

## Моделирование воздействия теплового поля пожара на заряды взрывчатых веществ в условиях лабораторного эксперимента

© С.Г. Андреев, С.В. Ладов, С.В. Федоров

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Рассмотрена возможность моделирования начальной стадии воспламенения и разложения заряда взрывчатого вещества или взрывчатого состава с различной конструктивной теплоизоляцией при воздействии на них теплового поля пожара. Применено приближенное моделирование на малоразмерных моделях, связанное с использованием в экспериментах фрагмента натурального объекта, в котором протекание тепловых процессов совпадает с начальной стадией развития реакции, предопределяющей нежелательный (опасный) конечный исход внешнего воздействия. При этом внешнее воздействие на фрагмент разрывного заряда можно характеризовать нестационарным температурным полем в среде, имеющей теплофизические характеристики взрывчатых составов, но не обладающей химической активностью. Предложена методика определения температуры и времени задержки воспламенения в лабораторных условиях на малоразмерных моделях с использованием для измерения температур термоэлектрических преобразователей (термопар), размещаемых в массиве взрывчатого материала. Разработана лабораторная установка, позволяющая с помощью специального генератора теплоты регулировать тепловой поток (поле пожара) к модельному заряду и достигать требуемого изменения температуры на нижнем торце заряда. Приведен пример оценки пожаровзрывобезопасности образцов из взрывчатых смесей на основе тротила и гексогена с добавками алюминия и флегматизатора, размещенных в металлических оболочках с воздушным зазором и без него.*

**Ключевые слова:** *тепловое поле пожара, разрывной заряд боеприпаса, тепловой генератор, тепловой взрыв, термоэлектрический преобразователь, воспламенение, моделирование, пожаровзрывобезопасность*

**Введение.** Для принятия на вооружение боеприпасов (БП) требуется комплексная оценка их пожаровзрывобезопасности (ПВБ), в том числе в условиях хранения, основанная на знании физических явлений при взаимодействии теплового поля пожара с конструкцией, содержащей взрывчатые материалы. Существует достаточно большое разнообразие конструкций БП с различными взрывчатыми веществами (ВВ) и взрывчатыми составами (ВС) [1–4]. Существующие экспериментальные методы оценки ПВБ взрывчатых материалов в натуральных условиях сопряжены, как правило, со значительными материальными затратами либо дают недостаточно информации о происходящих процессах [5–8].

Точное физическое моделирование теплового процесса, на первый взгляд, менее затратно по сравнению с исследованиями, прово-

димыми в натуральных условиях, так как при этом можно было бы использовать уменьшенные модели реальных изделий. Однако при точном физическом моделировании, позволяющем пересчитывать результаты экспериментов с моделями на натурные условия, требуется обязательное соблюдение всех критериев геометрического и физического подобия. В частности, вследствие того, что поведение ВВ определяется температурным полем, генерируемым в нем в условиях конвективного теплообмена «теплоносителя» пожара (пламени, раскаленного газа и т. п.) с элементами исследуемого изделия, необходимо соблюдение критериев теплового подобия Рейнольдса, Эйлера, Нуссельта, Пекле, Фурье, Грасгофа [9, 10]. Следует отметить, что необходимость соблюдения последнего критерия Грасгофа

$$Gr = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu^2},$$

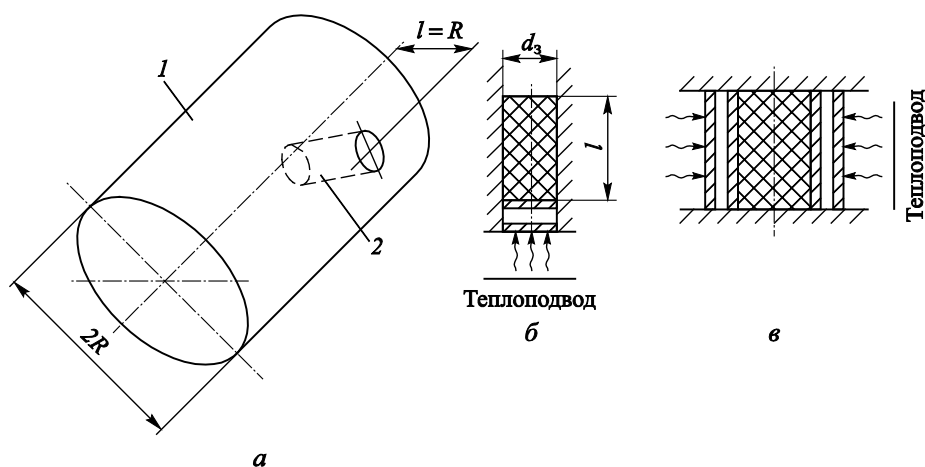
где  $g$  — ускорение свободного падения;  $\beta$  — температурный коэффициент объемного расширения;  $\Delta T$  — разность температур стенки и среды на удалении от стенки;  $L$  — линейный размер;  $\nu$  — кинематическая вязкость, показывает практическую невозможность точного физического моделирования, так как в этом случае на малых моделях необходимо воспроизводить ускорение, существенно превышающее  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$  (при технической реализации нужно будет помещать модели изделия и теплоносителя пожара в специальные центрифуги, что повышает стоимость и сложность модельного эксперимента до показателей натуральных испытаний).

Использование замкнутых математических моделей поведения ВВ под влиянием теплового воздействия на их внешнюю оболочку не дает необходимого уровня точности для оценки ПВБ рассматриваемой системы (БП) даже для начальной стадии развития взрывного процесса. Это обусловлено, в частности, отсутствием данных о характеристиках (параметрах) термического разложения каталитической направленности, а также теплоемкости и теплопроводности в широком диапазоне изменения температур, особенно для многокомпонентных ВС, содержащих, например, тротил, гексоген, алюминиевую пудру и другие добавки.

При подобных трудностях обычно применяют приближенное моделирование, используя фрагменты натурального объекта, в котором протекание тепловых процессов совпадает с начальной стадией развития реакции, предопределяющей нежелательный (опасный) конечный исход внешнего воздействия. При этом внешнее воздействие на модельный фрагмент в эксперименте задают тождественным воздействию на фрагмент натурального объекта [11, 12].

Применительно к тепловому воздействию пожара на БП внешнее воздействие на фрагмент разрывного заряда можно характеризовать нестационарным температурным полем в среде, имеющей теплофизические характеристики исследуемых ВВ или ВС, но не обладающей химической активностью. Такой подход обусловлен тем, что начальной стадией нежелательного (опасного) исхода пребывания БП в тепловом поле пожара является «тепловой» взрыв, возникающий в общем случае в некоторой локализованной области. При этом тепловой взрыв характеризуется индукционным периодом, в течение которого происходят процессы, предопределяющие последующее ускорение химической реакции в элементарной ячейке заряда до взрывных, т. е. очень больших, скоростей, при пренебрежимо малом изменении химического состава заряда. В данной работе тепловой взрыв трактуется как общее понятие, соответствующее возникновению условий, когда теплоприход от химической реакции в некоторой зоне заряда начинает необратимо превышать теплоотвод из нее. В частности, в предельных проявлениях тепловой взрыв идентифицируется с самовоспламенением в адиабатических условиях и зажиганием (воспламенением) на поверхности подвода теплоты к заряду [13–15].

**Моделирование поведения разрывного заряда в составе боеприпаса при воздействии пожара.** Суть подхода поясняет рис. 1. Из натурального образца 1 изделия как бы «вырезается» цилиндрический заряд 2 длиной  $l$ , равной радиусу  $R$  реального изделия (рис. 1, а).



**Рис. 1.** Условное изображение натурального объекта (а) и возможные схемы мало-размерных моделей (б, в) для исследования поведения наполнителя при пожаре:

1 – натуральный образец; 2 – цилиндрический заряд (малоразмерная модель)

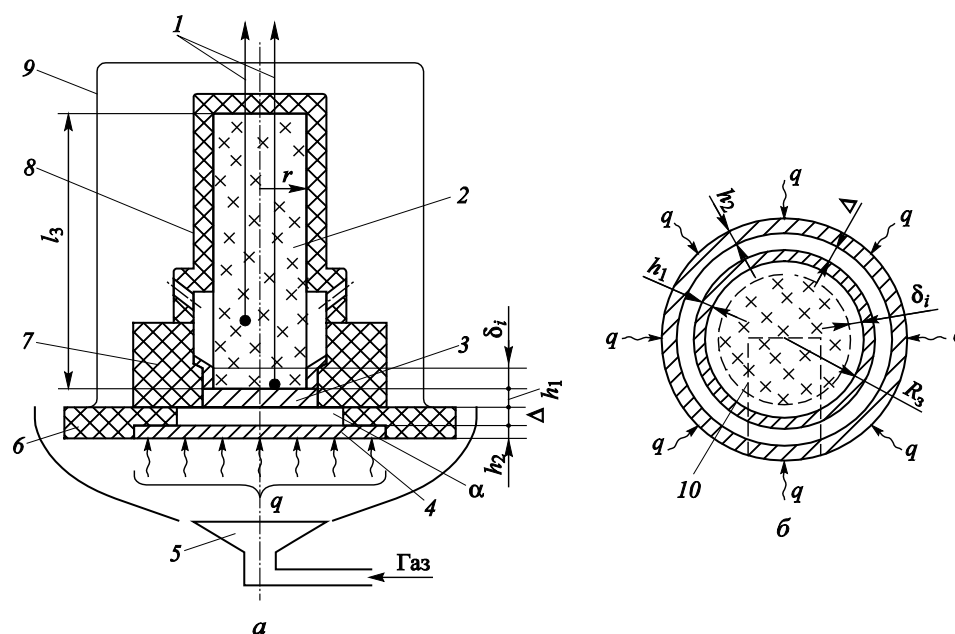
Если заряд в оболочке имеет дополнительную тепловую защиту в виде воздушной прослойки и еще одной оболочки и т. д., то и «вырезанный» образец повторяет все эти особенности. Учитывая, что в условиях реальных пожаров и теплозащит воспламенение наступает в результате теплового взрыва, развивающегося в существенно неадиабатических условиях в приповерхностном слое толщиной 5...20 мм, при создании аналогичной натурным условиям интенсивности подвода теплоты на единицу площади поверхности теплообмена сборки с моделью «теплоносителя» пожара можно с достаточной точностью смоделировать исследуемый процесс. При этом эксперименты, проводимые по схеме с подводом теплоты к плоскому торцу цилиндрического заряда диаметром  $d_3$  и длиной  $l$ , равной радиусу натурального объекта (рис. 1, б), воспроизводят физику процесса с более высокой достоверностью по сравнению с элементарным геометрическим моделированием на малоразмерных макетах с радиальным подводом теплоты (рис. 1, в). Это объясняется тем, что в последнем случае чрезмерно возрастает теплообмен центральных и периферийных слоев заряда вследствие конвективных механизмов, и размеры зоны теплового ускорения реакции до взрывных скоростей становятся соизмеримыми с радиусом модельного заряда. При этом чрезмерно искажается физика развития теплового воспламенения по сравнению с натурным объектом.

Для реализации в лабораторных условиях схемы, приведенной на рис. 1, б, необходимо использование теплоизоляционных материалов (желательно недорогих и доступных), которые были бы достаточно теплосберегающими, не влияли на процесс разложения ВВ и надежно обеспечивали изоляцию реакционной зоны. Конструкция сборки должна надежно обеспечивать требуемый теплоподвод с торца заряда и отсутствие теплоотвода (хотя бы на время задержки воспламенения  $\tau_v$ ) с боковых (радиальных) направлений. С учетом размеров реальных образцов изделий и изложенных выше соображений был выбран модельный заряд высотой  $l \approx 150$  мм. Выбор диаметра заряда  $d_3$  осуществляется исходя из следующих соображений: ограничений по массе зарядов ВВ при проведении экспериментов в бронекамере; наличия в большинстве случаев «стандартизированных» по диаметрам шашек ВВ; минимально допустимых размеров, соответствующих размеру «языка» факела пламени, обеспечивающего примерно одинаковую температуру по всему прогреваемому контуру (с удалением от центра пламени по радиусу температура падает). С учетом приведенных требований для экспериментов были выбраны цилиндрические образцы диаметром  $d_3 = 30...40$  мм.

Сравнительно достоверным и экономичным способом получения информации о температурном воздействии собственно на ВВ или ВС разрывного заряда в конкретной конструкции рассматриваемой си-

стемы (БП в различных условиях хранения) при реальном пожаре является измерение температур с помощью термоэлектрических преобразователей (термопар), вмонтированных в инертный имитатор разрывного заряда, воспроизводящий все основные теплофизические особенности последнего, включая динамику плавления. Искажения реальной картины при этом связаны не столько с отсутствием учета внутреннего химического тепловыделения, сколько с влиянием газовой выделения на температуропроводность ВВ и термическое контактное сопротивление у границы раздела оболочки и заряда.

**Лабораторная установка и методика проведения модельных экспериментов.** На рис. 2, а изображена схема лабораторной экспериментальной сборки с модельным зарядом 2. Генератор теплового потока к модельному заряду состоит из газовой горелки 5 и, в общем случае, рассматриваемой системы из сложной преграды 3, состоящей из слоев металла, и воздушной прослойки  $a$ . Обозначено пятно теплоподвода  $q$  с неоднородностью температуры по радиусу не более  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Варьируя толщину слоев металла  $h_1, h_2$  и воздуха  $\Delta$ , температуру пламени  $T_{\text{п}}$  и коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ , можно достигать требуемого закона изменения температуры  $T_1(t)$  на нижнем торце заряда.



**Рис. 2.** Схема приближенной модели и ее обогреваемой системы (а) и поперечного сечения (б):

1 — термопары; 2 — модельный заряд; 3 — металлическая преграда (донная часть сборки); 4 — наружная металлическая преграда; 5 — газовая горелка; 6 — наружное охранное кольцо; 7, 8 — нижний и верхний теплоизоляторы; 9 — наружная теплоизоляционная оболочка; 10 — фрагмент заряда;  $\alpha$  — воздушная прослойка

На рис. 2, б представлено поперечное сечение достаточно удлиненного цилиндрического заряда ВВ радиусом  $R_3$  с двумя оболочками толщиной  $h_1$  и  $h_2$ , разделенными воздушным промежутком шириной  $\Delta$ , с равномерным подводом теплоты  $q$  к внешней поверхности наружной оболочки. Выделены фрагмент заряда  $l\theta$  и прогретый слой ВВ толщиной  $\delta_i$  ( $\delta_i = \sqrt{a_i t_i}$ , где  $a_i$  — температуропроводность;  $t_i$  — время прогрева соответствующего слоя), при этом  $t_i < \tau_b$ , где  $\tau_b$  — задержка воспламенения (период индукции) равномерно обогреваемого с поверхности заряда с теплоизоляцией на цилиндрической поверхности.

Сборка существенно упрощается при наличии в исследуемой натурной системе одной оболочки, а также при необходимости может быть усложнена добавлением дополнительных оболочек, разделенных воздушными промежутками. Подобный генератор теплоты можно использовать как модель корпуса и дополнительной теплозащиты разрывного заряда БП в условиях воздействия теплоносителя пожара.

Экспериментальная сборка (см. рис. 2, а) изображена упрощенно, без подробной детализации. В частности, на ней не показаны уплотнители воздушных полостей (их роль могут выполнять волокна теплоизоляционного материала, например асбеста). Наружная дополнительная теплоизоляционная оболочка 9 также изображена упрощенно. Предполагая возможность химического взаимодействия ВВ и продуктов его разложения с материалом нижнего теплоизолятора 7, выполненного из текстолита и искажающего условия воспламенения в прогретом слое ВВ, донную часть 3 сборки следует выполнить в виде стаканчика, боковые стенки которого (буртик) изолируют зону реакции от «загрязнения». Для минимизации теплового потока к ВВ через буртик толщину последнего выбирают очень малой (приблизительно 0,3...0,5 мм), а его высота должна быть соизмерима с толщиной  $\delta_i$ , зоны перегрева ВВ, соответствующей получению нежелательного (опасного) исхода. Верхний теплоизолятор 8 в лабораторных условиях может быть изготовлен даже из плотного ватмана. В сборке необходимо также предусмотреть технологические дренажные полости. Взаимодействующее с пламенем наружное охранное кольцо 6 из прочного и термостойкого стеклотекстолита обеспечивает теплоизоляцию боковой поверхности и противоположного торца модельного заряда. Внутри массы исследуемого ВВ или ВС на различных расстояниях размещаются термпары 1 (в принципе для оценки критических параметров воспламенения заряда может быть достаточно одной термпары на границе раздела оболочка — ВВ или в близлежащей зоне прогретого слоя, соответствующего условиям

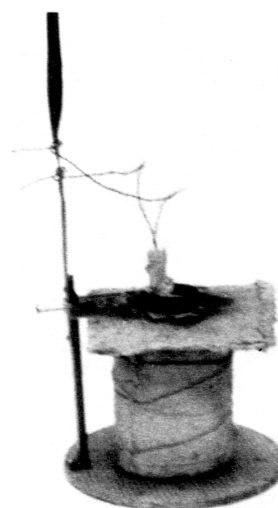
начала необратимых термохимических изменений в составе). Подобная экспериментальная методика исследования поведения тротила и октогена при нагреве цилиндрических шашек из этих материалов с нижнего торца модельного заряда через различные преграды использовалась в работе [16].

**Методика проведения и результаты модельных исследований.** Экспериментальные исследования проводили в специальной бронекамере, имеющей иллюминаторы для визуального наблюдения кино- и фотосъемки, с использованием осциллографической аппаратуры и термопар, принцип действия которых основан на зависимости термоЭДС от значений температуры мест соединения двух разнородных проводников [12]. Использовали хромель-алюмелевые термопары (тип ТХА) толщиной 0,3 мм, позволяющие измерять температуру в диапазоне значений 200...1000 °С (кратковременно до 1300 °С), что соответствовало задаваемым параметрам пожара. Термопары помещали непосредственно в массу исследуемого ВС: основную — на границе оболочка — ВВ строго на оси заряда и всей сборки, вспомогательную — на некотором фиксированном расстоянии 10...30 мм от дна оболочки внутрь заряда ВВ либо строго по оси, либо несколько ближе к его боковой поверхности (см. рис. 2, а). Монтаж термопар в массу заряда ВВ осуществляли с помощью специальных керамических трубок с наружным диаметром 1,5 мм, причем один электрод термопары шел внутри трубки, а другой — снаружи. Трубки вставляли в специально подготовленные отверстия в массе заряда ВВ.

Ввиду погрешности измерения температуры, не превышающей 10...15 °С и обусловленной возможной теплоизоляцией рабочего пространства термопары от ВВ газообразными продуктами разложения и недостаточной теплоизоляцией свободных концов термопар, действительные значения температуры в массе ВВ несколько снижаются. Вследствие тепловой инерционности термопар нельзя с достаточной степенью точности зафиксировать действительные температурные пики при изменении температуры, однако зона резкого подъема фиксируется достаточно точно.

На рис. 3 приведен общий вид сборки для лабораторного эксперимента.

Для фиксирования значений температуры использовали цифровой осциллограф С9-8, установленный вне бронекамеры. На рис. 4



**Рис. 3.** Общий вид сборки для лабораторного эксперимента

показаны типичные осциллограммы процесса для некоторых конкретных условий эксперимента. Обработку осциллограмм проводили машинным пересчетом значений термоЭДС в милливольтгах на температуру в градусах по шкале Цельсия по специальным таблицам. Кроме того, хронометрировали время процесса, а по окончании эксперимента проводили визуальный анализ образцов модельных изделий.

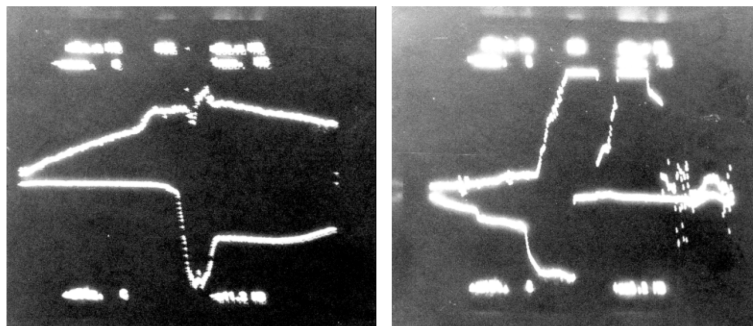
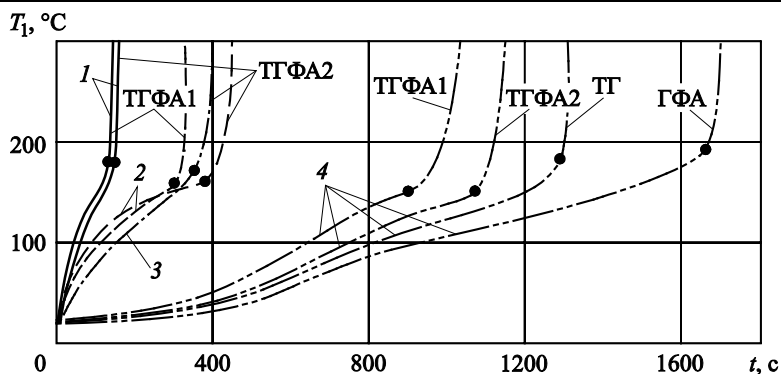


Рис. 4. Типичные осциллограммы процесса

Для сокращения времени и материальных затрат на стадии выбора параметров экспериментальной сборки и ее отладки использовали ранее проведенные расчетные оценки при упрощенной постановке рассматриваемой задачи [11]. При расчете закона изменения температуры  $T_1(t)$  заряд ВВ рассматривали как химически инертный наполнитель с теплофизическими характеристиками реального ВВ, но без учета плавления. Решали одномерную плоскую нестационарную задачу теплопроводности с соответствующими начальными и граничными условиями [9]. Оценивали задержку воспламенения заряда после начала теплового воздействия на него и толщину прогретого слоя, при которых происходит воспламенение

**Анализ результатов экспериментов.** Исследовали ВС, содержащие тротил, гексоген, алюминиевую пудру и флегматизатор при различных параметрах генератора теплоты. На рис. 5 представлены результаты экспериментального измерения температуры на торце теплоотвода к цилиндрическим зарядам диаметром 40 мм и высотой 150 мм для четырех вариантов ВС, условно обозначенных следующим образом: ТГФА1 (20 % тротила, 60 % гексогена, 15 % алюминия, остальное — флегматизатор); ТГФА2 (20 % тротила, 45 % гексогена, 30 % алюминия, остальное — флегматизатор); ТГ (25 % тротила, 75 % гексогена); ГФА (80 % гексогена, 18 % алюминия, остальное — флегматизатор). Флегматизаторы в составах ТГФА1, ТГФА2 и ГФА имели различный состав, чистоту и химическую активность. Структура алюминиевых частиц также была различной.





**Рис. 5.** Экспериментальные зависимости изменения температуры во времени на поверхности различных ВС при различных параметрах генератора теплоты:  
 1 — 800/50/3; Al/0; 2 — 600/50/3; Al/0; 3 — 800/50/20; Al/0; 4 — 800/50/3; Al/10/7; Al;  
 ● — точки, соответствующие воспламенению заряда

Для характеристик вариантов генератора теплоты в рассматриваемой системе (см. рис. 2) приняты следующие обозначения: температура пламени  $T_{п}$ , °C; коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К); толщина  $h_1$ , мм, материала оболочки на торце заряда исследуемого ВС; толщина воздушной прослойки  $\Delta$ , мм; толщина  $h_2$ , мм, материала второй оболочки.

На рис. 5 видно, что характер изменения регистрограмм соответствует принятому в подобных исследованиях: начиная от исходной температуры  $T_0 = 20$  °C, практически сразу (для термопар в контакте с преградой) или с некоторой задержкой (для термопар, удаленных от поверхности преграды в массиве ВС) идет плавный рост температуры  $T_1(t)$  до некоторого момента, когда наступает резкий скачок или «перелом» в плавном изменении этой функции, что указывает на начало реакции разложения ВВ, приводящей к его воспламенению. Соответствующую данному моменту температуру будем называть «критической» (это и есть температура воспламенения  $T_{в}$  — на рис. 5 выделена жирными точками), а время ее реализации — временем задержки воспламенения  $\tau_{в}$ . Происходящие после этого изменения в регистрограмме учитывать не будем — их разнообразный и непредсказуемый вид обусловлен рядом, в том числе и чисто методических, причин: сгорание термопар, их перемещение, обрыв и т. п.

Из анализа экспериментальных данных, приведенных на рис. 5, также следует, что фиксируемые значения температуры воспламенения  $T_{в}$  и времени задержки воспламенения  $\tau_{в}$ , которые определяются точками в местах перегиба кривой  $T_1(t)$ , зависят от конкретного состава и темпа нагрева, определяемых параметрами пожара и конструкцией окружающей заряд теплозащиты. С уменьшением темпа нагрева (уве-

личением времени прогрева системы до момента воспламенения заряда) фиксируемая температура воспламенения уменьшается. Для составов, обозначенных ТГФА, и рассмотренных вариантов генератора теплоты она находилась в диапазоне  $T_{\text{в}} \approx 150 \dots 180$  °С. При этом в случае  $T_{\text{п}} = 800$  °С для конструкции с тонкой металлической оболочкой ( $h_1 = 3$  мм,  $\Delta = 0$ ) время задержки воспламенения  $\tau_{\text{в}} = 2 \dots 2,5$  мин (при этом  $T_{\text{в}} = 180$  °С), что коррелируется с немногочисленными известными данными и косвенно указывает на достоверность результатов в данной методике. При снижении температуры пламени (пожара) до  $T_{\text{п}} = 600$  °С время задержки воспламенения увеличивалось до  $\tau_{\text{в}} = 5 \dots 6,5$  мин, а значение температуры воспламенения уменьшалось до  $T_{\text{в}} = 160$  °С. При переходе на конструктивные схемы с воздушным зазором и дополнительной металлической оболочкой время задержки воспламенения еще более возрастало и доходило до значений  $\tau_{\text{в}} = 15 \dots 17,5$  мин (температура воспламенения при этом снижалась до  $T_{\text{в}} = 150$  °С, температура пожара составляла  $T_{\text{п}} = 800$  °С).

Следует отметить, что употребляемый термин «воспламенение» при анализе результатов экспериментов, особенно при низких темпах нагрева зарядов ВС, носит условный характер, поскольку в момент резкого увеличения температуры наблюдается беспламенная реакция с нарастающим дымообразованием. Лишь с определенной задержкой после воспламенения такое дымообразующее тление переходит в обычное горение с пламенем. Задержка появления пламени после теплового взрыва или воспламенения возрастает по мере уменьшения в составе заряда высококалорийного компонента – гексогена и увеличения содержания алюминиевой добавки, не приводящей на стадии тлеющего режима реакции к дополнительному тепловыделению от окисления, но значительно повышающей теплопроводность смеси. Наличие в составе смеси тротила и гексогена способствует уменьшению температуры воспламенения и увеличению продолжительности тлеющего, беспламенного горения, предваряющего обычное горение состава. Так, при нагреве зарядов генератором теплоты типа 800/50/3, А1/10/7, А1 (схема с воздушным зазором) задержка между появлением реакции с интенсивным дымообразованием и пламенным горением для составов ГФА равна приблизительно 1 мин, ТГ — приблизительно 2 мин и ТГФА — около 3 мин. При этом средняя скорость распространения реакции тлеющего, беспламенного горения у зарядов типа ТГФА составляла 0,3...0,5 мм/с на базе 10...50 мм. С повышением темпа нагрева задержка появления пламенного горения после воспламенения или теплового взрыва сокращается.

**Заключение.** В настоящее время существует ограничение возможности теоретического прогнозирования условий воспламенения

реальных зарядов БП, базирующееся на представлении о гомогенной реакционной способности ВС, особенно с добавками парафиноподобного флегматизатора. Вероятно, что уточнение описания кинетики разложения ВС с учетом автокаталитической направленности процесса и уточнение параметров уравнения кинетики реакции в рамках представлений гомогенной реализационной способности ВС зарядов, изготавливаемых по реально существующим технологиям, не решит проблемы достаточно точного теоретического прогнозирования исхода пребывания конкретного БП в тепловом поле пожара. Поэтому проведение экспериментов даже с приближенным моделированием процесса предпочтительнее математического моделирования начальной стадии взрывной реакции зарядов при оценке их ПВБ в составе БП различного конструктивного исполнения.

В этом случае предложенная приближенная методика оценки ПВБ натурной цилиндрической конструкции, содержащей заряд ВВ или ВС, с использованием лабораторного эксперимента на малоразмерных модельных сборках может позволить при выбранном генераторе теплоты определить искомые температуры воспламенения и времена задержки, обеспечивающие примерно такое же распределение температуры  $T_1(t)$  по поверхности модельного заряда, как и в натурном изделии. На основании полученных значений сравнения с задаваемым тактико-техническими требованиями значением времени допустимого пребывания изделия в тепловом поле реального пожара делается вывод о ПВБ исследуемого изделия.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бабкин А.В., Велданов В.А., Имховик Н.А., Кобылкин И.Ф., Колпаков В.И., Ладов С.В. и др. *Боенприпасы*. В 2 т. В.В. Селиванов, ред. Т. 1 Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016, 506 с.
- [2] Бабкин А.В., Велданов В.А., Имховик Н.А., Кобылкин И.Ф., Колпаков В.И., Ладов С.В. и др. *Боенприпасы*. В 2 т. В.В. Селиванов, ред. Т. 2. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016, 551 с.
- [3] Одинцов В.А., Ладов С.В., Левин Д.П. *Оружие и системы вооружения*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016, 219 с.
- [4] Ладов С.В., Кобылкин И.Ф. *Использование кумулятивных зарядов во взрывных технологиях*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1995, 47 с.
- [5] Радзиевский С.Н., Хнычкин В.М. *Пожаровзрывобезопасность и противопожарная защита кораблей*. Ленинград, Судостроение, 1987, 200 с.
- [6] Кармолин А.Л., Чернюгов А.Д., Коршунов Ю.В. *Безопасная перевозка взрывчатых веществ железнодорожным транспортом*. Москва, Транспорт, 1992, 383 с.
- [7] Гельфанд Б.Е., Сильников М.В. *Взрывобезопасность*. В.С. Артамонов, ред. Санкт-Петербург, Астерион, 2006, 392 с.
- [8] Алексашенко А.А., Кошмаров Ю.А., Молчадский И.С. *Тепломассоперенос при пожаре*. Москва, Стройиздат, 1982, 175 с.

- [9] Юдаев Б.Н. *Теплопередача*. Москва, Высшая школа, 1981, 319 с.
- [10] Авдеевский В.С., Кошкин В.К., ред. *Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике*. Москва, Машиностроение, 1992.
- [11] Андреев С.Г., Ладов С.В., Федоров С.В. Моделирование начальной стадии взрывного превращения разрывных зарядов в условиях пожарного воздействия на боеприпасы. *Оборонная техника*, 1996, № 8–9, с. 13–19.
- [12] Андреев С.Г., Пруденский Г.А. *Исследование поведения зарядов взрывчатых веществ при тепловых воздействиях*. Москва, Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999, 27 с.
- [13] Мержанов А.Г., ред. *Тепломассообмен в процессах горения*. Черногловка, ОИХФ АН СССР, 1980, 152 с.
- [14] Мержанов А.Г., Аверсон А.Э. *Современное состояние тепловой теории зажигания*. Москва, Институт химической физики АН СССР, 1970, 64 с.
- [15] Shvetsov G.A., Matrosov A.D., Fedorov S.V., Babkin A.V., Ladov S.V. Effect of external magnetic fields on shaped-charge operation. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, vol. 38, iss. 6, pp. 521–526.
- [16] Денисаев А.А., Дубовик А.В., Авдеев Е.В., Гушин П.В. Зажигание твердых взрывчатых веществ внешним пламенем через преграду. *Взрывчатые материалы и пиротехника*, 1992, вып. 3 (218), с. 35–40.

Статья поступила в редакцию 18.12.2018

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Андреев С.Г., Ладов С.В., Федоров С.В. Моделирование воздействия теплового поля пожара на заряды взрывчатых веществ в условиях лабораторного эксперимента. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 1.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-1-1837>

**Андреев Сергей Григорьевич** — канд. техн. наук, доцент, чл.-корр. РАЕН, доцент кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 250 научных работ в области теории энергетических материалов, химической физики и экспериментальной газодинамики. e-mail: andreeff2007@mail.ru

**Ладов Сергей Вячеславович** — канд. техн. наук, доцент, чл.-корр. РАЕН, доцент кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 350 научных работ в области физики взрыва. e-mail: ladovsv@bmstu.ru

**Федоров Сергей Владимирович** — старший преподаватель кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 300 научных работ в области физики взрыва и высокоскоростного удара. e-mail: serfed-64@mail.ru

## **Simulation of the fire thermal field effect on the explosive charges in a laboratory experiment**

© S.G. Andreev, S.V. Ladov, S.V. Fedorov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*The article considers a possibility of modeling the initial stage of ignition and decomposition of the charge of an explosive or an explosive composition with different structural insulation when exposed to the thermal field of fire. Approximate modeling on small-sized models was used, associated with using in experiments a fragment of a natural object, where the course of thermal processes coincides with the initial stage of reaction development, determining the undesirable (dangerous) final outcome of external influence. In this case, an external impact on a fragment of a bursting explosive can be characterized by a non-stationary temperature field in an environment having thermal characteristics of explosive compositions, but not possessing chemical activity. A method is proposed for determining the temperature and ignition delay time on small-sized models in laboratory conditions using thermoelectric converters (thermocouples) placed in a bulk of explosive material for measuring temperatures. A laboratory setup has been developed, which allows using a special heat generator to regulate the heat flux (fire field) to the model charge and achieve the required law of temperature variation at the lower end of the charge. An example of the fire and explosion safety estimation is given for samples of explosive mixtures based on TNT and RDX with the aluminum and deterrent additions placed in metal shells with and without an air gap.*

**Keywords:** *thermal field of fire, ammunition bursting explosive, heat generator, thermal explosion, thermoelectric converter, ignition, simulation, fire-and-explosion safety*

### REFERENCES

- [1] Babkin A.V., Veldanov V.A., Imkhovik N.A., Kobylkin I.F., Kolpakov V.I., Ladov S.V., et al. *Boepripasy*. V 2 tomakh. Selivanov V.V., ed. Tom 1 [Ammunition. In 2 vols. Vol. 1]. Moscow, BMSTU Publ., 2016, 506 p.
- [2] Babkin A.V., Veldanov V.A., Imkhovik N.A., Kobylkin I.F., Kolpakov V.I., Ladov S.V., et al. *Boepripasy*. V 2 tomakh. Selivanov V.V., ed. Tom 2 [Ammunition. In 2 vols. Vol. 2]. Moscow, BMSTU Publ., 2016, 551 p.
- [3] Odintsov V.A., Ladov S.V., Levin D.P. *Oruzhie i sistemy vooruzheniya* [Weapons and weapons systems]. Moscow, BMSTU Publ., 2016, 219 p.
- [4] Ladov S.V., Kobylkin I.F. *Ispolzovanie kumulyativnykh zaryadov vo vzryvnykh tekhnologiyakh* [The use of shaped charges in explosive technologies]. Moscow, BMSTU Publ., 1995, 47 p.
- [5] Radzievsky S.N., Khnychkin V.M. *Pozharovzryvobezopasnost i protivopozharnaya zashchita korably* [Fire explosion safety and fire protection of ships]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1987, 200 p.
- [6] Karmolin A.L., Chernugov A.D., Korshunov Yu.V. *Bezopasnaya perevozka vzryvchatykh veshchestv zheleznodorozhnym transportom* [Safe transportation of explosives by rail]. Moscow, Transport Publ., 1992, 383 p.
- [7] Gelfand B.E., Silnikov M.V. *Vzryvobezopasnost* [Explosion safety]. Artamonov V.S., ed. St. Petersburg, Asterion Publ., 2006, 392 p.

- [8] Aleksashenko A.A., Koshmarov Yu.A., Molchadsky I.S. *Teplomassopereenos pri pozhare* [Heat and mass transfer in case of fire]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1982, 175 p.
- [9] Yudaev B.N. *Teplotperedacha* [Heat transfer]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1981, 319 p.
- [10] Avduevsky V.S., Koshkin V.K., eds. *Osnovy teplotperedachi v aviatsionnoy i raketno-kosmicheskoy tekhnike* [Fundamentals of heat transfer in aviation and rocket and space technology]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1992, 528 p.
- [11] Andreev S.G., Ladov S.V., Fedorov S.V. *Oboronnaya tekhnika — Defence Technology*, 1996, no. 8–9, pp. 13–19.
- [12] Andreev S.G., Prudensky G.A. *Issledovanie povedeniya zaryadov vzryvchatykh veshchestv pri teplovykh vozdeystviyakh* [Study of the explosive charge behavior under heat effects]. Moscow, BMSTU Publ., 1999, 27 p.
- [13] Merzhanov A.G., ed. *Teplomassoobmen v protsesse goreniya* [Heat and mass transfer in combustion processes]. Chernogolovka, Otdelenie Instituta khimicheskoy fiziki AN SSSR Publ., 1980, 152 p.
- [14] Merzhanov A.G., Averson A.E. *Sovremennoe sostoyanie teplovoy teorii zazhiganiya* [The current state of thermal ignition theory]. Moscow, Institut khimicheskoy fiziki AN SSSR Publ., 1970, 64 p.
- [15] Shvetsov G.A., Matrosov A.D., Fedorov S.V., Babkin A.V., Ladov S.V. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, vol. 38, issue 6, pp. 521–526.
- [16] Denisaev A.A., Dubovik A.V., Avdeev E.V., Gushchin P.V. *Vzryvchatye materialy i pirotekhnika (Explosives and pyrotechnics)*, 1992, issue 3 (218), pp. 35–40.

**Andreev S.G.**, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Corresponding Member of the RAES, Assoc. Professor of the Department of High-Precision Airborne Devices, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 250 research publications in the field of theory of energetic materials, chemical physics and experimental gas dynamics. e-mail: andreeff2007@mail.ru

**Ladov S.V.**, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Corresponding Member of the RAES, Assoc. Professor of the Department of High-Precision Airborne Devices, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 350 research publications in the field of explosion physics. e-mail: ladovsv@bmstu.ru

**Fedorov S.V.**, Assist. Professor, Department of High-Precision Airborne Devices, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 300 research publications in the field of explosion and high-speed impact physics. e-mail: serfed-64@mail.ru