

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тульский государственный университет»**

**16+
ISSN 2071-6168**

**ИЗВЕСТИЯ
ТУЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА**

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Выпуск 4

**Тула
Издательство ТулГУ
2024**

Черненко Андрей Владимирович, доцент, канд. экон. наук, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

TOOLS OF SIMULATION MODELING SYSTEMS

A.V. Rechinskiy, K.K. Semenov, V.A. Sushnikov, L.V. Chernenkaya, A.V. Chernenkii

The basics of building simulation modeling systems, the stages of development, and the features of system implementation are discussed. Simulation modeling is a crucial and most responsible component in the decision-making process and is used in combination with other software to make decisions in information systems for different purposes. The basic concepts are presented, along with the mathematical foundations of simulation modeling, and the main stages in their development are described. The directions for development and the implementation features of simulation modeling are also discussed. Special emphasis is placed on the discussion of simulation tools and examples of their usage.

Key words: expert system, knowledge base, decision-making, quality, consulting expert system.

Rechinskiy Alexander Vitalievich, candidate of technical sciences, vice-rector on economy and finances, Russia, St. Petersburg, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,

Semenov Konstantin Konstantinovich, candidate of technical sciences, docent, Russia, St. Petersburg, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,

Sushnikov Viktor Alexandrovich, candidate of technical sciences, docent, Russia, St. Petersburg, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,

Chernenkaya Liudmila Vasilievna, doctor of technical science, professor, Ludmila@qmd.spbstu.ru, Russia, St. Petersburg, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,

Chernenkii Andrei Vladimirovich, candidate of economic sciences, docent, Russia, St. Petersburg, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

УДК 623.4

DOI: 10.24412/2071-6168-2024-4-129-130

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УМЕНЬШЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ГРАДИЕНТА СТВОЛА СТРЕЛКОВОГО ОРУЖИЯ ЗА СЧЕТ ОПТИМИЗАЦИИ СОСТАВА СФЕРИЧЕСКОГО ПОРОХА

Ф.А. Савченко, Д.В. Бакланов, Е.И. Минаков, А.С. Ишков

Суть исследования заключалась в определении необходимой навески в сферическом порохе добавки фторида графена, которые были проведены с помощью манометрической бомбы. В результате определены массовые характеристики компонентов при условии сохранения коволюма и силы пороха для боевого патрона, проанализированы и изучены химический состав и микроструктуры фторированного графена. Результаты показали, что добавление небольшого количества фторированного графена в пороховую навеску или на внутреннюю стенку композитной гильзы значительно улучшало ее прочность на растяжение, блокировало проникновение коррозионного агента по всей плоскости стенки стали.

Ключевые слова: фторид графена, супергидрофобность, крекерный метод, манометрическая бомба, сила пороха.

Известные экспериментальные исследования [1] показали, что добавка фторида графена в пороховую навеску приводит к снижению температуры горения пороха и может повлиять на снижение разгарно-эрозийного разрушения канала ствола и патронника при стрельбе. Между тем отмечается, что фторированный графен оказывает значительное влияние на механические свойства, стали и долгосрочную коррозионную стойкость, а также приводит к появлению такого свойства пластика как гидрофобность. При этом производительность покрытия будет ухудшаться с увеличением объема фтора.

Фторированный графен является новым производным графена. По сравнению с простым графеном, фторированный графен обладает низкой поверхностной энергией, высокой химической стабильностью, высокой устойчивостью к трению и отличными изоляционными свойствами благодаря ковалентной связи C-F, образованной на поверхности графена с режимом гибридизации атомов углерода, измененным sp^2 на sp^3 [2,3]. Min, C. [4] утверждает, что добавление фторированного графена в смазочное масло может значительно увеличить износостойкость и несущую способность смазочного масла. Bharathidasan, T. [5] успешно изготовил порошковое покрытие из оксида графена с фторированным графеном и льдом с углом контакта $173,7^\circ$. Yang, Z. [6] изготовил пленку фторида графена на поверхности эпоксидного покрытия, что сделало поверхность супергидрофобной. Согласно ограниченным отчетам [7], добавка фторированного графена может значительно улучшить долгосрочную коррозионную и прочностную стойкость покрытия, и количество добавки фтора является важным фактором.

Для проведения исследований с помощью манометрической бомбы, подготовки к проведению сжигания пороховой навески составлен план проведения эксперимента, представленный на рис. 1.

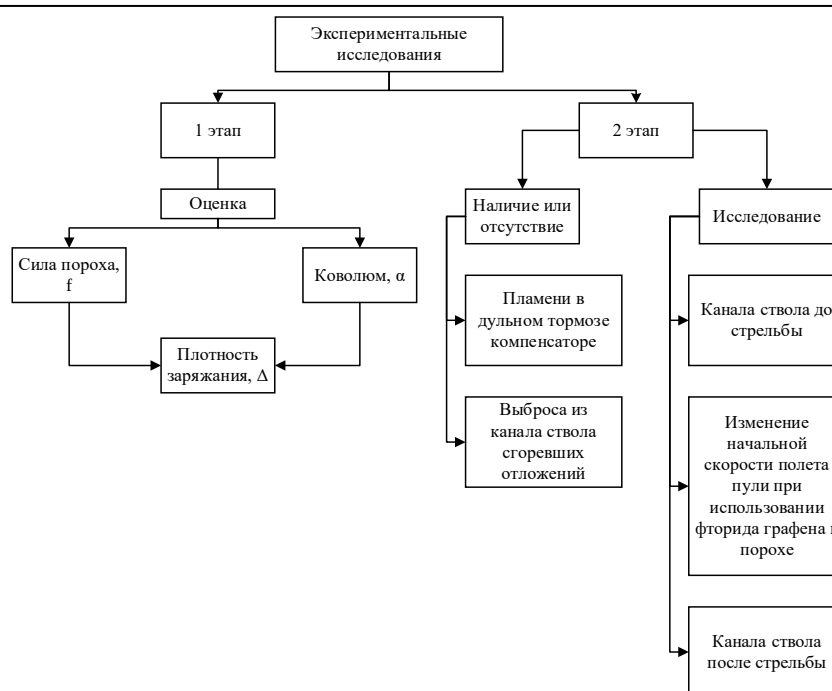


Рис. 1. План проведения эксперимента на манометрической бомбе

На первом этапе оценка силы пороха и коволюма пороховых газов при добавке в пороховую навеску дополнительного окислителя проведена на манометрической бомбе кафедры (порохов и взрывчатых веществ) Пензенского филиала ВА МТО, внешний вид которой представлен на рис. 2. В ходе проведения эксперимента использовался порох 1,44 ССНф для основного заряда и ДРП для воспламенителя.



Рис. 2 Манометрическая бомба

Смешивание фторида графена с порохом (рис.3) проводились механическим путем в спиртовой ванне. После просушки наблюдались образования в виде хлопьев, причем различное содержание фтора оказывало значительное влияние на морфологию покрытия представленную на рис. 4.



Рис. 3. Процесс смешивания фторида графена с порохом

Графеновые хлопья с низким содержанием фтора (рис. 4 а, с) являются высокоагломерированными порошками с некоторыми сжимаемыми структурами отшелушивания. Размер хлопьев колеблется от субмикрона до нескольких микрон [9]. Края частиц фторированного графена неровные, а слои слегка разделены на свободные формы. Однако, поскольку содержание фтора достигает 48,3 %, есть некоторые более мелкие графеновые нанолиты в размере микроскопической морфологии и имеют аморфную тонкослойную структуру, что может быть вызвано высоким содержанием фтора.

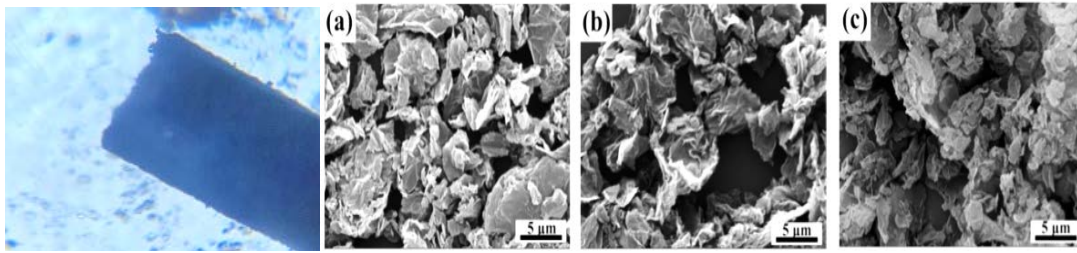


Рис. 4. Морфология фторида графена на поверхности пороховой частицы: а – содержание фтора 19,7 %, б – содержание фтора 29,0 %, с – содержание фтора 48,3 %

В качестве основополагающего метода измерения максимального давления был выбран крешерный метод. Измерения деформации медных крешерных столбиков проводились с применением микрометра и по таражной таблице определялось максимальное давление при сгорании пороха в закрытом объеме.

Массу заряда рассчитывали по формуле:

$$\omega = \Delta \cdot W_0, \quad (1)$$

где Δ – плотность заряжения; W_0 – свободный объем камеры манометрической бомбы до помещения в нее заряда.

Масса воспламенителя:

$$\omega_B = W_0 \left(1 - \frac{\Delta}{\rho}\right) \cdot \frac{p_B}{F_g + \alpha_g p_g}, \quad (2)$$

где p – плотность пороха; F_g, α_g – сила воспламенительного состава и коволюм пороховых газов воспламенительного состава; p_g – давление воспламенителя; W_0 – объем манометрической бомбы; Δ – плотность заряжения.



Рис. 5. Подготовка воспламенителя и порохового заряда

Сила пороха:

$$F = \frac{p_{m1}}{\Delta_1} - \alpha \cdot p_{m1} = \frac{p_{m2}}{\Delta_2} - \alpha \cdot p_{m2}, \quad (3)$$

где p_{m1}, p_{m2} – максимальные давления в опытах при плотностях заряжения Δ_1, Δ_2 .

Коволом пороховых газов:

$$\alpha = \frac{\frac{p_2}{\Delta_2} - \frac{p_1}{\Delta_1}}{p_2 - p_1}. \quad (4)$$

Результаты оценка силы пороха и коволюма пороховых газов при добавке в пороховую навеску дополнительного окислителя в виде фторида графена приведены на рис. 6 и в таблице 1.

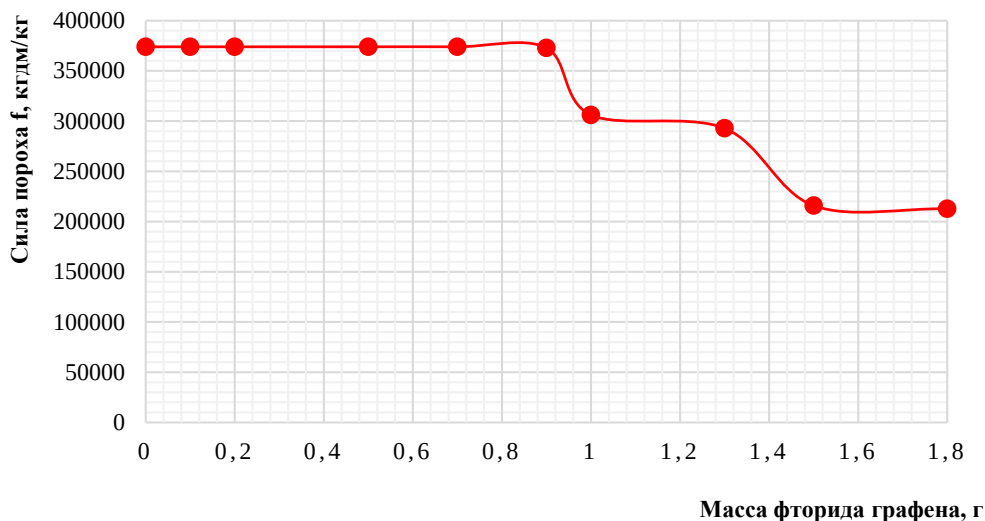


Рис. 6. Изменение силы пороха в зависимости от массовой добавки фторида графена

Таблица 1

Результаты численного эксперимента по влиянию фторида графена на силу пороха и ковалюм пороховых газов

Характеристики	Опыт 1		Опыт 2		Опыт 3		Опыт 4		Опыт 5	
Масса заряда ω , г.	2,5	3,0	2,5	3,0	2,5	3,0	2,5	3,0	2,5	3,0
Масса воспламенителя $\omega_{в.}$, кг.	0,0005		0,0005		0,0005		0,0005		0,0005	
Масса фторида графена M , кг.	0		0,00001		0,00002		0,00005		0,00007	
Давление P_{m1} , кг/дм ²	106000		106000		106000		105980		105920	
Давление P_{m2} , кг/дм ²	130700		130700		130700		130700		130700	
Ковлюма, м ³ /кг	0,472		0,472		0,472		0,373		0,333	
Сила пороха f , кг/дм ²	373968		373968		373968		373968		373968	
Характеристики	Опыт 6		Опыт 7		Опыт 8		Опыт 9		Опыт 10	
Масса заряда ω , г.	2,5	3,0	2,5	3,0	2,5	3,0	2,5	3,0	2,5	3,0
Масса воспламенителя $\omega_{в.}$, кг.	0,0005		0,0005		0,0005		0,0005		0,0005	
Масса фторида графена M , кг.	0,0009		0,001		0,0013		0,0015		0,0018	
Давление P_{m1} , кг/дм ²	105987		98450		89347		81234		79560	
Давление P_{m2} , кг/дм ²	130560		125324		110540		108450		105222	
Ковлюма, м ³ /кг	0,482		0,891		0,723		1,343		1,266	
Сила пороха f , кг/дм ²	373863		306082		292791		215839		212670	

В результате численного эксперимента видно, что сила пороха не снижается при добавке фторида графена в пороховую навеску до 1 грамма при плотности заряжания 2,5 и 3,0 грамма.

На втором этапе эксперимента задачей ставилось определение температурного воздействия на патронник при использовании обычной гильзы и композитной гильзы с применением на внутренней стенке фторида графена в объеме 10 % от объема пороховой навески.

Применение управляющих уравнений теплопередачи и граничных условий в качестве ограничений позволяет минимизировать решение задачи прямой теплопередачи, чувствительности и соединения [10]. Значительную роль на работу автоматики стрелкового оружия можно отнести к теплопередаче между композитной гильзой с фторидом графена и патронником, которая прямо пропорционально влияет не только на экстракцию гильзы, но и на ее разрушение во время стрельбы. Во время процесса стрельбы происходит мгновенное возгорание пороха, который образует экстремальную среду в патроннике. Максимальная температура газа достигает 2500 °С, давление 295 МПа через несколько миллисекунд. На рис.7 показана структура патронника и композитной гильзы во время выстрела. Игнорируя рифовую структуру, предположим, что патронник является аксиссимметричным толстостенным цилиндром. Градиент круговой температуры минимален по сравнению с другими направлениями, поэтому оценке будем подвергать только теплопроводность в радиальном и осевом направлении патронника. Удельную тепловую диффузию рассчитываем по следующей зависимости:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c}.$$

Патронник автомата подвергается значительным температурным колебаниям во время процесса стрельбы, поэтому нельзя игнорировать температурную зависимость от теплофизических свойств.

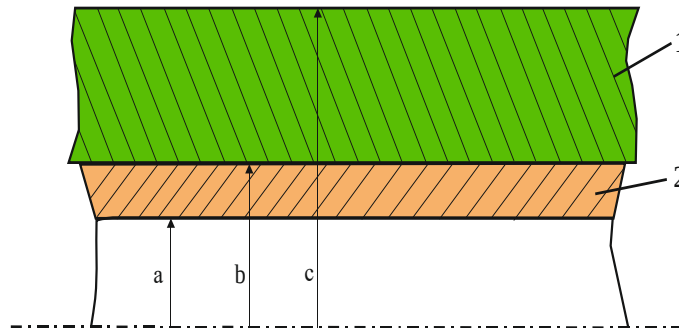


Рис. 7. Размещение композитной гильзы в патроннике стрелкового оружия: 1 – патронник; 2 – композитная гильза с фторидом графена

Из рис.7 расчет напряжений от температурного воздействия будет выглядеть следующим образом:

На внутренней стенке композитной гильзы 2, $a \leq r \leq b$.

$$\sigma_{\theta} = \frac{\alpha_1 E_1}{1-\nu_1} \left[\left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) \frac{p}{g} \int_a^b T r dr + \frac{1}{r^2} \int_a^r T r dr + \frac{\alpha_2 1-\nu_1}{\alpha_1} b^2 \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) T(b, t) - T \right],$$

$$\sigma_r = \frac{\alpha_1 E_1}{1-\nu_1} \left[\left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) \frac{p}{g} \int_a^b T r dr - \frac{1}{r^2} \int_a^r T r dr + \frac{\alpha_2 1-\nu_1}{\alpha_1} b^2 \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) T(b, t) \right],$$

$$\sigma_z = \frac{\alpha_1 E_1}{1-\nu_1} \left(\frac{2}{b^2-a^2} \int_a^b T r dr - T \right).$$

На внешнем слое патронника 1, $b \leq r \leq c$.

$$\sigma_{\theta} = -\frac{\alpha_1 E_1}{1-\nu_1} \frac{b^2}{c^2-b^2} \left(1 + \frac{c^2}{r^2} \right) \left[\left(\left(1 - \frac{a^2}{b^2} \right) \frac{p}{g} - \frac{1}{b^2} \right) \int_a^b T r dr + \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \left(1 - \nu_1 \frac{b^2-a^2}{g} T(b, t) \right) \right],$$

$$\sigma_r = \sigma_{\theta} \frac{1-(\xi)^2}{1+(\xi)^2}.$$

Примем условие, что:

$$p = \frac{E_1}{E_2} \left(\frac{c^2+b^2}{c^2-b^2} + \nu_2 \right) + \nu_1 \frac{b^2+a^2}{b^2-a^2} - 1,$$

$$g = \frac{E_1}{E_2} (b^2 - a^2) \left(\frac{c^2+b^2}{c^2-b^2} + \nu_2 \right) + b^2(1 - \nu_1) + a^2(1 + \nu_1).$$

Нестационарный тепловой анализ рассматривает меняющийся во времени отклик (реакцию) системы, сопровождающейся процессами нагревания и охлаждения [8]. Параметры потока, такие как температура отсчета и скорость потока рассчитаны гипотезой Лагранжа с учетом граничных условий третьего рода.

С помощью универсальной программной системы анализа методом конечных элементов Ansys получены результаты исследования влияния распределения температурной нагрузки во время выстрела с применением фторида графена представлены на рис.8.

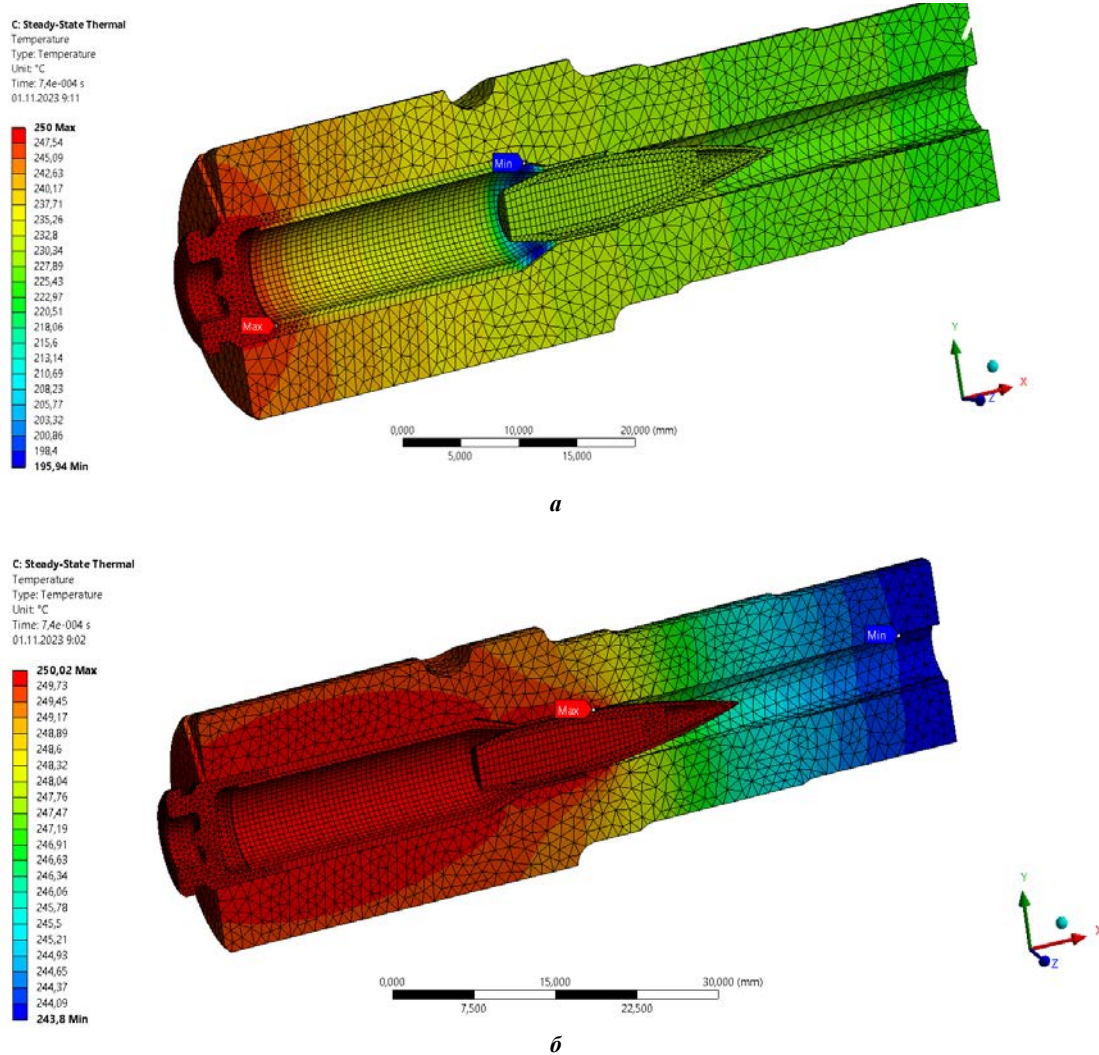


Рис. 8. Температурные нагрузки во время выстрела при использовании композитной гильзы: а – композитная гильза с фторидом графена; б – металлическая гильза

Для решения проблемы в определении распределения температур внутри композитной гильзы и от ее стенок патроннику при определении начальных и граничных условий, а также термофизических свойств материала из которого изготовлена гильза и патронник необходимо вывести коэффициент конвективной теплопередачи между телом гильзы и пороховым газом, когда известны их теплофизические свойства и геометрические размеры. В результате $\square(x, t)$ оценивается в указанной временной области на основе измеренных температур $Y(r_m, x_m, t)$ на позициях $r = r_m, x = x_m$. Целевая функция $J[\square(x, t)]$ строится на минимизации остатков между измеренными и рассчитанными температурами:

$$J[\square(x, t)] = \int_0^{t_f} \sum_{m=1}^M [T(r_m, x_m, t) - Y(r_m, x_m, t)]^2 dt, \quad (5)$$

где t_f - время окончания измерения, M - количество позиций измерения.

Исходя из того, что $T(r, x, t)$, $\Delta T(r, x, t)$, $\lambda(r, x, t)$ и $J'(x, t)$ может быть рассчитано в $kt\square$ итерации, методом сопряженного градиента для определения $h(x, t)$ итеративно. Конвективный коэффициент теплопередачи при $k + 1t\square$ итерации может быть выведен как:

$$\square^{k+1}(x, t) = \square^k(x, t) - \beta^k p^k(x, t), k = 0, 1, 2, \dots, \quad (6)$$

где $\square^k$ - расчетный коэффициент конвективной теплопередачи при $kt\square$ итерации, а β^k - длина шага между $kt\square$ и $k + 1t\square$ итерации. Решение начинаем с 0. Направление поиска определяем как функцию $p^k(x, t)$, которая сопряжена с градиентным направлением $J^k(x, t)$ в k th итерации и направление поиска на $k - 1t\square$ итерации, которую выражаем как:

$$p^k(x, t) = J^k(x, t) + \gamma^k p^{k-1}(x, t), \quad (7)$$

где

$$\gamma^k = \begin{cases} 0 & k = 0 \\ \frac{j'[p^n](j'[p^n] - j'[p^{n-1}])}{\|j'[p^{n-1}]\|^2} & k \neq 0 \end{cases} \quad (8)$$

Для определения распределения температур внутри композитной гильзы и от ее стенок патроннику, а также термофизических свойств материала, из которого изготовлена гильза и патронник введен коэффициент конвективной теплопередачи $\tilde{\alpha}^k$ между телом гильзы и пороховым газом.

Результаты расчета (рис. 9) показали, что при использовании композитной гильзы происходит снижение теплопередачи патроннику на 40 градусов Цельсия.

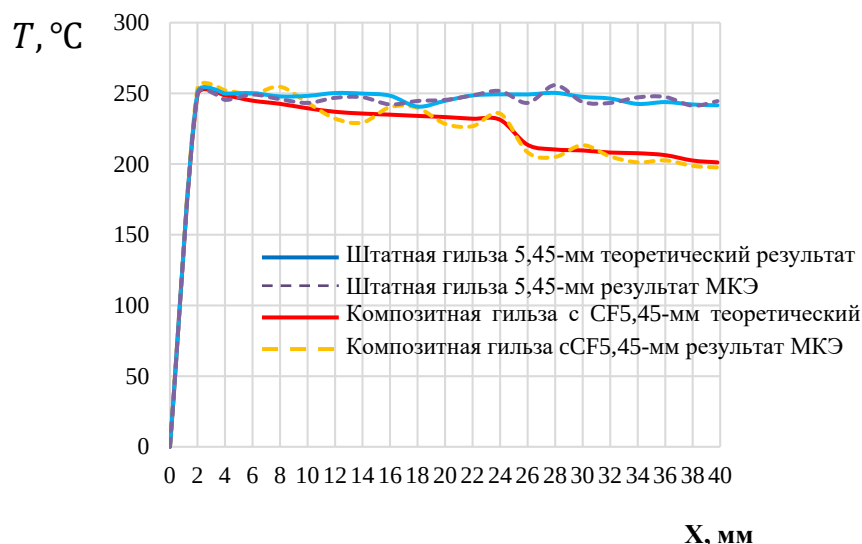


Рис. 9. Теплопередача патроннику при использовании композитной 5,45-мм гильзы с фторидом графена и штатной гильзы 5,45-мм

Испытания стрельбой, проведенные в стрелковом тире кафедры (средств ближнего боя) Пензенского филиала ВА МТО подтверждают, что применение фторида графена на внутренней стенке композитной гильзы снижает теплопередачу патроннику, что позволяет исключить потерю тепла пороховыми газами на начальном этапе выстрела и сохранить их энергетику, что влияет на увеличение дульной скорости пули.

На рис. 10 приведены результаты экспериментальных исследований стрельбой при использовании в пороховой навеске фторида графена в 10 % объеме от общей массы пороха.

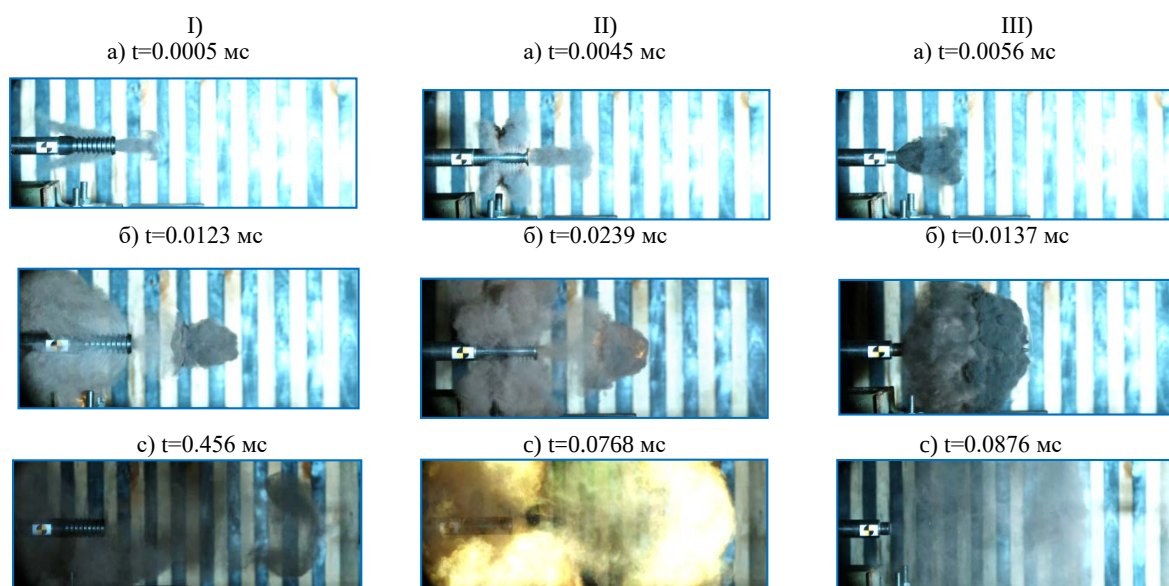


Рис. 10. Результаты экспериментальных исследований стрельбой при использовании в пороховой навеске фторида графена в 10 % объеме от общей массы пороха

На этапе I представлен прогревочный выстрел на уменьшенном пороховом заряде.

На этапе II выстрел штатным патроном, при котором наблюдается пламя на дульном тормозе-компенсаторе.

На III этапе выстрел композитным патроном с фторидом графена, при котором наблюдается очистка канала ствола выстрелом на $t=0.0137$ мс, отсутствие пламени на дульном тормозе-компенсаторе на $t=0.0876$ мс, что позволяет сделать вывод о полном сгорании пороховой навески и снижении нагрева канала ствола.

Определена эффективная навеска фторида графена в порохе (10 % от общего объема), которая не снижает силу пороха и ковалентом. Добавление фторида графена оказывает значительное влияние на прочность на растяжение металла. Прочность покрытия сначала увеличивается, но при увеличении добавки фтора уменьшается.

Выводы. Таким образом, в результате проведенных экспериментальных исследований подтверждено, что фторид графена способен оказывать влияние на снижение теплопередачи от композитной гильзы к патроннику на 40 градусов Цельсия, а, следовательно, и снижение разгарно-эрозионного разрушения патронника, что подтверждается отсутствием языков пламени на дульном тормозе компенсаторе. При этом установлен факт сохранения дульной энергии полета на уровне штатной пули, а также доказана возможность повышения очистки канала ствола выстрелом от продуктов горения пороха в сравнении со штатным аналогом.

Список литературы

1. Патент РФ № 2704195 C1, МПК F41A 29/00, Оpubл. 10.24.2019.
2. Zhang M., Ma Y., Zhu Y., Che J., Xiao Y. Two-dimensional transparent hydrophobic coating based on liquid-phase exfoliated graphene fluoride. Carbon 2013, 63. P. 149-156.
3. Feng W., Long P., Feng Y., Li Y. Two-dimensional fluorinated graphene: synthesis, structures, properties and applications. Adv. Sci. 2016, 3, 1500413.
4. Min C., He Z., Song H., Liang H., Liu D., Dong C., Jia W. Fluorinated graphene oxide nanosheet: A highly efficient water-based lubricated additive. Tribol. Int. 2019, 140, 105867.
5. Bharathidasan T., Narayanan T., Sathyanarayanan S., Sreejakumari S. Above 170° water contact angle and oleophobicity of fluorinated graphene oxide based transparent polymeric films. Carbon 2015, 84. P. 207-213.
6. Yang Z., Wang L., Sun W., Li S., Zhu T., Liu W., Liu G. Superhydrophobic epoxy coating modified by fluorographene used for anti-corrosion and self-cleaning. Appl. Surf. Sci. 2017. 401. P. 146-155.
7. Yang Z., Sun W., Wang L., Li S., Zhu T., Liu G. Liquid-phase exfoliated fluorographene as a two-dimensional coating filler for enhanced corrosion protection performance. Corros. Sci. 2016, 103. P. 312-318.
8. Zhou S., Li W., Zhao W., Li Q., Liu C., Fang Z., Gao X. Tribological behaviors of polyimide composite coatings containing carbon nanotubes and fluorinated graphene with hybrid phase or blend phase. Prog. Org. Coat. 2020, 147, 05800.
9. He Y., Chen C., Xiao G., Zhong F., Wu Y., He Z. Improved corrosion protection of waterborne epoxy/graphene coating by combining non-covalent and covalent bonds. React. Funct. Polym. 2019, 137. P. 104-115.
10. King J., Klimek D., Miskioğlu I., Odegard G. Mechanical properties of graphene nanoplatelet/epoxy composites. J. Appl. Polym. Sci. 2013. 128. P. 1-10.

Савченко Федор Анатольевич, д-р техн. наук, профессор, Россия, Пенза, Филиал Военной академии материально-технического обеспечения (г. Пенза),

Бакланов Дмитрий Владимирович, адъюнкт, baklanov90@yandex.ru, Россия, Пенза, Филиал Военной академии материально-технического обеспечения (г. Пенза),

Минаков Евгений Иванович, д-р техн. наук, профессор, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Ишков Антон Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, asihkov@mail.com, Россия, Пенза, Пензенский государственный университет

INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF REDUCING THE TEMPERATURE GRADIENT OF THE BARREL OF SMALL ARMS BY OPTIMIZING THE COMPOSITION OF SPHERICAL GUNPOWDER

F.A. Savchenko, D.V. Baklanov, E.I. Minakov, A.S. Ishkov

The essence of the study was determining the necessary suspension of graphene fluoride additives in spherical powder which were carried out using a pressure gauge bomb. As a result, the mass characteristics of the components were determined, provided that the covolume and the strength of the powder for the live cartridge were preserved, the chemical composition and microstructures of fluorinated graphene were analyzed and studied. The results showed that the addition of even a small amount of fluorinated graphene to the powder coating or to the inner wall of the composite sleeve significantly improved its tensile strength, blocked the penetration of a corrosive agent along the entire plane of the steel wall.

Key words: graphene fluoride, superhydrophobicity, crashery the method, the manometric bomb, the power of gunpowder.

Savchenko Fedor Anatolyevich, doctor of technical sciences, professor, Russia, Penza, Branch of the Military Academy of Logistics (Penza),

Baklanov Dmitry Vladimirovich, adjunct, baklanov90@yandex.ru, Russia, Penza, Branch of the Military Academy of Logistics (Penza),

Minakov Evgeny Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, Russia, Tula, Tula State University,

Ishkov Anton Sergeevich, candidate of technical sciences, docent, asihkov@mail.com, Russia, Penza, Penza State University