

УДК 623.451

doi: 10.53816/23061456\_2025\_11–12\_11

**МЕТОДЫ РАСЧЕТА ВРЕМЕНИ РЕАКЦИИ АРТИЛЛЕРИЙСКОГО ВЫСТРЕЛА  
В ТАРЕ НА ВНЕШНИЕ НЕСАНКЦИОНИРОВАННЫЕ ДЕЙСТВИЯ  
БЫСТРЫМ НАГРЕВОМ**

**METHODS FOR CALCULATING THE REACTION TIME OF AN ARTILLERY  
SHOT IN A CONTAINER TO EXTERNAL UNAUTHORIZED ACTIONS  
BY RAPID HEATING**

*Д.Ф. Филиппов*

*D.F. Filippov*

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

В статье приведены методы расчета времени реакции артиллерийского выстрела в таре на внешние несанкционированные действия быстрым нагревом, включающие кинетический метод расчета и расчет с помощью программных средств, основанных на методе конечных элементов, отличающийся от известных тем, что методы используются для элементов артиллерийского выстрела, находящегося в таре, и прогрев элементов выстрела рассматривается по реальной цилиндрической схеме. Получены результаты расчета времени реакции выстрела, которые показали, что расчет, основанный на методе конечных элементов более точен, и может быть использован для прогнозирования времени наступления реакции с артиллерийскими выстрелами различных калибров. Так как одним из основных видов внешнего несанкционированного действия на боеприпасы является тепловое действие, создающее пожары на территории арсеналов и полевых артиллерийских складов, поэтому именно этому вопросу и посвящены проведенные исследования. **Ключевые слова:** артиллерийский выстрел, боеприпас, снаряд, метательный заряд, несанкционированное действие, быстрый нагрев, экспериментальные исследования.

The article presents methods for calculating the reaction time of an artillery shot in a container to external unauthorized actions by rapid heating, including a kinetic calculation method and calculation using software based on the finite element method, which differs from the known methods in that the methods are used for the elements of an artillery shot in a container, and the heating of the shot elements is considered according to a real cylindrical scheme. The results of calculating the reaction time of a shot were obtained, which showed that the calculation based on the finite element method is more accurate and can be used to predict the reaction time with artillery shots of various calibers. Since one of the main types of external unauthorized action on ammunition is thermal action, which creates fires on the territory of arsenals and field artillery depots, therefore, the conducted research is devoted to this issue.

**Keywords:** artillery shot, ammunition, projectile, propellant charge, unauthorized action, rapid heating, experimental research.

В последние годы особое внимание при разработке боеприпасов (БП) уделяется вопросам обеспечения их безопасности, сохранности и защищенности на всех стадиях жизненного цикла, моделирования аварийных ситуаций и прогнозирования их последствий, повышения безопасности БП при несанкционированных действиях [1].

БП представляют собой источник повышенной опасности. При непредусмотренных воздействиях, вызванных стихийными явлениями, пожарами, неправильным обращением, террористическими действиями, нападением со стороны противника, БП могут выделять накопленную в них энергию несанкционированно. Это может происходить в местах хранения, при загрузке боеприпасов на носители (самоходные артиллерийские установки, танки, автомобили, самолеты, корабли, железнодорожный транспорт и т.д.), транспортировке, при ведении боевых действий и т.д. Если такое воздействие не ограничивается единичным БП, а передается на другие с их полным срабатыванием, то происходит цепная реакция, вызывающая техногенную катастрофу с людскими потерями и значительными материальными убытками [2, 3].

Эксплуатационная безопасность изделий из высокоэнергетических веществ (ВЭВ) определяется устойчивостью последних к внешним воздействиям различного рода. Наиболее распространенным видом является тепловое воздействие [4].

Время до воспламенения изделий при воздействии теплового потока (аэродинамический нагрев, лазерное излучение, нагретый ствол пушки, пожар) можно определять расчетными и экс-

периментальными методами. Расчетные методы позволяют не проводить дорогостоящие эксперименты, они работают с идеализированными системами. Главное достоинство таких методов — относительно простое получение зависимости времени до воспламенения изделия от различных параметров конструкционных материалов.

Экспериментальные методы определения времени до воспламенения позволяют получать реальную картину процесса воспламенения БП, однако только многочисленные опыты позволяют определить направления совершенствования БП ввиду трудно повторяемых конструктивных особенностей БП и защитных слоев.

Поэтому сочетание расчетных и экспериментальных методов позволит решить поставленную проблему (задачу) с оптимизацией затрат времени и материальных средств.

Для расчета теплового состояния изделий в настоящее время разработаны программы, основанные на решении уравнений теплопроводности и кинетики тепловыделения с заданными начальными и граничными условиями.

Поэтому рассмотрим разработанные подходы, позволяющие получить необходимые параметры процесса теплового воспламенения БП или минимизации последствий взрыва одиночного или штабеля с БП, а также необходимые условия получения кинетики разложения взрывчатых веществ (ВВ) при тепловых нагрузках [5].

Артиллерийские выстрелы, как правило, хранятся в деревянной и полимерной таре, где снаряд и заряд находятся вместе [6] (рис. 1).

Рассмотрим кинетический метод расчета времени реакции 125-мм артиллерийского выстрела ЗВОФ36 в таре на внешние несанкциониро-



а



б

Рис. 1. Артиллерийский выстрел в полимерной таре

ванные действия быстрым нагревом (открытого пламени огня).

При рассмотрении данной модели для определения времени реакции снаряжения боеприпасов на внешний нагрев, то есть времени до самовоспламенения, взрыва ВВ или пороха, необходимо составить схему теплопередачи от нагретого воздуха (НВ) снаряжению боеприпаса.

В кинетической модели быстрого нагрева метательного заряда (МЗ) от внешнего источника использовались исходные данные, относящиеся как к самому БП, так и к таре (ящику), и внешней воздействующей опасной среде (пламени от пожара) (рис. 2):

1) коэффициент теплопроводности пенала, вставки, сгорающей гильзы (СГ) и корпуса снаряда —  $\lambda_{\text{пен}}, \lambda_{\text{вст}}, \lambda_{\text{сг}}, \lambda_{\text{сн}}$ , Вт/(м·°С);

2) теплоемкость пенала, вставки, СГ и корпуса снаряда —  $c_{\text{пен}}, c_{\text{вст}}, c_{\text{сг}}, c_{\text{сн}}$ , Дж/(кг·°С);

3) плотность материала пенала, вставки, СГ и корпуса снаряда —  $\rho_{\text{пен}}, \rho_{\text{вст}}, \rho_{\text{сг}}, \rho_{\text{сн}}$ , кг/м<sup>3</sup>;

4) температура воздуха —  $T_0$ , °С;

5) коэффициент теплопроводности материала тары (ящика) —  $\lambda_{\text{ящ}}$ , Вт/(м·°С);

6) теплоемкость материала тары —  $c_{\text{ящ}}$ , Дж/(кг·°С);

7) плотность материала тары —  $\rho_{\text{ящ}}$ , кг/м<sup>3</sup>.

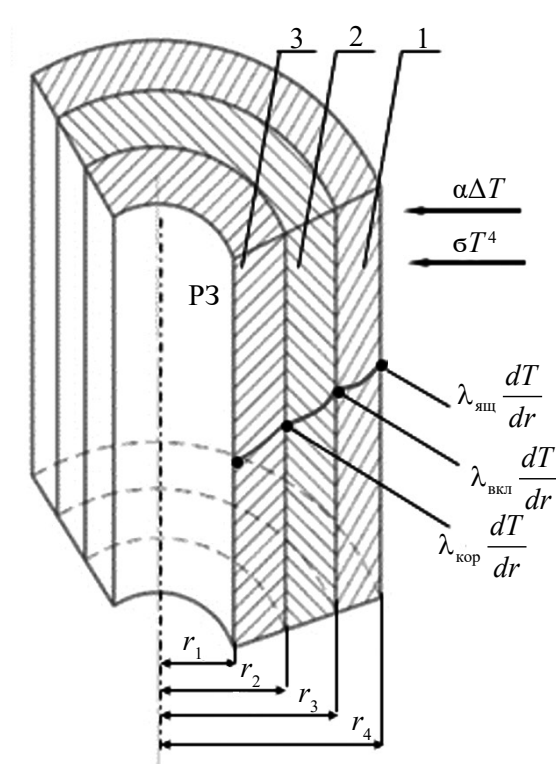
На рис. 2 имеются следующие обозначения:

$\sigma T^4$  — излучение тепловыделения за счет нагрева;

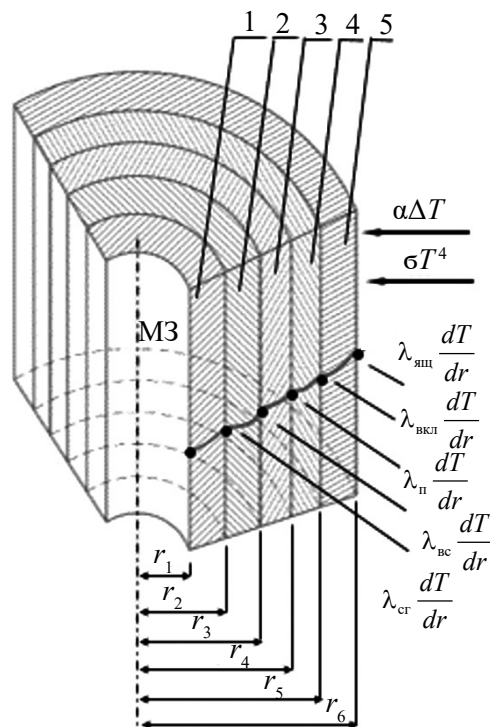
$\alpha \Delta T$  — подводимое тепло за счет кондуктивной передачи;

$\lambda_i \frac{dT}{dr}$  — теплопроводность на границе слоев.

Очевидно, что любая математическая модель работает при определенной системе допущений. В данном случае целесообразно допустить, что:



а



б

Рис. 2. Расчетная схема теплопередачи от нагретого воздуха к пороху и разрывному заряду:

а — для снаряда: 1 — корпус снаряда; 2 — вкладыш; 3 — тара;

б — для метательного заряда: 1 — сгорающая гильза; 2 — вставка;

3 — пенал; 4 — вкладыш; 5 — тара

1) толщина воздушных прослоек между элементами заряда практически близка к нулю;

2) метательный заряд (СГ и навеска пороха) непосредственно контактируют с внутренней поверхностью вставки, поэтому можно считать температуру наружной стенки СГ  $t_{МЗ}$  равной температуре внутренней поверхности вставки;

3) наиболее вероятным можно считать нагрев МЗ через поверхность боковых стенок вкладыша тары, так как толщина дна вкладыша в углублении, где размещен МЗ значительно меньше, чем в других местах тары.

Из схемы, рис. 2, видно, что тепловой поток от нагретого окружающего воздуха сначала нагревает стенки ящика (тары).

К настоящему времени имеются разработанные программы для решения системы уравнений, позволяющие определять тепловое состояние тела заданной формы (плоскость, цилиндр, шар) при определенных начальных и граничных условиях.

Температура внешней и внутренней поверхностей ящика рассчитывается по уравнениям [7]:

$$c_i \rho_i \frac{dT}{d\tau} = \lambda_i \left( \frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} \right); \quad (1)$$

$$\left( \lambda_i \frac{dT}{dr} \right)_{i-0} = \left( \lambda_{i+1} \frac{dT}{dr} \right)_{i+0}; \quad (2)$$

граничные условия:  $\tau = 0, T = T_0, r = r_0$

$$-\lambda_i \frac{dT}{dr} = \alpha \Delta T + \sigma T^4, \quad (3)$$

где  $c_i$  — теплоемкость слоев изделия;

$\rho_i$  — плотность слоев изделия;

$\lambda_i$  — теплопроводность слоев изделия;

$r$  — текущая координата изделия;

$r_0$  — характерный размер изделия;

$T$  — текущая температура;

$T_0$  — температура окружающей среды;

$\tau$  — время.

Однако из практики известно, что штатная деревянная тара при прямом воздействии открытого огня прогорает примерно через 360 с (6 мин), через это время пламя огня напрямую начинает воздействовать на элементы выстрела. Поэтому если выстрел размещен не в полимерную тару, то температуру нагрева стенок снаряда и МЗ следует считать без учета температуры стенок тары.

Температура внешней и внутренней поверхностей слоев МЗ, а также защитного слоя тары (вкладыша) из полиуретана рассчитывается аналогично уравнениям (1) и (2).

Для расчета теплового состояния энергосыщенного материала, каким является СГ, необходимо иметь и кинетические уравнения теплопроводности с нелинейным членом тепловыделения, при разложении состава. Уравнения имеют вид:

$$Q \frac{d\eta}{d\tau};$$

$$c_i \rho_i \frac{dT}{d\tau} = \lambda_i \left( \frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} + Q \frac{d\eta}{d\tau} \right); \quad (4)$$

$$\left( \lambda_i \frac{dT}{dr} \right)_{i-0} = \left( \lambda_{i+1} \frac{dT}{dr} \right)_0;$$

граничные условия:  $\tau = 0, T = T_0, r = r_0, \frac{dT}{dr} = 0$ ;

$$\frac{d\eta}{d\tau} = f(E, \eta),$$

где  $\eta$  — глубина превращения (разложения);

$Q$  — теплота реакции разложения;

$E$  — энергия активации разложения.

Разрывной заряд снаряда, как правило, представляет собой бризантный взрывчатый состав (ВС), размещенный в корпусе БП без взрывателя. ВС непосредственно контактирует с внутренней стенкой снаряда, поэтому в качестве допущения можно принять температуру внутренней стенки снаряда равной температуре ВС.

Следует также учитывать и то, что толщина корпуса снаряда является переменной величиной, поэтому расчет необходимо вести при наименьшем значении этого параметра.

Температура внешней и внутренней поверхностей ящика рассчитывается по уравнениям (1)–(3), температура внешней и внутренней поверхностей слоев снаряда и вкладыша тары рассчитывается по уравнениям (1) и (2).

Аналогично, как и для расчета теплового состояния МЗ, необходимо включить кинетическое уравнение теплопроводности с нелинейным членом тепловыделения, при разложении ВС в снаряде. Рассчитывается по уравнению (4).

Для оценки теплового состояния тела помимо теплофизических характеристик необходимо иметь и кинетическое уравнение (модель) разложения состава или индивидуального энергоемкого вещества.

Вопрос количественного описания различных процессов рассматривался относительно давно. В работе [8] систематизируется накопленный опыт исследований протекания процессов в гомогенной и гетерогенной средах 20-го столетия. При описании процесса разложения ВВ и пороха использовали уравнение автокатализа первого порядка.

$$\frac{d\eta}{d\tau} = k_1(1-\eta) + k_2(1-\eta)\eta,$$

где  $\eta$  — доля прореагировавшего вещества к моменту времени  $\tau$ ;

$\frac{d\eta}{d\tau}$  — скорость разложения.

Предполагается, что температурная зависимость скоростей реакций термического разложения ( $k_1, k_2$ ) подчиняется закону Аррениуса и записывается в следующем виде:

$$k_1 = K_{01} \cdot \exp\left(\frac{-E_1}{RT}\right);$$

$$k_2 = K_{02} \cdot \exp\left(\frac{-E_2}{RT}\right),$$

где  $K_{01}, K_{02}$  — предэкспонентный множитель;

$E_1, E_2$  — энергии активации (прямая и обратная реакция).

При исследовании кинетики разложения при больших плотностях заполнения объема реакционной ячейки начальная скорость много меньше скорости разложения на стадии ускорения.

При  $k_2 \gg k_1, \tau(\eta^*) = \text{const}$ ;

$$\exp\left(\frac{-(E_1 + E_2)}{\frac{R}{T}}\right),$$

где  $\tau(\eta^*)$  — время достижения глубины разложения  $\eta^*$  при заданной температуре  $T$ .

Такая зависимость не позволяет точно определить по отдельности  $E_1$  и  $E_2$ . Для однозначного разделения величин  $E_1$  и  $E_2$  используют прибор измерительно-вычислительного комплекса

(ИВК) «Вулкан», позволяющий определять величину  $E_1$ . Использование двух приборов — комплекса тепловых исследований (КТИ) «Тепло» и ИВК «Вулкан», позволяет не только определить скорость разложения веществ при больших плотностях заполнения объема реакционной ячейки, но и определить величины  $E_1$  и  $E_2$  [9]. Результаты проведенных исследований кинетики тепловыделения при разложении ВС, экспериментальные и расчетные данные представлены на рис. 3.

Была разработана «Программа расчета теплового воспламенения», позволяющая рассчитывать тепловое поле в изделии, используя вышеперечисленные уравнения и полученное кинетическое уравнение для конкретного энергонасыщенного материала (ЭНМ).

При проведении расчетов получены следующие результаты нагрева элементов выстрела ЗВОФ36 в деревянной таре, представленные в табл. 1, 2 [10].

На рис. 4 представлены зависимости времени до воспламенения снаряда и МЗ выстрела калибром 125 мм.

Далее рассмотрим расчет времени реакции артиллерийского выстрела в таре на внешние несанкционированные действия быстрым нагревом методом конечных элементов, на примере выстрела ЗВОФ36.

Для исследования этих процессов было проведено компьютерное моделирование теплового взрыва со 125-мм выстрелом ЗВОФ36 в штатном снаряжении в деревянной таре, при быстром нагреве.

Расчет времени реакции выстрела проводился с применением метода конечных элементов [11]. При моделировании поведения МЗ и разрывного заряда (РЗ) снаряда в составе выстрела при воздействии на него повышенной температуры предполагалось, что температура окружающей газовой среды (воздуха) в начальный момент времени составляет 0 °С и воздействие открытого пламени с температурой 800 °С до момента завершения реакции боеприпаса.

При определении времени расчета реакции с МЗ 4Ж40 выстрела ЗВОФ36 при несанкционированном нагреве были использованы следующие исходные данные:

1) характеристики СГ, металлического пенала и вставки:

Q1:5200		BC	BC (1,5) exp	BC (2.0) exp
Q2:500	Вещество	BC	BC (1,5)	BC -2 (2,0)
K1:15,5	Масса вещества	10,00	10,00	10,00
E1:42500,00	Теплоемкость вещества	0,10	0,10	0,10
K2:8,62	Масса ампулы	1,0	1,0	1,0
E2:25000,00	Теплоемкость ампулы	0,05	0,05	0,05
	Теплоотдача	0,01	0,01	0,01
	№ опыта	1	1	1
	Дата	19.04.2024 9:45	20.04.2024 9:52	21.04.2024 9:25

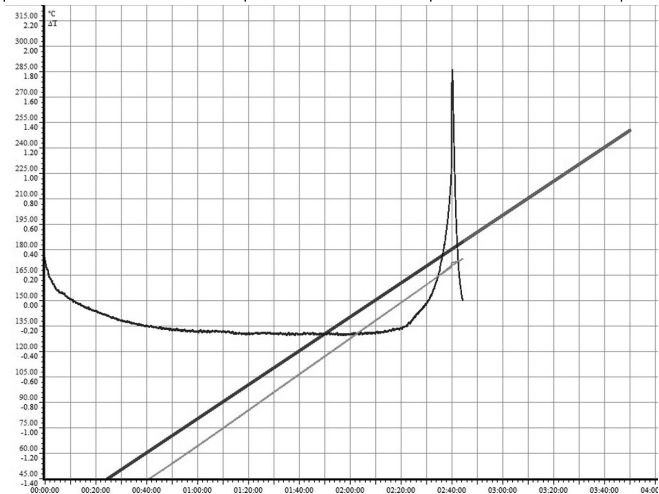


Рис. 3. Экспериментальные данные кинетики тепловыделения при разложении BC (определение  $E_1$ ,  $E_2$  и  $K_{01}$ ,  $K_{02}$ )

Таблица 1

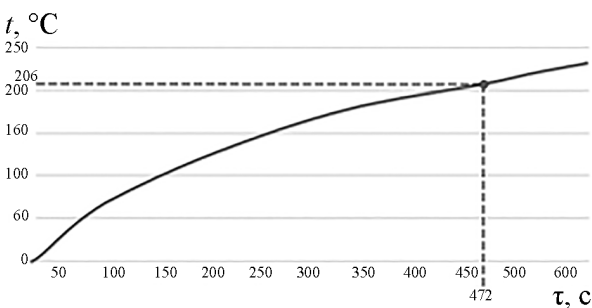
Результаты расчета нагрева снаряда

Температура взрывчатого состава	Значения температуры BC снаряда при внешнем нагреве, °C											
	время нагрева, с											
	50	100	150	200	250	300	400	450	472	500	550	600
$t_{BC}$	39	71	102	126	143	162	175	199	205	212	225	240

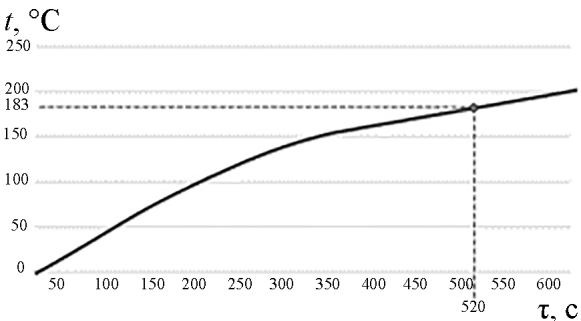
Таблица 2

Результаты расчета нагрева метательного заряда

Температура стенки СГ	Значения температуры стенок метательного заряда при внешнем нагреве, °C											
	время нагрева, с											
	50	100	150	200	250	300	350	450	500	510	550	600
$t_{CG}$	29	48	75	99	125	141	152	169	180	188	192	202



а



б

Рис. 4. Зависимость роста температуры: а — BC снаряда при внешнем нагреве; б — СГ при внешнем нагреве

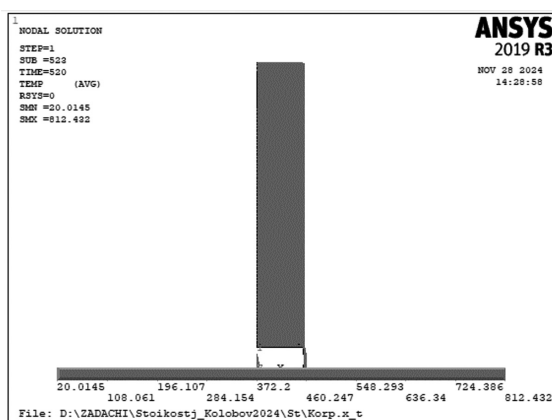
- толщина стенки СГ, металлического пенала, вкладыша:  $\delta_{\text{сг}}$  ( $\delta_3$ ),  $\delta_{\text{пен}}$ ,  $\delta_{\text{вст}}$ , м;
  - плотность материала корпуса СГ, металлического пенала, вставки:  $\rho_{\text{сг}}$ ,  $\rho_{\text{пен}}$ ,  $\rho_{\text{вст}}$ , кг/м<sup>3</sup>;
  - коэффициент теплопроводности материала СГ, металлического пенала, вставки:  $\lambda_{\text{сг}}$ ,  $\lambda_{\text{пен}}$ ,  $\lambda_{\text{вст}}$  Вт/(м·°С);
  - теплоемкость корпуса СГ, металлического пенала, вставки:  $c_{\text{сг}}$ ,  $c_{\text{пен}}$ ,  $c_{\text{вст}}$ , Дж/(кг·°С);
  - время прогрева СГ, металлического пенала, вставки:  $\tau_{\text{сг}}$ ,  $\tau_{\text{пен}}$ ,  $\tau_{\text{вст}}$ , с;
- 2) характеристики порохов МЗ:
- температура реакции (тепловая стойкость) штатных порохов 12/7 ВА и 185/1Тр ВА, ВТХ-20 —  $t_p = 173$  °С, ДРП —  $t_p = 308$  °С;
  - температура реакции (тепловая стойкость) СГ  $t_p = 188$  °С.

На рис. 5 представлено распределение температурных полей в МЗ и снаряде непосредственно перед тепловым взрывом и зависимости роста температуры при быстром нагреве.

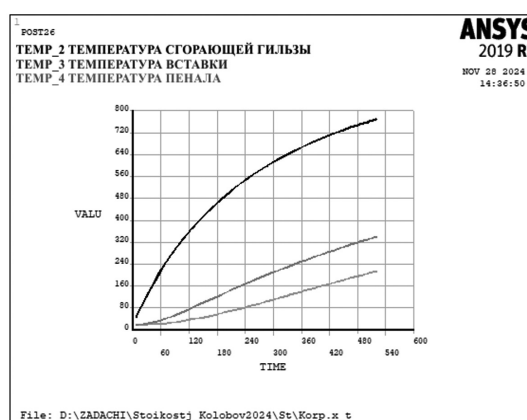
При проведении расчетов получены следующие результаты нагрева элементов МЗ и снаряда (табл. 3, 4). Верификация результатов теоретических расчетов времени реакции артиллерийского выстрела в деревянной таре на внешнее тепловое действие представлена в табл. 5.

## Выводы

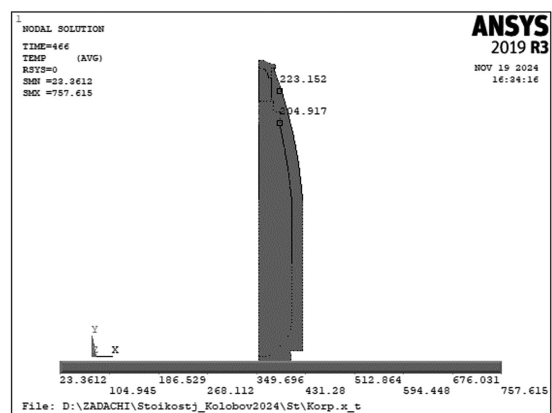
Таким образом, рассматриваемая совокупность методов расчета времени реакции артиллерийского выстрела в таре на внешние несанкцио-



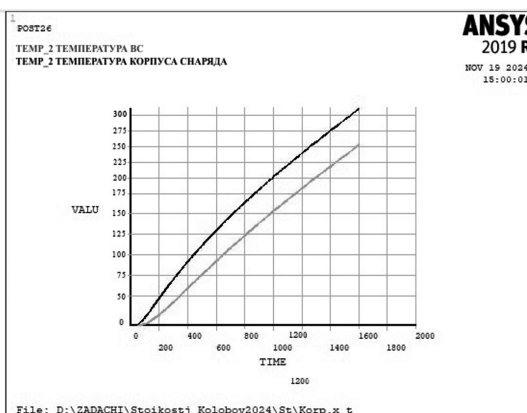
а



б



в



г

Рис. 5. Распределение температурных полей в МЗ и снаряде непосредственно перед тепловым взрывом и зависимости роста температуры при быстром нагреве:

- а — распределение температурных полей в МЗ 4Ж40 перед началом реакции;
- б — зависимость роста температуры от времени для МЗ при быстром нагреве;
- в — распределение температурных полей в МЗ 4Ж40 перед началом реакции;
- г — зависимость роста температуры от времени для МЗ при быстром нагреве

Таблица 3

**Результаты нагрева стенок МЗ**

Температуры стенок ящика	Значения температуры стенок МЗ при внешнем нагреве, °С											
	время нагрева, с											
	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	520	600
$t_{\text{пен}}$	175	323	420	482	568	605	631	680	735	755	768	–
$t_{\text{вст}}$	39	74	96	155	174	210	244	269	301	325	339	–
$t_{\text{ст}}$	28	52	64	75	92	123	144	152	169	175	189	–

Таблица 4

**Результаты нагрева стенок снаряда**

Темпера- туры стенок ящика	Значения температуры стенок снаряда при внешнем нагреве, °С												
	время нагрева, с												
	50	100	150	200	250	300	350	400	450	466	500	550	600
$t_{\text{кор}}$	50	73	94	114	133	152	169	186	202	211	217	232	245
$t_{\text{вс}}$	35	55	77	97	117	136	154	172	189	205	215	221	234

Таблица 5

**Время реакции выстрела ЗВОФ36 в таре на внешнее тепловое воздействие**

Наименование образца	Кинетический метод расчета времени реакции выстрела, с		Расчет времени реакции методом конечных элементов, с	
	МЗ	снаряд	МЗ	снаряд
ЗВОФ36 в деревянной таре	510	472	520	466

нированные действия быстрым нагревом показала довольно хорошее согласование результатов расчета, однако если сравнивать результаты данных теоретических методов с результатами натурных испытаний, то можно сказать, что расчет с помощью программных средств, основанных на методе конечных элементов более точен, чем кинетический метод. Расчет, основанный на методе конечных элементов, позволяет более точно рассчитать время реакции БП при воздействии пожара и может быть использован для прогнозирования времени наступления реакции с артиллерийскими выстрелами. Поэтому данный метод имеет важное значение для повышения живучести арсеналов комплексного хранения и полевых артиллерийских складов.

**Список источников**

1. Боеприпасы повышенной стойкости к опасным внешним воздействиям: особенности

конструирования, испытаний и эксплуатации / Б.В. Мацеевич [и др.]. Красноармейск: Изд-во ОАО «КНИИМ», 2014. 168 с.

2. Основы проектирования, производства и испытаний боеприпасов и их элементов. В 3 ч. Ч. 3. Основы производства и испытания энергонасыщенных материалов / А.Б. Терентьев [и др.]. Пенза: Филиал ВА МТО, Пенз. арт. инж. ин-т, 2020. 426 с.

3. Мацеевич Б.В., Михеев В.Г., Яжук А.П. Военный парад // Боеприпасы XXI века. 2004. № 6 (66). С. 45–51.

4. Мацеевич Б.В., Михайлов Ю.М. Проблемы создания в России боеприпасов, стойких к несанкционированным воздействиям // Боеприпасы и спецхимия. 2007. Вып. 1. С. 56–62.

5. Злобин В.А., Дудь А.П., Сагун Ю.И. Обоснование рациональных режимов эксплуатации ракет на арсеналах комплексного хранения: монография. М.: ОВА, 2018. 146 с.



6. Бабакин А.В. и др. Боеприпасы: учебник; под ред. В.В. Селиванова, в 2-х т. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. 856 с.

7. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука, 1987. 502 с.

8. W.C. McC. Lewis. A system of physical chemistry. Vol. 1: Kinetic theory, Longmans, Green and Co., 1923. 146 p.

9. Самойленко Н.Г. Исследование кинетики термического разложения динитроксиэтилнитрамина при отсутствии газоотвода из зоны реакции // Журнал физической химии. 1970. Т. 44, № 1. С. 39–45.

10. Филиппов Д.Ф., Терентьев А.Б. и др. Проектирование систем // Журнал «Боеприпасы XXI век». 2024. № 3. С. 62–64.

11. Басов К.А. ANSYS справочник пользователя. М.: Изд-во ДМК-Пресс, 2005. 640 с.

### References

1. Matseevich B.V. et al. Ammunition of increased resistance to dangerous external influences: features of design, testing and operation. Krasnoarmeysk: JSC «KNIIM», 2014. 168 p.

2. Terentyev A.B. et al. Fundamentals of design, production and testing of ammunition and their elements. At 3 p. Part 3. Fundamentals of production and testing of energy-saturated materials. Penza: Branch of VA MTO, 2020. 426 p.

3. Matseevich B.V., Mikheev V.G., Yazhuk A.P. Military Parade // Ammunition of the XXI century. 2004. No 6 (66). Pp. 45–51.

4. Matseevich B.V., Mikhailov Yu. M. Problems of creating ammunition resistant to unauthorized influences in Russia // Ammunition and special chemistry. 2007. Issue 1. Pp. 56–62.

5. Zlobin V.A., Dud A.P., Sagun Yu.I. Justification of rational modes of operation of missiles at complex storage arsenals: a monograph. M.: OVA, 2018. 146 p.

6. Babakin A.V. et al. Ammunition: a textbook; ed. by V.V. Selivanov. In 2 vol. Moscow: Publishing House of the Bauman Moscow State Technical University. 2016. 856 p.

7. Frank-Kamenetsky D.A. Diffusion and heat transfer in chemical kinetics. Moscow: Nauka, 1987. 502 p.

8. W.C. McC. Lewis, A system of physical chemistry. V. 1: Kinetic theory, Longmans, Green and Co., 1923. 146 p.

9. Samoylenko N.G. Investigation of the kinetics of thermal decomposition of dinitroxydiethyl nitramine in the absence of gas discharge from the reaction zone // Journal of Physical Chemistry, 1970. Vol. 44, No 1. Pp. 39–45.

10. Filippov D.F., Terentyev A.B. et al. System Design // Ammunition of the XXI century. 2024. No 3. Pp. 62–64.

11. Basov K.A. ANSYS user's guide. M.: Publishing house DMK-Press, 2005. 640 p.