

УДК 519.8

doi: 10.53816/20753608\_2025\_2\_106

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТРЕЛКОВОГО ОРУЖИЯ  
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПАТРОНА С КОМПОЗИТНОЙ ГИЛЬЗОЙ**

**METHODOLOGY FOR EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF SMALL ARMS  
WHEN USING A CARTRIDGE WITH A COMPOSITE SLEEVE**

*По представлению чл.-корр. РАРАН В.И. Волчихина*

*Д.В. Бакланов, С.А. Куканов*

*Филиал ВА МТО им А.В. Хрулева (г. Пенза)*

*D.V. Baklanov, S.A. Kukanov*

Статья посвящена разработке методики оценки эффективности стрелкового оружия при использовании патрона с композитной гильзой. Доказано, что существующие на сегодняшний день математические модели и методики не учитывают наличие стыков разнородных участков материала патронов с композитной гильзой и их поперечного силового набора.

**Ключевые слова:** композитная гильза, матрица Адамара, механические свойства, эффективность, касательные напряжения.

The article is devoted to the development of a methodology for evaluating the effectiveness of small arms when using a cartridge with a composite sleeve. It is proved that the currently existing mathematical models and techniques do not take into account the presence of joints of heterogeneous sections of the material of cartridges with a composite sleeve and their transverse power set.

**Keywords:** composite sleeve, Hadamard matrix, mechanical properties, efficiency, tangential stresses.

Анализ боевых действий специальной военной операции на территории ЛНР, ДНР и Украины показывает, что стрелковое оружие, обладающее высокой эффективностью стрельбы, позволяет выполнить поставленную огневую задачу качественно, своевременно и с наименьшим расходом боеприпасов, что в свою очередь влияет на успешный исход боевой задачи в целом [1].

За счет динамичного развития беспилотной авиации происходит непрерывное ведение разведки с воздуха. По этой причине возник-

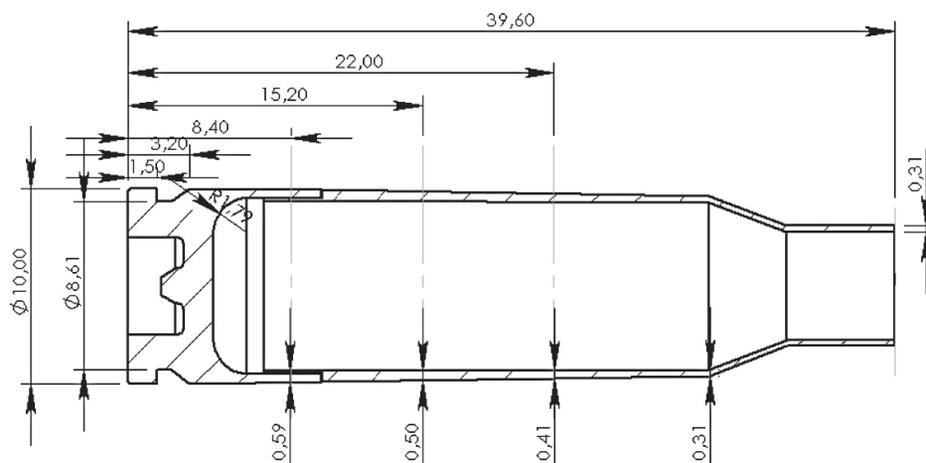
ла жизненная необходимость в рассредоточении живой силы и ВВСТ, а также более эффективной маскировки. Для ведения наступательных действий в сложных условиях пересеченной местности, в лесных массивах и городах стал также применяться метод штурма малыми группами с высокой интенсивностью волновой атаки на большую глубину позиций противника, что говорит об увеличении времени пребывания стрелка под физической нагрузкой с повышенным запасом боекомплекта при вооружении [1].

Очевидно, что вопрос определения и исследования путей повышения эффективности стрелкового оружия, не изменяя его конструктивных особенностей необходимо решить за счет использования патрона с композитной гильзой. Повысить точность и кучность стрельбы, которая достигается: снижением теплопередачи от тела композитной гильзы патроннику; поддержанием канала ствола в чистом состоянии от нагара.

Анализ напряжений, возникающих при работе композитной гильзы в ее стенках во время выстрела, показывает, что гильза находится в условиях сложного трехосного напряженно-деформированного состояния. В процессе деформирования гильзы во время выстрела основные активные силы, действующие на композитную гильзу, создаются давлением пороховых газов. В данной ситуации особое внимание необходимо уделить упругопластическим свойствам материала для обеспечения его прочности и термоустойчивости и в тот же момент необходимо учесть плотность материала при заданной толщине стенки для снижения массы гильзы. Важно отметить, что пластик имеет свойства впи-

тывать влагу и при стрельбе дает повышенное содержание нагара на стенках канала ствола стрелкового оружия. Для исключения этих негативных факторов необходимо рассмотреть вопрос применения фторида графена в пороховой навеске композитного боеприпаса. На основании требований ТТЗ и условий моделирования проведена оценка влияния геометрических параметров гильзы на прочность и их оптимизация (рис. 1).

На основе выбранного типа конструктивного соединения частей композитной гильзы проведен выбор геометрических характеристик стенки гильзы с использованием теории планирования для достижения требуемого уровня эффективности. С учетом полученных данных определено, что наибольшее влияние на прочность материала гильзы оказывает совокупность факторов давления и толщины стенки. Механические свойства композиционных материалов, армированных непрерывным волокном, демонстрируют ортотропное поведение в макроскопическом масштабе. В цилиндрических координатах их взаимосвязь «напряжение — деформация» выражена следующим уравнением [2]:



а

Уровни и интервал варьирования	$\eta = X_1$ мм	$\theta = X_2$ мм	$P = X_3$ МПа	$\rho = X_4$ г/мм <sup>3</sup>
Верхний уровень	0,99	0,93	375	0,00135
Основной уровень	0,79	0,62	295	0,0009
Нижний уровень	0,59	0,31	215	0,00045
Интервал	0,59	0,31	80	0,00045

б

Рис. 1. Оценка влияния геометрических параметров гильзы на прочность и их оптимизация: а — эскиз композитной гильзы; б — факторы и интервалы варьирования

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_\theta \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{\theta z} \\ \gamma_{rz} \\ \gamma_{r\theta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_r & -v_{r\theta}/E_\theta & -v_{rz}/E_z \\ -v_{\theta r}/E_r & 1/E_\theta & -v_{\theta z}/E_z \\ -v_{zr}/E_r & -v_{z\theta}/E_\theta & \\ \\ \\ \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_\theta \\ \sigma_z \\ \tau_{\theta z} \\ \tau_{rz} \\ \tau_{r\theta} \end{Bmatrix},$$

$$\begin{matrix} 1/G_{\theta z} \\ \\ \\ 1/G_{rz} \\ \\ 1/G_{r\theta} \end{matrix}$$

где  $E_r, E_\theta, E_z$  представляют собой упругие модули материала в радиальном, тангенциальном и осевом направлениях соответственно, а  $v_{r\theta}, v_{rz}, v_{\theta z}$  представляют собой соответствующие коэффициенты Пуассона на соответствующих плоскостях.  $G_{r\theta}, G_{rz}$  и  $G_{\theta z}$  представляют собой соответствующие модули сдвига на соответствующих плоскостях.

Для ортотропных материалов

$$\frac{v_{r\theta}}{E_\theta} = \frac{v_{\theta r}}{E_r}; \quad \frac{v_{rz}}{E_z} = \frac{v_{zr}}{E_r}; \quad \frac{v_{r\theta}}{E_z} = \frac{v_{r\theta}}{E_\theta}.$$

При стрельбе патрон подвергается деформации под действием давления в патроннике за предельно короткий промежуток времени, необходимо учитывать изменения конститутивной модели материала при его ударе. В настоящее время преобладающим подходом является калибровка конструктивной модели в динамических условиях путем проведения соответствующих динамических испытаний, что позволяет определить изменения материальных параметров композиционных материалов при высоких скоростях деформации по сравнению с теми, которые получены в условиях квазистатического нагружения [3, 4].

Матрица модулей описывалась в квазистатических условиях как

$$\mathbf{E}_0 = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_r & \mathbf{v}_{\theta z} & \mathbf{G}_{\theta z} \\ \mathbf{E}_\theta & \mathbf{v}_{rz} & \mathbf{G}_{rz} \\ \mathbf{E}_z & \mathbf{v}_{r\theta} & \mathbf{G}_{r\theta} \end{bmatrix}.$$

Вводилась поправочная матрица, учитывающая зависимость скорости деформации

$$\lambda_m = \begin{bmatrix} \lambda_{E_r}(\dot{\varepsilon}) & \mathbf{1} & \lambda_{G_{\theta z}}(\dot{\varepsilon}) \\ \lambda_{E_\theta}(\dot{\varepsilon}) & \mathbf{1} & \lambda_{G_{rz}}(\dot{\varepsilon}) \\ \lambda_{E_z}(\dot{\varepsilon}) & \mathbf{1} & \lambda_{G_{r\theta}}(\dot{\varepsilon}) \end{bmatrix}.$$

Матрица динамических модулей, учитывающая зависимость скорости деформации, выражалась как произведение Адамара матрицы квазистатических модулей  $E_0$  и матрицы коррекции скорости деформации [5]

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_R = \lambda_m \mathbf{E}_0 &= \begin{bmatrix} \lambda_{E_r}(\dot{\varepsilon}) \mathbf{E}_r & \mathbf{1} & \lambda_{G_{\theta z}}(\dot{\varepsilon}) \mathbf{G}_{\theta z} \\ \lambda_{E_\theta}(\dot{\varepsilon}) \mathbf{E}_\theta & \mathbf{1} & \lambda_{G_{rz}}(\dot{\varepsilon}) \mathbf{G}_{rz} \\ \lambda_{E_z}(\dot{\varepsilon}) \mathbf{E}_z & \mathbf{1} & \lambda_{G_{r\theta}}(\dot{\varepsilon}) \mathbf{G}_{r\theta} \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \mathbf{E}_r^R & \mathbf{v}_{\theta z} & \mathbf{G}_{\theta z}^R \\ \mathbf{E}_\theta^R & \mathbf{v}_{rz} & \mathbf{G}_{rz}^R \\ \mathbf{E}_z^R & \mathbf{v}_{r\theta} & \mathbf{G}_{r\theta}^R \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Далее рассматривалась модель функции динамического отклика композитной гильзы. При выстреле патрон удерживается патронником и автоматикой, в связи с чем осевая деформация не учитывалась.

Осевыми напряжениями патрона пренебрегалось, радиальная деформация  $\varepsilon_r$  и осевая деформация  $\varepsilon_\theta$  представлялись как

$$\begin{cases} \varepsilon_r = \frac{1}{E_r^R} \sigma_r - \frac{v_{r\theta}}{E_\theta^R} \sigma_\theta \\ \varepsilon_\theta = \frac{1}{E_\theta^R} \sigma_\theta - \frac{v_{\theta r}}{E_r^R} \sigma_r \end{cases}.$$

Вводились уравнения геометрической деформации

$$\left\{ \begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{|dr + (u + du) - u| - dr}{dr} = \frac{du}{dr} \\ \varepsilon_\theta &= \frac{(r + u)d\theta - rd\theta}{rd\theta} = \frac{u}{r} \end{aligned} \right\}.$$

Тогда

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{E_r}{1 - \nu_{r\theta}\nu_{\theta r}} \left( \frac{du}{dr} + \nu_{\theta r} \frac{u}{r} \right) \\ \sigma_\theta &= \frac{E_\theta}{1 - \nu_{r\theta}\nu_{\theta r}} \left( \nu_{r\theta} \frac{du}{dr} + \frac{u}{r} \right) \end{aligned} \right\}.$$

При динамическом нагружении общий вид уравнения равновесия элементарного тела описывался как

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta r}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{zr}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + f_r &= m \frac{d^2 u_r}{dt^2} \\ \frac{\partial \sigma_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{z\theta}}{\partial z} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} + f_\theta &= m \frac{d^2 u_\theta}{dt^2} \\ \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\tau_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} + f_z &= m \frac{d^2 u_z}{dt^2} \end{aligned} \right\}.$$

Для толстостенного цилиндра, находящегося под действием только внутреннего давления и пренебрегающего действием объемной силы и касательного напряжения, радиальные и окружные напряжения удовлетворяли

$$\begin{aligned} & \left( \sigma_r + \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} dr \right) (r + dr) d\theta - \\ & - \sigma_r r d\theta - 2\sigma_\theta dr d\theta \sin \frac{d\theta}{2} = \\ & = \frac{1}{2} \rho \left[ (r + dr)^2 - r^2 \right] a_r, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} dr &= d\sigma_r; \\ \sin \frac{d\theta}{2} &\approx \frac{d\theta}{2}; \\ \frac{1}{2} \rho \left[ (r + dr)^2 - r^2 \right] &= m, \quad a_r = \frac{d^2 u_r}{dt^2}. \end{aligned} \quad (1)$$

Упрощая, имелось

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = \rho a_r. \quad (2)$$

Объединяя уравнения (1) и (2), получено

$$\begin{aligned} & \frac{E_r^R}{1 - \nu_{r\theta}\nu_{\theta r}} \frac{d^2 u_r}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{E_r^R}{1 - \nu_{r\theta}\nu_{\theta r}} \frac{du_r}{dr} - \\ & - \frac{E_\theta^R}{1 - \nu_{r\theta}\nu_{\theta r}} \frac{u_r}{r^2} = \rho a_r. \end{aligned}$$

Учитывались граничные условия

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_r |_{r=r_a} &= -P(t_0) \\ \sigma_r |_{r=r_b} &= 0 \end{aligned} \right\}.$$

Предполагалось, что контактное давление между патроном и патронником равно  $P_c$ , радиальная деформация внутренней стенки патронника выражалась как [6]

$$u_r = P_c \frac{1}{E} \frac{R_a^2}{R_b^2 - R_a^2} \left[ (1 - \nu) R_a + (1 + \nu) \frac{R_b^2}{R_a} \right].$$

Механические свойства композитных материалов, армированных стекловолокном, более существенно зависят от скорости деформации в направлении укладки волокон, в то время как углеродные волокна демонстрируют поведение, не зависящее от скорости деформации [7]. Поэтому для композитного тела гильзы из стекловолокна проводилась коррекция свойств материала в радиальном направлении

$$\lambda_{E_\theta}(\dot{\varepsilon}) = \lambda_{E_r}(\dot{\varepsilon}) = 1 + \lambda \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right),$$

где  $\lambda_{E_\theta}$  — жесткость материала в радиальном направлении в цилиндрических координатах;  $\lambda_{E_r}$  — жесткость материала в осевом направлении в цилиндрических координатах;  $\dot{\varepsilon}$  — скорость деформации;  $\dot{\varepsilon}_0$  — предельная скорость деформации, которая служит эталоном для сравнения с текущей скоростью деформации.

Механические свойства среднеуглеродистой низколегированной стали и полиамида PA612 описывались с помощью конститутивной модели Джонсона — Кука [8]. Общая форма

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \cdot \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{ref}} \right) \right] \cdot (1 - T^{*m}),$$

где  $\sigma$ ,  $\varepsilon$ ,  $\dot{\varepsilon}_{ref}$  представляют собой напряжения, пластическую деформацию и эталонную скорость деформации соответственно.  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $n$  и

**Параметры материалов численного моделирования**

Материалы	$E$ , ГПа	$\rho$ , (кг·мм <sup>3</sup> )	$\mu$	$\sigma_r$ , МПа	$\tau$
Среднеуглеродистая низколегированная сталь	210	7,85E-6	0,3	535	1,0
Полиамид РА612 с 70 % армированной добавкой из стекловолокна	430	1,3E-6	0,49	65	0,86

$m$  — константы материалов, а  $T^*$  — температурный показатель.

Параметры механических моделей среднеуглеродистой низколегированной стали и полиамида РА612 с 70 % армированной добавкой из стекловолокна, нейлона 6/6 и модифицированной нейлоновой смолы 612, а также квазистатические механические свойства углеродноволонистых композиционных материалов представлены в таблице.

Данная задача решалась в два этапа. На первом этапе путем математического моделирования приведенной жесткости контакта донной части и тела гильзы, позволяющего спрогнозировать коэффициент прочности не только по всей длине композитной гильзы, но и на стыке двух различных по свойствам материалов (рис. 2).

Аналитический расчет приведенной жесткости в области соединения донной части и тела гильзы показал результаты с погрешностью не более 5 % с расчетами численного метода.

На втором этапе путем математического моделирования теплопередачи от стенки композитной гильзы к стенке патронника, позволяющего спрогнозировать распределение тем-

ператур внутри композитной гильзы и от ее стенок патроннику при определении начальных и граничных условий, а также теплофизических свойств материала, из которого изготовлена гильза. Нестационарный тепловой анализ позволил оценить меняющийся во времени отклик (реакцию) системы «гильза — патронник», сопровождающуюся процессами нагревания и охлаждения. Параметры потока, такие как температура отсчета и скорость потока, рассчитывались гипотезой Лагранжа в сочетании с внутренними баллистическими результатами и рассматривались как граничные условия третьего рода. Модель оценки теплопередачи от стенки композитной гильзы к стенке патронника представлена на рис. 3.

Оценка эффективности стрелкового оружия при использовании патрона с композитной гильзой проводилась по радиусу рассеивания  $r_{50}$ . Результаты оценки эффективности представлены на рис. 4. Результаты стрельбы показали, что при использовании композитных гильз, за счет снижения теплового расширения стенок канала ствола кучность стрельбы при поражении цели увеличивается на 8,5 %.

Таким образом, разработана методика оценки эффективности стрелкового оружия при использовании патрона с композитной гильзой, новизна которой заключается в применении новых математических моделей, которые учитывают ранее не изученные параметры и физические процессы, происходящие в автоматическом стрелковом оружии при использовании патронов с композитными гильзами и фторидом графена в их пороховой навеске, а также в сочетании математического моделирования с экспериментальными исследованиями, которое позволяет не только теоретически предсказать результаты, но и подтвердить их на практике.

Разработанная методика позволяет на этапе проектирования:

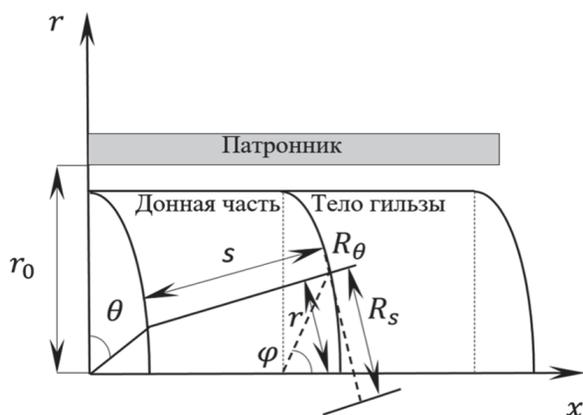


Рис. 2. Расчетная схема для определения начальных и граничных условий в области стыка донной части и тела композитной гильзы

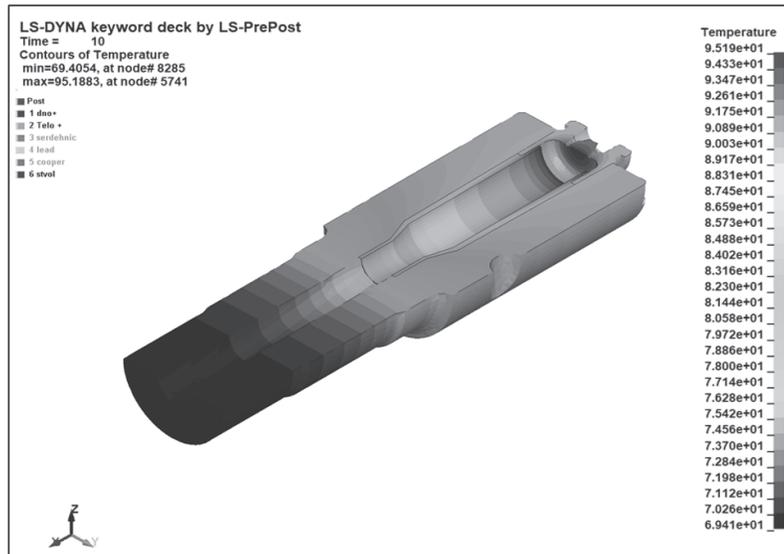


Рис. 3. Модель оценки теплопередачи от стенки композитной гильзы к стенке патронника

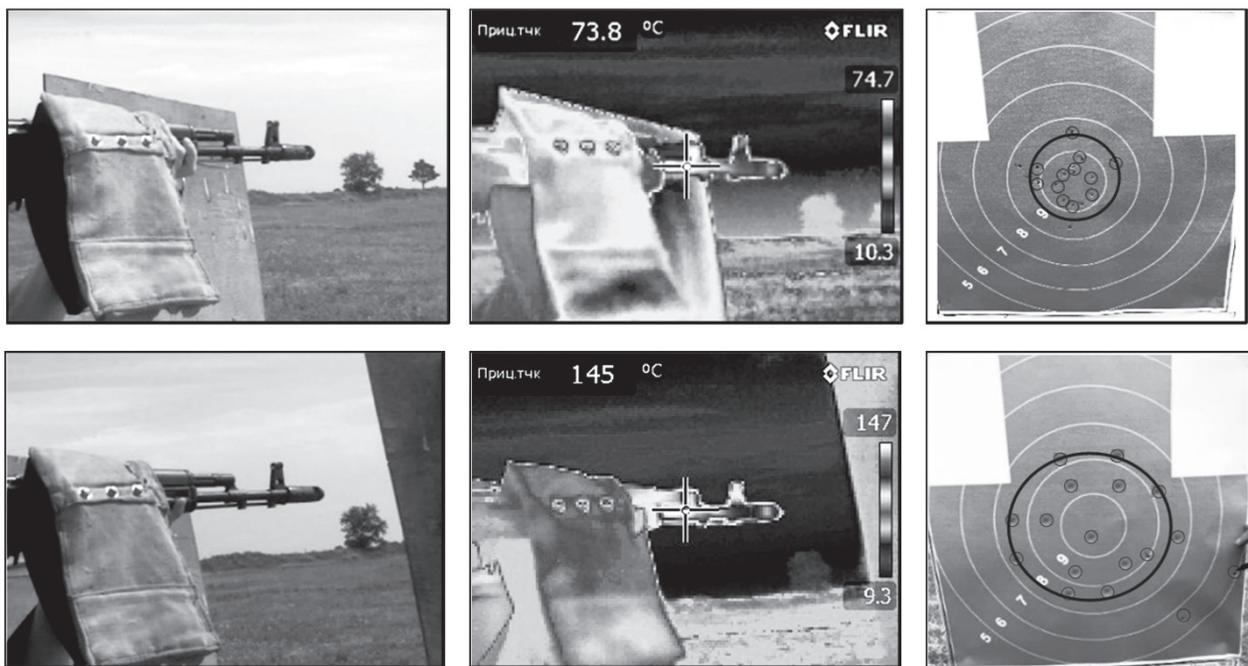


Рис. 4. Оценка эффективности стрелкового оружия при использовании патрона с композитной гильзой

1) осуществить выбор материала композитной гильзы, который выдерживает динамические и температурные нагрузки в патроннике при выстреле;

2) придать телу гильзы гидрофобность и провести очистку канала ствола выстрелом, сохраняя его боевые характеристики;

3) снизить среднюю массу 5,45-мм патрона с композитной гильзой на 22,45 %;

4) рассчитать коэффициент прочности на стыке различных материалов и повысить точность расчетных данных в сравнении с экспериментальными исследованиями на 10 %. На этапе применения оценить:

1) температуру нагрева ствола при стрельбе патронами с композитными гильзами;

2) ударные нагрузки на композитную гильзу во время выстрела;

3) кучность стрельбы за счет снижения температуры нагрева ствола и веса боекомплекта при вооружении.

Результатом применения научно-методического аппарата являются полученные значения характеристик и свойств композитной гильзы и фторида графена в ее пороховой навеске.

Таким образом, разработанная методика позволяет определять геометрические характеристики и способы соединения частей композитной гильзы, обеспечивающие ее функционирование в цикле автоматики и оказывающие влияние на снижение температуры нагрева ствола при стрельбе, за счет чего кучность стрельбы повышается до 18,1 %.

Использование методики дает возможность анализировать параметры толщины стенки композитной гильзы и объемные соотношения донной части к телу гильзы с учетом обеспечения осевой деформации и контактного давления до наступления предела прочности материала, а также сократить материальные затраты и время на разработку новых и модернизацию существующих композитных гильз к стрелковому оружию. Данная методика базируется на полной адекватности математических моделей оценки и выбора прочности композитной гильзы при заданной толщине стенки.

#### Список источников

1. Бакланов Д.В. Снижение веса боекомплекта, как фактор повышения эффективности стрел-

кового оружия. Всероссийская научно-практ. конф. «Проблемы развития стрелковой отрасли в Российской Федерации». Ижевск: ИжГТУ им. М.Т. Калашникова, 2024. С. 122–130.

2. Сметанников О.Ю., Труфанов Н.А., Шардаков И.Н. Определяющие соотношения термомеханического поведения полимерных материалов в условиях стеклования и размягчения // Известия РАН. Механика твердого тела. 1997. № 3. С. 106–114.

3. Gonzalez Jr. J.R.: Internal ballistics optimization. Kansas State University Manhattan Department of Mechanical Engineering (1990). 154 p.

4. Gupta V.K.: Internal ballistics of high velocity special purpose guns. Def. Sci. J. 1976. 26 (3). Pp. 133–142.

5. Колесников Ю.В., Морозов Е.М. Механика контактного разрушения. М.: Наука, 1989. 312 с.

6. Ванин Г.А. и др. Современные методы испытаний композиционных материалов // Научно-методический сборник. НТП-4-92; под ред. А.П. Гусенкова. М.: МНТК «Надежность машин», 1992. 247 с.

7. Грузь А.Н. и др. Механика композитных материалов и элементов конструкций: в 3-х т. Т. 2. Механика элементов конструкций. Киев: Наукова думка, 1983. 464 с.

8. Тихомирова К.А., Труфанов Н.А., Шардаков И.Н. Численное и экспериментальное исследование термомеханического поведения стеклующихся полимеров в случае больших деформаций // Вычислительная механика сплошных сред. 2013. Т. 6. № 4. С. 475–482.