

ДОСЛІДЖЕННЯ ЧАСУ СПРАЦЮВАННЯ ЕЛЕКТРОДЕТОНАТОРІВ

О. І. Кашуба, докт. техн. наук (МакНДІ), А. В. Примак, студ., Ю. В. Манжос, канд. техн. наук (ДонНТУ)

Предпринята попытка теоретически определить время срабатывания электродетонаторов мгновенного действия. Показано, что время срабатывания, определенное теоретически, существенно отличается от показателей, полученных во время проведения измерений.

Ключевые слова: электродетонатор, время срабатывания, воспламеняющая головка, температура воспламенения.

Зроблено спробу теоретично визначити час спрацювання електродетонаторів миттєвої дії. Показано, що час спрацювання, визначений теоретично, суттєво відрізняється від показників, отриманих під час проведення вимірювань.

Ключові слова: електродетонатор, час спрацювання, запалювальна головка, температура спалаху.

An attempt to define theoretically the actuating time of electrodetonators of instant action is undertaken. Theoretically determined actuating time differs essentially from the values received during carrying out of measurements.

Keywords: electrodetonator, actuating time, ignition head, temperature of ignition.

Вступ. Електродетонатор (ЕД) – це пристрій для ініціювання вибухового перетворення в основному заряді вибухової речовини (ВР) при проведенні підривних робіт. На цей час промисловість України виробляє і використовує ЕД нормальної чутливості до електричного імпульсу миттєвої, короткоуповільненої та уповільненої дії. Згідно з чинними нормативно-технічними документами час спрацювання ЕД миттєвої дії нормальної чутливості до електричного імпульсу при силі струму 1 А повинен становити 4 ± 2 мс, тобто від 2 до 6 мс.

Мета даної роботи – теоретично визначити час спрацювання ЕД миттєвої дії і виявити фактори, які викликають такий великий розкид часу. Розрахунки та дослідження проводились авторами для запобіжних ЕД типу ЕДКЗ-ПМ миттєвої дії.

Час спрацювання ЕД миттєвої дії складається з таких величин:

$$\tau = \tau_{\text{нагр}} + \tau_{\text{інд}} + \tau_{\text{пер}} + \tau_{\text{горІВР}} + \tau_{\text{детІВР}} + \tau_{\text{детБВР}},$$

де $\tau_{\text{нагр}}$ – час нагріву містка ЕД і запалювального складу головки до температури спалаху; $\tau_{\text{інд}}$ – час індукції запалювального складу; $\tau_{\text{пер}}$ – час передачі горіння ініціюючому складу; $\tau_{\text{горІВР}}$ – час горіння ініціюючої вибухової речовини (ІВР); $\tau_{\text{детІВР}}$ – час детонації ІВР; $\tau_{\text{детБВР}}$ – час детонації бризантної вибухової речовини (БВР).

Для розрахунку $\tau_{\text{нагр}}$ необхідно задати або розрахувати вихідні дані, до яких відносяться теплопровідність, теплоємність, щільність компонентів запалювального складу, його температура спалаху, а також параметри містка розжарювання.

Авторами експериментально, в лабораторних умовах, згідно з [1] встановлено, що температура спалаху запалювальної головки становить 186 °С.

Запалювальна головка складається з трьох шарів: запалювальний склад першого шару – 1 % Pb_3O_4 , по 49,5 % KClO_3 та $\text{Pb}(\text{CNS})_2$; другий шар – інертний склад, що містить 3...5 в. ч. нітроклею, основним компонентом якого є нітроцелюлоза (НЦ), і 1 в. ч. Fe_2O_3 ; третій шар – підфарбований нітролак.

Щільність ρ компонентів складу, згідно з різними джерелами, дорівнює: KClO_3 – 2,32 г/см³, Pb_3O_4 – 8,79 г/см³ [2], $\text{Pb}(\text{CNS})_2$ – 3,82 г/см³ [3], Fe_2O_3 – 5,25 г/см³ [2], НЦ – 1,61 г/см³ [4].

Згідно з даними, взятими з довідкової літератури, питома теплоємність C_p (Дж/кг·К) компонентів, поділена на молекулярну масу для отримання необхідної нам розмірності, дорівнює: KClO_3 – 818,37, Pb_3O_4 – 214,39 [5], $\text{Pb}(\text{CNS})_2$ – 371,89, Fe_2O_3 – 648,75 [2].

Визначимо теплопровідність цих компонентів за формулою [5]:

$$\lambda = \rho \cdot C_v \cdot \omega \cdot L,$$

де C_v – теплоємність речовини при постійному об'ємі (приблизно можна прийняти ізобарну теплоємність C_p); ω – швидкість звуку в речовині; L – розмір кристалічного зерна.

Знаючи, що компоненти складу запалювальної головки просіюються через сито № 49, розмір чарунки якого становить 125 мкм [6], і приймаючи, що швидкість звуку в кожному з компонентів приблизно дорівнює 2000 м/с, можна визначити теплопровідність λ (Вт/м·К) компонентів: $\text{KClO}_3 = 474655$; $\text{Pb}_3\text{O}_4 = 471122$; $\text{Pb}(\text{CNS})_2 = 355155$; $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 851484$.

Знаючи теплопровідність окремих компонентів, можна визначити теплопровідність шарів запалювальної головки за рівнянням адитивності.

Теплопровідність λ (Вт/м·К) першого шару:

$$\lambda_1 = 474655 \cdot 0,495 + 355155 \cdot 0,495 + 471122 \cdot 0,01 = 415467.$$

Знаючи загальну середню теплопровідність НЦ (0,23 Вт/м·К [7]) і її вміст у другому шарі (приблизно 75 %), визначимо теплопровідність другого шару:

$$\lambda_2 = 0,23 \cdot 0,75 + 851484 \cdot 0,25 = 212871.$$

В розрахунках нехтуємо наявністю третього шару, оскільки він порівняно тонкий, а його основним складовим елементом є нітроцелюлоза (колоксилін), як і в другому шарі.

За рівнянням адитивності розрахуємо щільність першого і другого шарів, знаючи їх маси (відповідно 0,17 і 0,053 г) і загальну щільність запалювальної головки:

$$\rho_1 = (3,82 + 2,32) \cdot 0,495 + 8,79 \cdot 0,01 = 3,13 \text{ г/см}^3;$$

$$\rho_2 = 1,61 \cdot 0,75 + 5,25 \cdot 0,25 = 2,52 \text{ г/см}^3;$$

$$\rho = 3,13 \cdot \frac{0,17}{0,223} + 2,52 \cdot \frac{0,053}{0,223} = 2,99.$$

Умовно приймаючи форму запалювального складу кулеподібною, визначимо радіуси запалювальної головки і товщину кожного шару (см):

$$R = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot V}{4 \cdot \pi}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot m}{4 \cdot \pi \cdot \rho}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 0,223}{4 \cdot \pi \cdot 2,99}} = 0,26;$$

$$\delta_1 = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 0,17}{4 \cdot \pi \cdot 3,13}} = 0,23;$$

$$\delta_2 = 0,26 - 0,23 = 0,03.$$

Коефіцієнт тепловіддачі ($\text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$) у навколишнє середовище визначимо за формулою [8]:

$$\alpha = 9,74 + 0,07 \cdot \Delta t = 9,74 + 0,07 \cdot (186 - 25) = 21,01.$$

Для визначення часу нагріву запалювального складу до температури спалаху розрахунковим шляхом визначимо час, за який зовнішня поверхня першого шару запалювального складу прогріється до температури спалаху, тобто до 186°C . Розрахунок проводимо подібно розрахунку ізоляції.

Визначимо загальний коефіцієнт теплопередачі ($\text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$):

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} = \frac{1}{\frac{1}{21,01} + \frac{0,0023}{415467} + \frac{0,0003}{212871}} = 21,01.$$

Температуру зовнішньої поверхні першого шару визначимо за формулами

$$q = K \cdot (t_m - t),$$

де t_m – температура містка; t – температура навколишнього середовища (25°C) і

$$t_3 = t_m - q \cdot \frac{\delta_1}{\lambda_1},$$

де t_3 – температура зовнішньої поверхні першого шару електрозапалювальної головки.

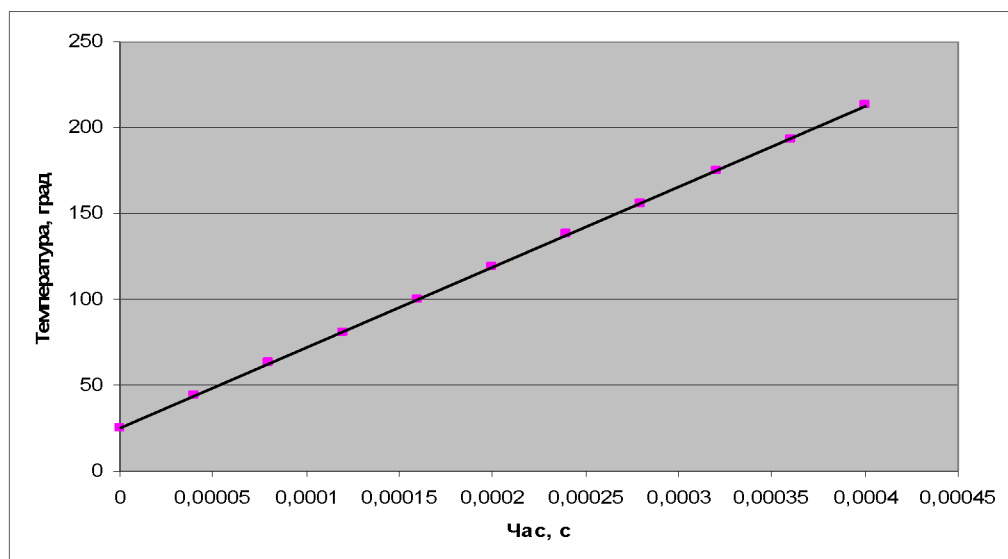
Розрахунок температури нагріву електричного містка і залежну від неї температуру зовнішньої поверхні першого шару виконаємо на ЕОМ за наведеними формулами зі зміною часу нагріву.

Температуру містка визначимо за формулою

$$t_m = \frac{I^2 \cdot R \cdot \tau}{m \cdot C_p} + t,$$

де I^2 – сила струму (1 А); R – опір містка (2 Ом); m – маса містка (розрахована за його параметрами); C_p – теплоємність ніхромову [2].

Розрахунок на ЕОМ показав, що запалювальний склад прогрівається одночасно з електричним містком (що пов'язано з високою теплопровідністю складу) і досягає температури спалаху за час $\tau = 0,00034$ с (рисунок). Однак при такій температурі суміш має великий час індукції, тому для запалення необхідно прогріти до температури спалаху весь перший шар головки.



Графік нагріву електричного містка і першого шару запалювальної головки
Час індукції запалювального складу визначимо за формулою [1]

$$\tau_{\text{інд}} = C \cdot e^{\frac{E}{R \cdot T}},$$

де C – стала, що залежить від складу; E – енергія активації складу, кал/моль; R – газова стала (1,986) кал/моль·град; T – температура в кельвінах.

Приймаючи за енергію активації складу енергію активації бертолетової солі $E = 226$ кДж/моль ≈ 54000 кал/моль [9] як головного сенсibilізатора, визначимо час індукції (с) запалювального складу при температурі спалаху:

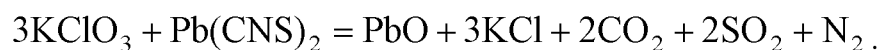
$$\tau_{\text{інд}} = 2 \cdot 10^{-4} \cdot e^{\frac{54000}{1,986 \cdot 469}} = 0,001066.$$

Враховуючи, однак, що електричний місток гріється швидше і через 0,00064 с його температура становитиме 372 °С (лінійна залежність на рисунку), визначимо час індукції запалювального складу:

$$\tau_{\text{інд}} = 2 \cdot 10^{-4} \cdot e^{\frac{54000}{1,986 \cdot 645}} = 14 \cdot 10^{14}.$$

У цьому випадку нехтуємо часом індукції складу, а за суму часу нагріву містка і часу індукції приймаємо подвоєний час нагріву містка до температури спалаху складу запалювальної головки.

Час передачі горіння ініціюючому складу $\tau_{\text{пер}}$ залежить від швидкості горіння складу запалювальної головки і від теплоти реакції. Реакція горіння першого шару електрозапалювальної головки проходить за схемою:



Кількість теплоти, що виділяється при проходженні реакції, становить 4885,83 кДж [5, 10] на 690,5 г суміші, що відповідає 7,08 кДж на 1 г суміші. При повному згорянні першого шару виділяється 1203 Дж теплової енергії. Ця енергія йде на розігрів другого шару і продуктів реакції. Знаючи масу головки і її теплоємність ($C_p = 0,457$ Дж/г·К), визначені автором за даними [5]), визначимо різницю температур (°С), на яку теоретично можуть нагрітися продукти реакції і компоненти другого шару запалювальної головки:

$$\Delta T = \frac{Q}{m \cdot C_p} = \frac{1203}{0,223 \cdot 0,457} = 11804.$$

Відомо, що при температурі 390 °С азид свинцю спалахує миттєво [11], тому можна впевнено стверджувати, що енергії, яка виділяється при згорянні запалювального складу, цілком достатньо для ініціювання азиду свинцю. Передача імпульсу від запалювальної головки до ІВР здійснюється лише після того, коли горіння першого шару від центру вийде на поверхню, до другого шару. У процесі проведення експериментів було відмічено, що горіння електрозапалювальної головки проходить у формі вибуху. Згідно з [12] швидкість детонації хлорату калію з різними пальними матеріалами становить приблизно 1500 м/с. Знаючи, що найменший лінійний розмір краплі складає 2 мм, можна визначити час (с) виходу горіння першого шару на поверхню:

$$\tau = \frac{0,002}{1500} = 0,0000013.$$

Умовно приймаємо цей час за час передачі горіння до ІВР.

Час горіння ІВР $\tau_{\text{горІВР}}$ до переходу його в детонацію становить менш ніж 1 мкс [11] (для розрахунків візьмемо 1 мкс).

Знаючи, що азид свинцю запресовується в ковпачок діаметром 5,25 мм і користуючись іншими його параметрами [11], можна визначити висоту його запресовки H (см) і $\tau_{\text{детІВР}}$ (с):

$$H = \frac{m}{\rho \cdot \pi \cdot R^2} = \frac{0,15}{4,73 \cdot 3,14 \cdot 0,525^2} = 0,04;$$

$$\tau_{\text{детІВР}} = \frac{0,0004}{4500} = 9 \cdot 10^{-8}.$$

Виходячи з швидкості детонації вторинного заряду та його довжини, можна визначити $\tau_{\text{детБВР}}$. Згідно з конструкцією ЕДКЗ-ПМ вторинний заряд має довжину 0,022 м і швидкість детонації близько 7500 м/с. Тому $\tau_{\text{детБВР}}$ становить $\frac{0,022}{7500} = 0,00000293$ с або біля 3 мкс.

Маючи всі необхідні дані, можна визначити загальний теоретичний час (с) спрацювання ЕД:

$$\tau = 0,00034 \cdot 2 + 0,0000013 + 0,000001 + 0,00000009 + 0,000003 = 0,00068539.$$

Таким чином, час спрацювання ЕД миттєвої дії становить 0,69 мс. Великий розкид між теоретичним часом спрацювання ЕД і тим, що спостерігається на практиці, можна пояснити конструкцією ЕДКЗ-ПМ, у якого відстань від електрозапалювальної головки до ковпачка з ІВР, яку повинні подолати розжарені часточки Fe_2O_3 , становить близько 20 мм.

Висновки

Час спрацювання промислових ЕД миттєвої дії типу ЕДКЗ-ПМ набагато більший, ніж розрахований у цій роботі теоретично.

Для зменшення часу спрацювання ЕД необхідно наблизити краплю до ІВР, змінивши конструкцію детонатора, або змінити склад запалювальної головки.

1. Баум Ф. А., Станюкович К. П., Шехтер Б. И. Физика взрыва. – М.: Гос. изд. физико-математической литературы, 1959. – 800 с.
2. Физические величины: Справочник / А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский и др.; под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
3. <http://www.lookchem.com/Lead-ii-thiocyanate/>
4. <http://www.pirotehnika.ruhelp.com/index.php?showtopic=680>
5. *Краткий справочник физико-химических величин*. Изд. 9-е / под ред. А. А. Равделя и А. М. Пономаревой. – СПб.: Специальная литература, 1998. – 232 с.
6. <http://www.service-vm.ru/>
7. http://www.efunda.com/materials/polimers/properties/polimer_datasheet/cfm?majorID=cellulose&minorID=6
8. Павлов К. Ф., Романков П. Г., Носков А. А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. Учебное пособие для ВУЗов / под ред. чл.-корр. АН СССР П. Г. Романкова. – 10-е изд., перераб. и доп. – Л.: Химия, 1987. – 576 с., ил.
9. <http://www.bestreferat.ru/referat-61557.html>
10. Карпетянц М. Х., Карпетянц М. Л. Основные термодинамические константы неорганических и органических веществ. – М.: Химия. – 1968. – 469 с.
11. Светлов Б. Я., Яременко Н. Е. Теория и свойства промышленных взрывчатых веществ. – М.: Недра. – 1973. – 208 с.
12. Шидловский А. А. Основы пиротехники: Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение. – 1964. – 340 с.