<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-4-69-76>

УДК 536.46

Воспламенение тринитрорезорцината свинца от нити накаливания в пироузле

А. М. Липанов¹, В. Д. Головатенко²

¹ Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук», Москва, Российская Федерация

² Акционерное общество «Опытное конструкторское бюро «НОВАТОР», Екатеринбург, Российская Федерация, Екатеринбург, Российская Федерация

Показано, что температура воспламенения тринитрорезорцината свинца описывается трансцендентным уравнением, включающим инерционность инициирующего состава и глубину его прогрева. Произведен расчет температуры нити накаливания в момент воспламенения инициирующего вещества. Найдено, что при значениях тока накаливания на нагревательном элементе, близких к 5 А, горение тринитрорезорцината свинца переходит во взрыв (детонацию), а при токе на нити накаливания 2 А скорость его горения находится в пределах от 215 до 750 м/с.

Ключевые слова: пироузел, температура воспламенения, тринитрорезорцинат свинца.

Для цитирования: Липанов А. М., Головатенко В. Д. Воспламенение тринитрорезорцината свинца от нити накаливания в пироузле // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2020. № 4. С. 69–76. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-4-69-76>

For citation: Lipanov A. M., Golovatenko V. D. Ignition of lead styphnate by a filament in an explosive attachment // Vestnik Koncerna VKO "Almaz – Antey". 2020. No. 4. P. 69–76. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-4-69-76>

Поступила 29.10.2020 Отрецензирована 13.11.2020 Одобрена 02.12.2020 Опубликована 30.12.2020

Известно из термодинамики, что температура воспламенения есть интенсивная (качественная) характеристика и вместе с энтропией определяет энергию, которую необходимо подвести к горючему, чтобы началось его горение. Поскольку в каждом конкретном случае скорость подвода энергии от источника нагрева и условия, в которых находится исследуемое вещество, различны, то полученные экспериментальные результаты для описания случаев воспламенения в других устройствах и условиях нагрева не могут быть однозначно использованы. Так, в работах [1–5] приводится значение температуры воспламенения тринитрорезорцината свинца (ТНРС) в пределах от 265 до 280 °С, а температура вспышки

этого вещества, согласно Краткой химической энциклопедии [6], определена величиной в 240 °С. Так как определить температуру воспламенения ТНРС непосредственно в пироузле путем накаливания нити электрическим током не представляется возможным, то необходимо ее аналитически определить, используя теплофизические свойства инициирующего вещества и величину приложенного электрического напряжения на нити накаливания в конкретной конструкции пироузла.

Используемое в опытах пиротехническое устройство (узел) включало два нагревательных элемента (НЭ), изготовленных из константановой проволоки диаметром 40 мкм и длиной 3,3 мм (указана длина контакта проволоки с ТНРС между электрическими штырями в пироузле), припаянной к электрическим

контактам, заключенными в электроизолятор, на которые под давлением 30 МПа был напрессован порошок ТНРС, а поверх него напрессовывалась пиротехническая смесь, изолированная от внешней среды металлической мембраной. Собранная схема помещена в стальную цилиндрическую оболочку, имеющую с одной стороны вывод к электрическим контактам, а с другой – проход для истечения продуктов горения.

На рисунке 1 представлена принципиальная схема установки, состоящая из следующих блоков:

- источник питания Б5.30/10; контактор ТКД 503;
- измерительно-вычислительный комплекс «МАК 520» и преобразователь аналого-цифровой N1 9215 четырехканальный.

Аппаратура обеспечивает стабильное протекание электрического тока по НЭ до момента воспламенения ТНРС величиной 2 и 5 А.

В схеме использованы резисторы марки МЛТ-0,5: R1 – 100 кОм, R2 и R5 – 10 кОм, R3 – 15 кОм, R4 – 1,5 кОм и R6 – 1,0 кОм. С помощью переменного резистора R1, выполненного из проволоки диаметром 1 мм и изготовленного из сплава нихром с бифилярной обмоткой,

калибровался источник питания на соответствующий ток при напряжении питания 27 В для каждого пиротехнического узла вследствие того, что НЭ в изготовленных узлах имели разброс величин омического сопротивления в пределах от 0,8 до 1,1 Ом. Измерение сопротивления НЭ выполнено мостом переносным постоянного тока Р3043 Т2 ТО 3.454.020, имевшим класс точности 5. Собранная схема обеспечивала опрос параметров с частотой 50 кГц.

Метод определения температуры воспламенения спрессованного порошка ТНРС в пиротехническом узле основан на определении промежутка времени между началом протекания электрического тока по рабочему нагревательному элементу и моментом разрушения телеметрического мостика накаливания, расположенного параллельно рабочему на фиксированном расстоянии при воздействии на него продуктов горения (детонации) инициируемого вещества, тем самым позволившим определить количество энергии, затраченной на воспламенение ТНРС в пиропатроне. На основании имеющихся технических данных по пиротехническому узлу плотность уплотненного ТНРС (плотность заряжения) составляла 2,9 г/см³. Из литературных данных [7] при плотности

Рис. 1. Схема установки для определения времени разрыва НЭ в пиропатроне под действием продуктов взрыва ТНРС

заряжения $\Delta = 1$ скорость детонации составляет 1603 м/с, а при плотности заряжения $\Delta = 2,9$ она достигает величины 5200 м/с (данные [1]). Кристаллическая плотность ТНРС равна $3,1 \text{ г/см}^3$, а скорость детонации при этом равна около 5500 м/с. Последняя величина определена из принятия положения, что скорость детонации ТНРС так же, как и скорости детонаций взрывчатых веществ, исследованных авторами [2], линейно зависит от плотности заряжения в испытываемом узле. Для определения начала перемещения продуктов детонации из полости пиротехнического узла, которое принималось и за начало воспламенения нанесенного поверх ТНРС пиротехнического состава, крепился стержень, упирающийся одним концом в защитную мембрану пирозапала (пироузла), а другим концом касался графитового стержня (рис. 2). Момент разрушения графитового стержня свидетельствует о начале перемещения продуктов горения веществ, заключенных в экспериментальный узел. Принято, что грифели, извлеченные из чертежных карандашей диаметром 2 мм, имеют высокую степень хрупкости и, что проверялось экспериментально, с достаточно малым электрическим сопротивлением.

Теоретически для определения температуры воспламенения вещества, запишем уравнение изменения температуры в зависимости от теплового потока, создаваемого нагревательным элементом при протекании по нему электрического тока, в виде:

Рис. 2. Внешний вид пироузла (к графитовому стержню прикреплены токосъемники)

$$\frac{h\ell}{4\alpha} \frac{d(T-T_0)}{dt} + (T - T_0) = \frac{Pth}{\lambda F}, \quad (1)$$

где:

h – глубина прогрева ТНРС перед воспламенением, которая зависит от плотности упаковки порошка инициирующего вещества и его фракции;

ℓ – длина проволоки нагревательного элемента;

α – температуропроводность;

λ – коэффициент теплопроводности ТНРС;

F – поверхность контакта между нитью накаливания и ТНРС, через которую осуществляется теплопередача;

T – температура участка соприкосновения ТНРС с нагревательным элементом, по которому протекает электрический ток;

T_0 – начальная температура испытываемого пироузла;

t – текущее время;

$P = rI^2$ – мощность электрической цепи;

I – величина электрического тока, протекающего по нити накаливания;

r – сопротивление нити накаливания электрического мостика.

Принимается, что тепловой поток от нити накаливания образуется мгновенно и в течение всего процесса является величиной постоянной. Последнее соответствует экспериментальным и расчетным данным К. Дрекопфа (см. [8]). Так, время нарастания тока до величины 2 А (см. ниже на рис. 3) произошло за 0,02 мсек, а промежуток времени нарастания тока до 5 А составлял 0,1 мсек.

Введем обозначения:

$$\frac{h\ell}{4\alpha} = \tau; T - T_0 = y; \frac{Pth}{\lambda F} = \beta. \quad (2)$$

Тогда уравнение (1) примет вид:

$$\frac{\tau dy}{dt} + y = \beta. \quad (3)$$

Ищем решение однородной части уравнения (3)

$$\tau \frac{dy}{dt} + y = 0, \quad (4)$$

решение которого после его интегрирования будет иметь вид:

$$\ln y = -\frac{1}{\tau} t + \ln C, \quad (5)$$

где C – постоянная интегрирования,

или
$$y = C e^{-\frac{1}{\tau} t}. \quad (6)$$

Подставим решение уравнения (6) в дифференциальное уравнение (3) и, полагая постоянную C зависящей от t , получим

$$\tau \left[\frac{dC}{dt} e^{-\frac{1}{\tau} t} - \frac{C}{\tau} e^{-\frac{1}{\tau} t} \right] + C e^{-\frac{1}{\tau} t} = \beta,$$

или
$$\tau \frac{dC}{dt} e^{-\frac{1}{\tau} t} - C e^{-\frac{1}{\tau} t} + C e^{-\frac{1}{\tau} t} = \beta.$$

Преобразуя последнее соотношение, получим

$$\tau \frac{dC}{dt} e^{-\frac{1}{\tau} t} = \beta,$$

и далее
$$\frac{dC}{dt} e^{-\frac{1}{\tau} t} = \frac{\beta}{\tau}.$$

Интегрируя последнее уравнение относительно постоянной C :

$$dC = \frac{\beta}{\tau} e^{\frac{1}{\tau} t} dt, \int dC = \int \frac{\beta}{\tau} e^{\frac{1}{\tau} t} dt,$$

получим

$$C = \frac{\beta}{\tau} \tau e^{\frac{1}{\tau} t} + K = \beta e^{\frac{1}{\tau} t} + K, \quad (7)$$

где K – новая постоянная интегрирования.

Подставляя уравнение (7) в уравнение (6), имеем

$$y = \left(\beta e^{\frac{1}{\tau} t} + K \right) e^{-\frac{1}{\tau} t} = \beta + K e^{-\frac{1}{\tau} t},$$

или
$$y = \beta + K e^{-\frac{1}{\tau} t}.$$

Переходя от условных переменных (2) к действительным, получим:

$$T = T_0 \frac{Pth}{\lambda F} + K e^{-\frac{1}{\tau} t}.$$

Положив $K = -\frac{Pth}{\lambda F}$, находим частное решение:

$$T = T_0 + \frac{Pth}{\lambda F} \left(1 - e^{-\frac{1}{\tau} t} \right), \quad (8)$$

где $\tau = \frac{h\ell}{4a}$ – комплекс, определяющий инерционность системы (или постоянная времени процесса исследуемого устройства, см. [9]).

Решение сформулированной проблемы представлено в виде трансцендентного уравнения. Последнее включает две неизвестные физически зависимые переменные, а именно температуру воспламенения ТНРС и глубину его прогрева h , которые определяются скоростью теплообмена между нитью

накаливания и иницирующим веществом. Динамика прогрева нити накаливания, в свою очередь, зависит от величины протекающего по ней электрического тока. Неопределенность решения может быть устранена путем привлечения экспериментальных данных. Так, приняв данные [8] о мгновенном воспламенении ТНРС при температуре 623 К, определим глубину прогрева h иницирующего вещества с учетом экспериментальных данных, полученных при токе 2 А (рис. 3) и токе 5 А (рис. 4). Примем также, что при малых временах протекания тока по нити накаливания, как это экспериментально показал К. Дрекопф (см. [8]), тепловыми потерями в присоединительные штыри к нити накаливания можно пренебречь, а сама нить накаливания практически по всей длине имеет одну и ту же температуру при протекании по ней вышеуказанных величин электрического тока. При этом принимается, что воспламенение ТНРС может начаться с любого его зерна, находящегося в контакте с нагревательным элементом. По уравнению (8), решенному относительно h , и опытным данным (см. рис. 3 и 4) определялась глубина прогрева ТНРС при принятии температуры воспламенения этого вещества равной 623 К [10].

На рисунках 3 и 4 приведены характерные – при токе 2 и 5 А (сверху вниз) копии осциллограмм. Все испытания проведены при значении температуры окружающей среды 22 °С.

При расчетах использовались физические характеристики ТНРС, определенные для серийно изготавливаемых стандартных устройств, значения которых: $\lambda = 0,165$ Вт/мсек°С и $c = 750$ Дж/кг°С.

Очевидно, что значения температуры воспламенения ТНРС и величины температуры, на которую успеет прогреться нить накаливания при протекании по ней электрического тока за одно и то же время, различны. Это впервые теоретически и экспериментально было определено К. Дрекопфом (см. [8]). Зная количество теплоты, выделившегося в нити накаливания при протекании по ней электрического тока, определяемое по закону Джоуля – Ленца,

Рис. 3. Испытание при протекании по нити накаливания тока 2 А

и физические характеристики нити накаливания (ее массу, теплоемкость металла), определяли температуру, на которую нить накаливания будет нагрета перед воспламенением ТНРС. Естественно, что значение этой температуры будет зависеть от величины тока, протекшего через нить накаливания, и характеристик последней в одной и той же конструкции пиротехнического узла. Так, для случая протекания тока по нити накаливания в 2 А в исследуемом узле нить накаливания нагрета перед воспламенением ТНРС до 890 °С, а при токе в 5 А температура нагрева нити накаливания в момент воспламенения ТНРС находится в пределах 1100...1200 °С (температура плавления константана, как известно, равна 1290 °С). Такая неопределенность связана с тем, что в продукте разложения ТНРС присутствует Рb, а пиротехнический состав в качестве горючего включал алюминий, и после распада окислителя – перхлората калия

в числе проводников электричества появилась жидкая фаза KCl. При этом скорость горения ТНРС при токе 2 А, при расстоянии между активным мостом (нитью накаливания) и пассивным мостом в 4,3 мм, оценена в 215 м/с, а в ряде случаев она ускорялась и достигала величины в 750 м/с. Такое изменение скорости для первичных и вторичных взрывчатых веществ – ускоряющееся горение отмечают авторы [11] и для вторичных взрывчатых веществ. При токе в 5 А можно положить, что происходит взрыв (детонация) ТНРС, так как временная разница между началом горения ТНРС около нити накаливания и моментом разрушения пассивной нити, измеренная на разработанной установке (см. рис. 1), не была выявлена.

Скорость расширения продуктов горения из полости узла определена для случая, представленного на рисунке 3, в 132,5 м/с, а для опыта (см. рис. 4) эта скорость определена в 345 м/с.

Рис. 4. Испытание при протекании по нити накаливания тока 5 А

Расчет толщины прогретого слоя ТНРС перед его воспламенением по уравнению (7) при температуре воспламенения ТНРС, равной 623 К [10], дает для тока, поданного на мостик накаливания 2 А, в первом приближении величину $\approx 0,1$ мкм. Это значение можно сравнить с данными, приведенными в [11] для вторичных взрывчатых веществ Тэна, Гексогена и Тетрила, для которых критический радиус разогрева для случая возбуждения взрыва ударом, с которого начинается горение, имеет величину от 1 до 10 мкм. Таким образом, значение глубины прогрева взрывчатых веществ перед их взрывом (детонацией) определяет и качественное различие между инициирующими и вторичными ВВ. Следует отметить, что, согласно [11], мгновенная температура воспламенения взрывчатого вещества значительно выше, чем при тепловом воздействии (см. [6]), и может быть больше в 1,5–2 раза, исходя из данных, полученных

при возбуждении взрыва ударом взрывчатых веществ.

Найдено, что температура воспламенения инициирующего вещества и глубина прогрева последнего перед воспламенением функционально связаны и описываются трансцендентным уравнением, как показано выше, и, в свою очередь, эта зависимость (по значениям параметров) определяется конкретной конструкцией пирозула. Таким образом, приведенные расчетные величины параметров исследованной конструкции пиротехнического узла показывают порядок неизвестных величин, которые будут наблюдаться при определении искомого параметра и в других конструкциях.

Заключение

1. Температура воспламенения ТНРС в пирозуле как интенсивная составляющая термодинамического уравнения энергии

Дж.В. Гиббса совместно с экстенсивной величиной – глубиной прогрева взрывчатого вещества представлена трансцендентным уравнением.

2. По экспериментальным данным и трансцендентному уравнению определена толщина прогрева спрессованного порошка ТНРС в пироузле, которая составляет около 0,1 мкм при нагреве током 2 А нити накаливания.

3. Скорость горения ТНРС в исследуемом пироузле при токе нагрева 2 А нити накаливания в нагревательном элементе находилась в пределах от 215 до 750 м/с, первое значение соответствует стабильному горению, а большая величина – ускоренному.

4. При токе нагрева нити накаливания в 5 А горение воспламенившегося ТНРС переходит в детонацию, и, предположительно, одновременно происходит взрыв нагревательного элемента пироузла.

5. Скорость истечения продуктов горения пиротехнической навески из использованного в экспериментах пироузла определена в зависимости от величины поданного электрического тока на нить накаливания в пределах от 132,5 до 345 м/с.

Список литературы

1. Штетбахер А. Пороха и взрывчатые вещества. М.: Главная редакция химической литературы, 1937. 619 с.

2. Будников М.А., Левкович Н.А., Быстров И.В., Сиротинский В.Ф., Шехтер Б.И. Взрывчатые вещества и пороха. М.: Государственное издательство оборонной промышленности, 1955. 363 с.

3. Андреев К.К., Беляев А.Ф. Теория взрывчатых веществ. М.: Государственное научно-техническое издательство Оборонгиз, 1960. 595 с.

4. Росси Б.Д., Поздняков З.Г. Промышленные взрывчатые вещества. Справочник. М.: Недра, 1971. 176 с.

5. Герасимов В.А., Зуйков А.И. Взрывчатые вещества. Конспект лекций. Тула: Тульский политехнический институт, 1977. 59 с.

6. Краткая химическая энциклопедия. Том 5 (Т–Я). М.: Советская энциклопедия, 1957. С. 261–262.

7. Росси Б.Д. Константы взрывчатых веществ для горной промышленности. 1948.

8. Лурье А.И. Электрическое взрывание зарядов. М.: Углетехиздат, 1957. 290 с.

9. Кочеров А.В. Постоянная времени. Большая Советская Энциклопедия. М.: Издательство Советская Энциклопедия, т. 20, 1975. С. 419 (ст. 1244–1245).

10. Бубнов П.Ф. Иницирующие взрывчатые вещества. Ч. 1. М.: Государственное издательство оборонной промышленности, 1940. 324 с.

11. Боуден Ф.П., Иоффе А.Д. Возбуждение и развитие взрыва в твердых и жидких веществах. М.: Иностранная литература, 1955. 119 с.

Об авторах

Липанов Алексей Матвеевич – доктор технических наук, академик РАН, главный научный сотрудник Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук», Москва, Российская Федерация.

Область научных интересов: анализ, разработка и испытание твердотопливных двигателей для летательных аппаратов.

Головатенко Владислав Денисович – кандидат технических наук, заслуженный конструктор России, ведущий инженер-конструктор Акционерного общества «Опытное конструкторское бюро «НОВАТОР», Екатеринбург, Российская Федерация

Область научных интересов: исследование импульсных процессов, протекающих в установках малой мощности автоматизации летательных аппаратов.

Ignition of lead styphnate by a filament in an explosive attachment

Lipanov A. M.¹, Golovatenko V. D.²

¹ Keldysh Institute of Applied Mathematics, Moscow, Russian Federation

² Novator JSC, Ekaterinburg, Russian Federation

It is shown that the ignition temperature of lead styphnate can be described by a transcendental equation including the inertia of the initiating composition and the depth of its heating. The filament temperature at the moment of ignition of the initiating substance was calculated. It was found that, when the heating element current is close to 5 A, the combustion of lead styphnate leads to an explosion (detonation). At the same time, when the filament current equals 2 A, the combustion rate of lead styphnate ranges from 215 m/s to 750 m/s.

Keywords: explosive attachment, ignition temperature, lead styphnate

Information about the authors

Lipanov Alexey Matveevich – Dr. Sci. (Engineering), RAS Academician, Chief Researcher, Keldysh Institute of Applied Mathematics, Moscow, Russian Federation.

Research interests: analysis, development and testing of solid-fuel engines for aircrafts.

Golovatenko Vladislav Denisovich – Honoured Design Specialist of Russia, Cand. Sci. (Engineering), Leading Design Engineer, Novator JSC, Ekaterinburg, Russian Federation.

Research interests: investigation of impulse processes occurring in low-power devices for aircraft automation.