$ – давление пороховых газов; σ – напряжение, задаваемое по нормали к границе поверхности.

Результаты моделирования

В работе рассматривается модель 125 мм гладкоствольной пушки, двухкомпонентный заряд типа трубка-зерно и бронебойно-подкалиберный снаряд.

Задача внутренней баллистики в газодинамической постановке для комбинированных порохов представлена в монографии [8] и решалась в программном комплексе [9]. В результате решения газодинамической задачи были получены распределение давления внутри ствола $p = p(x, t)$ и эпюра максимальных давлений (рис. 3). Максимальное давление достигается в камере и составляет 520 МПа. Общее время процесса составило 10,2 мс.

Результаты моделирования были выгружены в текстовый файл, содержащий информацию о времени процесса (1021 точек) и координатах (716 точек). Соответственно, информация по давлению внутри ствола была представлена в виде матрицы 1021×716 элементов.

В качестве материала ствола в работе рассматривается легированная сталь AISI 4340 [10] с добавлением никеля (1,65–2,00 %), хрома (0,70–0,90 %) и молибдена (0,20–0,30 %). Плотность рассматриваемой марки стали $\rho_s = 7830 \text{ кг/м}^3$. Параметры уравнения Джонсона – Кука для рассматриваемого материала содержатся в справочнике материалов ANSYS Autodyn [11, 12]: $A = 7,92 \cdot 10^8 \text{ Па}$, $B = 5,10 \cdot 10^8 \text{ Па}$, $n = 0,26$, $C = 0,014$, $\dot{\varepsilon}_0 = 1 \text{ с}^{-1}$, $T_m = 1519,9^\circ \text{ C}$, $\mu = 1,03$.

При решении задачи напряженно-деформированного состояния исследовалось расширение канала ствола в процессе выстрела. Массовые силы не учитывались. Предполагается, что ствол является однородным и изотропным телом, при этом материал ствола обладает упругопластическими свойствами. Вследствие скоротечности процесса влияние пороховых газов на термическое расширение канала ствола считалось пренебрежимо малым и не учитывалось.

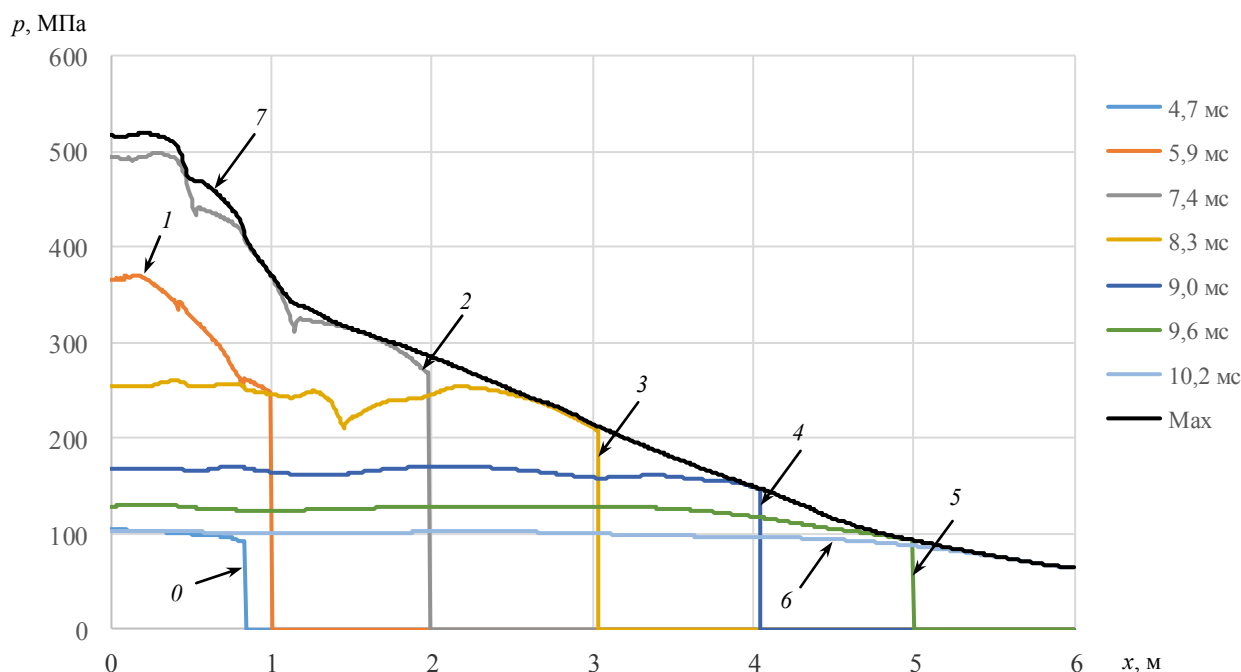


Рис. 3. Распределение давления внутри канала ствола в различные моменты времени: 0 – в момент начала движения снаряда ($t = 4,7$ мс); 1 – положение снаряда 1 м ($t = 5,9$ мс); 2 – положение снаряда 2 м ($t = 7,4$ мс); 3 – положение снаряда 3 м ($t = 8,3$ мс); 4 – положение снаряда 4 м ($t = 9,0$ мс); 5 – положение снаряда 5 м ($t = 9,6$ мс); 6 – достижение дульного среза 6 м ($t = 10,2$ мс); 7 – максимальные значения

Задача напряженно-деформированного состояния ствола рассчитывалась в программе ANSYS Autodyn 15.0 [13]. В работе использовался лагранжевый подход, который позволяет эффективно решать задачи динамического нагружения тела в случае небольших деформаций [14].

Геометрическая модель ствола была построена в ANSYS DesignModeler как трехмерное тело вращения и была разбита на 1 343 711 тетраэдрических элементов с характерным размером 0,01 м.

Использование граничных условий с динамическими пространственными характеристиками в ANSYS Autodyn 15.0 несколько затруднено необходимостью написания собственных подпрограмм. Для решения этой проблемы был разработан модуль инициализации исходных данных INBALLPRESS и расчета граничных условий на языке программирования Фортран [15]. В модуле INBALLPRESS реализована процедура загрузки исходных данных INIT_IB. Процедура INIT_IB вызывается в процедуре инициализации граничных условий EXEDIT3. В процедуре EXSTR3 производится расчет давления на границе внутри ствола с помощью линейной интерполяции табличных данных в зависимости от времени и пространственной переменной, направленной вдоль оси симметрии ствола орудия. Выгрузка результатов расчетов осуществляется с помощью процедуры EXLOAD3.

Расчет проводился на компьютере Core i7-4770K с тактовой частотой 3,5 GHz и 32 Гб оперативной памяти с операционной системой MS Windows 7

64bit. Количество итераций составило 219 520 с характерным шагом интегрирования $4,65 \cdot 10^{-5}$ мс.

В результате моделирования были получены характеристики напряженно-деформированного состояния ствола. На рис. 4 представлено распределение напряжений по стволу в различные моменты времени. Предел прочности на растяжение (Tensile Strength, Ultimate) для стали AISI 4340 составляет 1100 МПа [16]. Как видно из рис. 4, максимальные напряжения находятся ниже предела прочности для рассматриваемого случая.

Предел текучести (Tensile Strength, Yield) составляет 710 МПа [17]. В области ствола до 3,50 м (рис. 4) напряжение достигает предела текучести, что говорит о возможных проблемах, связанных с остаточными деформациями и вследствие этого повышенной изнашиваемостью ствола. Результаты исследований коррелируют с данными [18], где приводятся сведения о наибольшей изнашиваемости ствола на начальном участке движения снаряда.

На рис. 5 представлено распределение радиального расширения ствола в различные моменты времени.

Как видно из рис. 5, максимальное значение деформации в камере приблизительно равняется 0,4 мм. В канале ствола максимальный радиус уширения составляет 0,2 мм. В процентном отношении к радиусу ствола максимальная деформация составляет 0,3 %, по отношению к площади – 0,6 %. Как показано в работе [19], при износе ствола 0,4 мм скорость уменьшается на величину 0,1 % по сравнению с номинальной дульной скоростью.

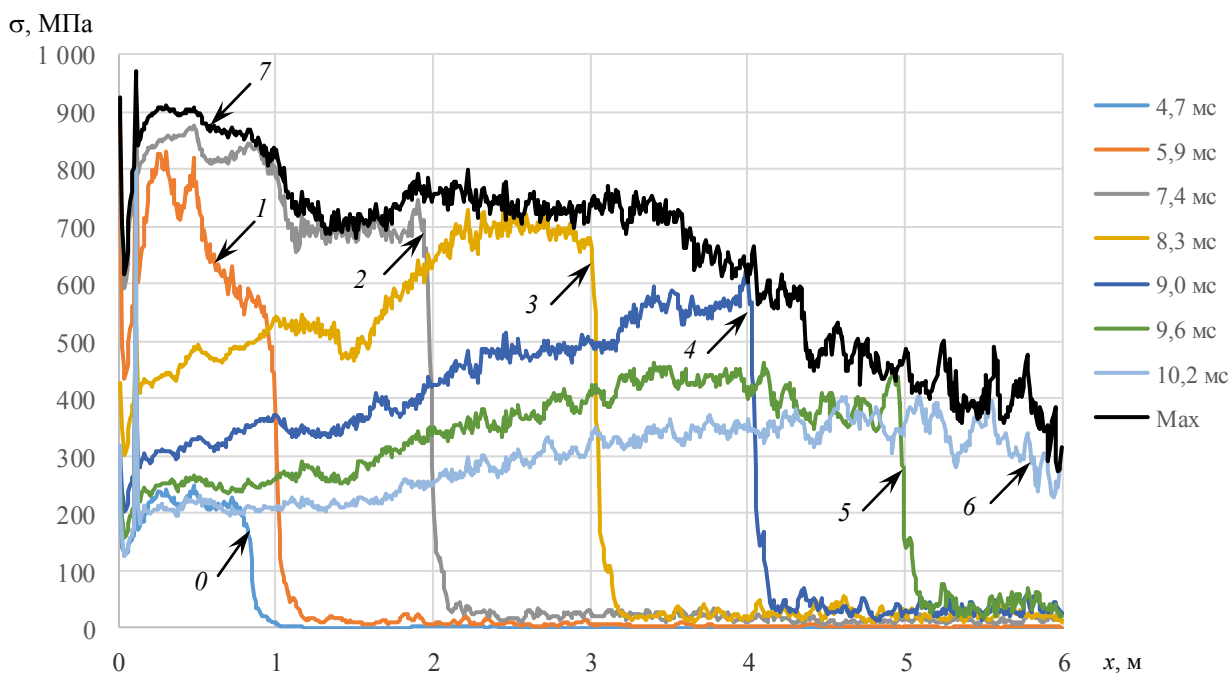


Рис. 4. Распределение напряжений в стволе в различные моменты времени: 0 – в момент начала движения снаряда ($t = 4,7$ мс); 1 – положение снаряда 1 м ($t = 5,9$ мс); 2 – положение снаряда 2 м ($t = 7,4$ мс); 3 – положение снаряда 3 м ($t = 8,3$ мс); 4 – положение снаряда 4 м ($t = 9,0$ мс); 5 – положение снаряда 5 м ($t = 9,6$ мс); 6 – достижение дульного среза 6 м ($t = 10,2$ мс); 7 – максимальные значения

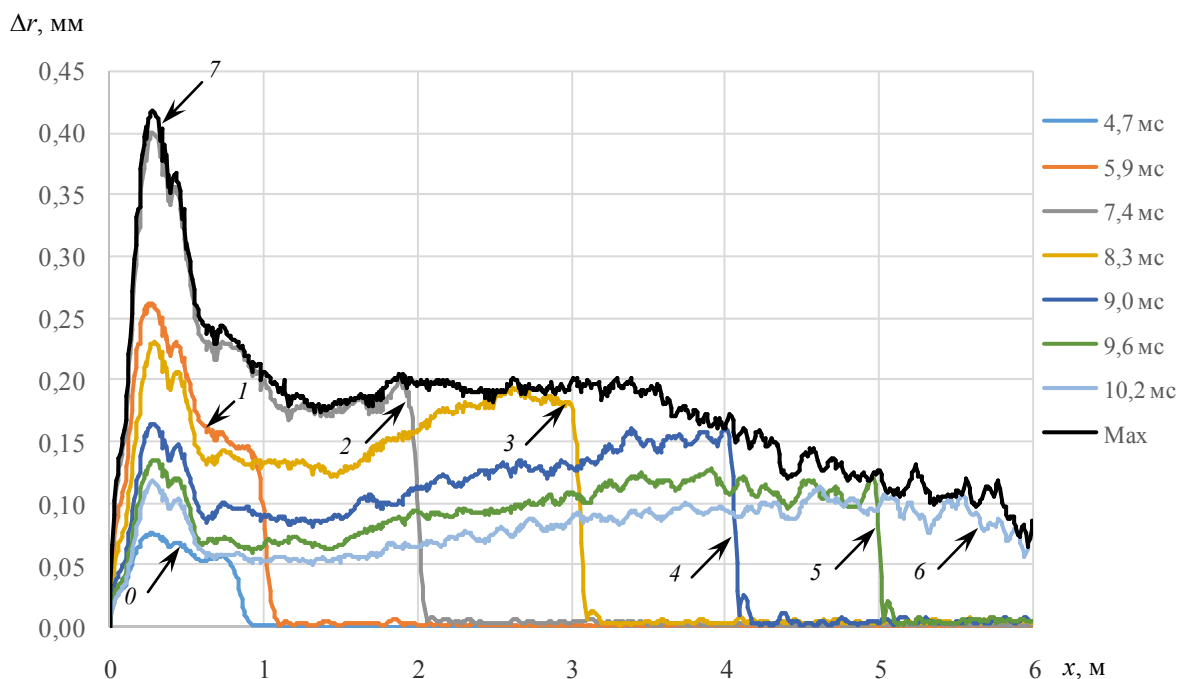


Рис. 5. Распределение радиального расширения ствола в различные моменты времени: 0 – в момент начала движения снаряда ($t = 4,7$ мс); 1 – положение снаряда 1 м ($t = 5,9$ мс); 2 – положение снаряда 2 м ($t = 7,4$ мс); 3 – положение снаряда 3 м ($t = 8,3$ мс); 4 – положение снаряда 4 м ($t = 9,0$ мс); 5 – положение снаряда 5 м ($t = 9,6$ мс); 6 – достижение дульного среза 6 м ($t = 10,2$ мс); 7 – максимальные значения

Выводы

Таким образом, на основе решения задачи о напряженно-деформированном состоянии ствола с динамическим нагружением была определена критическая область в стволе, подверженная наиболее сильным деформациям. Показано, что при динамическом нагружении возможно образование зазора между

снарядом и каналом ствола, что приводит к биению снаряда, прорыву газов и уменьшению дульной скорости снаряда.

Библиографические ссылки

1. Проектирование ракетных и ствольных систем / Б. В. Орлов, Ю. И. Топчеев, В. Ф. Устинов, В. В. Алферов,

А. И. Бакулин, В. А. Светлицкий, А. Е. Хворостин ; под ред. проф. Б. В. Орлова. – М. : Машиностроение, 1974. – 828 с.

2. *Слуцкий В. Е., Зайцев А. А.* Учет в баллистической подготовке артиллерийского комплекса деформаций ведущего пояса снаряда при выстреле // Труды Нижегородского государственного технического университета им. П. Е. Алексеева. – 2014. – № 5 (107). – С. 154–159.

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

4. *Самуль В. И.* Основы теории упругости и пластичности. – М. : Высш. шк., 1982. – 264 с.

5. Там же.

6. *Johnson G. R., Cook W. H.* Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures // Engineering Fracture Mechanics. 1985. Vol. 21. P. 31–48.

7. Autodyn Documentation. ANSYS Autodyn User's Manual. Release 15.0. ANSYS, Inc. 2013. [Электронный ресурс]. – URL: <http://148.204.81.206/ANSYS/150/> (дата обращения: 16.05.2016).

8. *Русяк И. Г., Липанов А.М., Ушаков В. М.* Физические основы и газовая динамика горения порохов в артиллерийских системах. – М. ; Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2016. - 456 с.

9. *Русяк И. Г., Ищенко А. Н., Касимов В. З., Суфиянов В. Г., Ермолаев М. А.* Программный комплекс моделирования артиллерийского выстрела // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56; № 6–3. – С. 51–57.

10. AISI 4000 Series Steel // ASM Aerospace Specification Metals Inc. – URL: <http://asm.matweb.com/> (дата обращения: 16.05.2016).

11. Autodyn Documentation. ANSYS Autodyn User's Manual. Release 15.0. ANSYS, Inc. 2013. [Электронный ресурс]. – URL: <http://148.204.81.206/ANSYS/150/> (дата обращения: 16.05.2016).

12. *Русяк И. Г., Липанов А.М., Ушаков В. М.* Физические основы и газовая динамика горения порохов в артиллерийских системах. – М. ; Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2016. - 456 с.

13. Autodyn Documentation. ANSYS Autodyn User's Manual. Release 15.0. ANSYS, Inc. 2013. [Электронный ресурс]. – URL: <http://148.204.81.206/ANSYS/150/> (дата обращения: 16.05.2016).

14. *Белов Г.* Использование программного комплекса ANSYS AUTODYN при расчете средств защиты на воздействие от взрыва и баллистического удара // «ANSYS Advantage. Русская редакция». – 2009. – № 10. – С. 5–10. – URL: <http://www.ANSYSadvantage.ru/> (дата обращения: 16.05.2016).

15. *Бартеньев О. В.* Современный Фортран. – М. : ДИАЛОГ-МИФИ, 2000. – 449 с.

16. AISI 4000 Series Steel // ASM Aerospace Specification Metals Inc. – URL: <http://asm.matweb.com/> (дата обращения: 16.05.2016).

17. Там же.

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

19. *Слуцкий В. Е., Зайцев А. А.* Учет в баллистической подготовке артиллерийского комплекса деформаций ведущего пояса снаряда при выстреле // Труды Нижегородского государственного технического университета им. П. Е. Алексеева. – 2014. – № 5 (107). – С. 154–159.

V. G. Suphiyanov, PhD (Physics and Mathematics), Kalashnikov ISTU

Mathematical Modelling of Stress-Strain State of Gun Barrel at Shot

The article describes the dynamic pressure of powder gases impact on the stress-strain state of the artillery gun barrel. A mathematical model is considered for the stress-strain state of the barrel with the boundary conditions obtained as a result of solving the internal ballistics problem in the gas-dynamic formulation for the combined charges. The influence of variable pressure on parameters of the stress-strain state for a smoothbore gun is investigated.

Keywords: artillery shot, stress-strain state, gun barrel, dynamic boundary conditions.

Получено: 24.05.16