

УДК 662.113.3:66.011

ПОДЖАРСЬКИЙ М. А., к.т.н., доцент; ЯРЛИКОВА В. О., магістрант
Дніпровський національний університет ім. О. Гончара

ДОСЛІДЖЕННЯ ГОРІННЯ МЕРЕХТЛИВИХ ПІРОТЕХНІЧНИХ ВИРОБІВ

Досліджено процес горіння мерехтливих піротехнічних виробів, які містять металеве та неметалеве пальне. Запропоновано методику дослідження засновану на порівнянні експериментальних та розрахункових даних, яка дозволяє створювати мерехтливі піротехнічні вироби з заданою тривалістю інтервалу між спалахами.

Ключові слова: мерехтливий піротехнічний виріб, горіння, феєрверк, тепловий баланс.

DOI: 10.20535/2617-9741.1.2020.207803

© Поджарський М. А., Ярликowa В. О., 2020.

Постановка проблеми. Мерехтливі, або пульсуючі, піротехнічні вироби, горіння яких супроводжується серіями яскравих спалахів, використовуються в техніці феєрверків для створення оригінальних світлових картин.

Аналіз попередніх досліджень. Як впливає з відомих робіт [1–5], діапазон характеристик таких виробів досить широкий. Зокрема, тривалість інтервалу між спалахами може становити як соті частки секунди, так і декілька секунд. Разом з тим, в літературі відсутні детальні дані про природу пульсуючого характеру горіння і кількісні характеристики процесів, що при цьому протікають. Внаслідок відсутності теоретичної бази розробникам піротехнічної продукції доводиться йти емпіричним шляхом, спираючись лише на експериментальний досвід. Невирішеною науковою проблемою є відсутність теоретичного підходу до розробки мерехтливих піротехнічних виробів з заданою тривалістю інтервалу між спалахами.

Дослідження, результати якого викладені у статті, проведено вперше.

Метою статті є отримання даних про кількісні характеристики процесів, що протікають під час горіння мерехтливих піротехнічних виробів, та розробка методики, яка дасть можливість створювати вироби, параметри горіння яких – у першу чергу тривалість інтервалу між спалахами – були би заздалегідь передбачуваними.

Виклад основного матеріалу. Пульсуючий характер горіння є слідством паралельного протікання процесів з різними часовими масштабами. Є, щонайменше, два види таких процесів: швидкі екзотермічні реакції горіння і повільна втрата теплоти в навколишнє середовище. Швидкість останньої, крім іншого, залежить від величини поверхні тепловіддачі, яка визначається діаметром виробу, якщо той має форму тіла обертання. Змінюючи діаметр, вочевидь, можна впливати на швидкість тепловіддачі, а разом з тим і на характер горіння. З цього припущення випливає задача дослідження – вивчити горіння мерехтливих виробів циліндричної форми, які розрізняються лише діаметром.

Результати отримували шляхом порівняння експериментальних даних про тривалість інтервалу між спалахами з даними, що були одержані розрахунковим шляхом.

Досліджувалися вироби наступного складу (% мас.): порошок алюмінієво-магнієвого сплаву фракції 0,09–0,125 мм – 22, азотнокислий стронцій – 50, сірка – 20, хлорат калію – 4, декстрин – 4 [6].

Компоненти складу подрібнювали в порцелянових ступках, просівали через сита Prüfsiebring 2 TGL 7354, змішували, з отриманої суміші формували циліндричні зразки різного діаметру, які потім сушили на повітрі протягом доби.

Тривалість інтервалу між спалахами визначали наступним чином. Зразок встановлювали вертикально і підпалювали його верхній торець. Процес горіння фіксували за допомогою запам'ятовуючого осцилографа С8-12, до входу якого був підключений фотоелемент. Інтервал між спалахами визначали за шкалою екрана як відстань між піками осцилограми.

За нашими спостереженнями в процесі горіння зразку відбувається наступне. Під час запалювання на деякій його ділянці загоряється неметалеве пальне – сірка. Вона загоряється легко, але горить повільно, розігріваючи склад на цій ділянці до температури займання металевого пального. Останнє загоряється важче, але згорає швидко зі спалахом.

Температура займання порошку металевого пального складає 410°C. Її визначили шляхом нагрівання алюмінієво-магнієвого сплаву з азотнокислим стронцієм в тиглі, в який була поміщена термопара.

Різкий спалах металевого пального супроводжується розкиданням розпечених продуктів згоряння, через що вони не мають можливості запалити наступну порцію металу. Проте сірка продовжує горіти, тому цикл повторюється.

Тривалість інтервалу між спалахами визначається часом розігріву ділянки зразка сіркою, що горить, до температури займання металевого пального.

Теоретично цей час визначали шляхом розрахунку теплового балансу деякої ділянки діаметром D і довжиною l зразка циліндричної форми.

Диференціальне рівняння, що описує прихід теплоти за рахунок реакції горіння сірки в об'ємі $\pi D^2 l / 4$ має наступний вигляд:

$$\frac{dQ_p}{d\tau} = \frac{dC_s}{d\tau} \frac{\pi D^2}{4} l q, \text{ Вт} \quad (1)$$

де $dC_s/d\tau$ – швидкість реакції горіння сірки, кг/(м³с);

q – тепловий ефект реакції, Дж/кг.

Горіння елементарної сірки – складний гетерогенний процес, що складається із стадій плавлення сірки, її випаровування і власне хімічної реакції. За низьких значень температури, до 200°C, він протікає в кінетичній області [7], тому для розрахунків доцільно використовувати положення формальної кінетики.

Сірка горить у надлишку кисню, що надходить з окиснювача і навколишнього повітря. Приймаючи з цієї причини, що швидкість реакції визначається тільки концентрацією сірки, і реакція має перший порядок, допускаючи, що горіння відбувається у всьому об'ємі $\pi D^2 l / 4$, напишемо рівняння швидкості

$$\frac{dC_s}{d\tau} = -k C_s, \text{ Вт} \quad (2)$$

де k – константа швидкості реакції, с⁻¹; C_s – масова концентрація сірки у зразку, кг/м³.

Константу швидкості реакції розрахуємо за рівнянням Арреніуса

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E}{R(t+273)}\right), \text{ Вт} \quad (3)$$

де k_0 – передекспоненціальний множник, с⁻¹; E – енергія активації, Дж/моль; R – універсальна газова стала, Дж/(моль·К); t – температура, °C.

Теплота, що утворюється, нагріває зразок і частково втрачається в навколишнє середовище. Рівняння теплового балансу має вигляд

$$\frac{dQ_p}{d\tau} = \frac{dQ_H}{d\tau} + \frac{dQ_{\text{втр.}}}{d\tau}, \text{ Вт} \quad (4)$$

Кількість теплоти, яка нагріває зразок

$$\frac{dQ_H}{d\tau} = \bar{c} \rho \frac{\pi D^2}{4} l \frac{dt}{d\tau}, \text{ Вт} \quad (5)$$

де \bar{c} – середня питома теплоємність матеріалу зразку, Дж/(кг·К); ρ – густина матеріалу зразку, кг/м³. Для даного складу $\bar{c} = 840$ Дж/кг·К, $\rho = 2533$ кг/м³.

Приймаємо, що втрата теплоти відбувається тільки через бічну поверхню циліндричного зразка. Тоді кількість теплоти, яка втрачається в навколишнє середовище

$$\frac{dQ_{\text{втр.}}}{d\tau} = \alpha \pi D l (t - t_c), \text{ Вт} \quad (6)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К); t_c – температура навколишнього середовища, °C; t – температура в зоні реакції, °C.

Перетворенням рівнянь (1), (4) – (6) отримуємо наступне диференціальне рівняння:

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{dC_s}{d\tau} \frac{q}{\bar{c}\rho} - \frac{4\alpha}{\bar{c}\rho D} (t - t_c), \text{ Вт} \quad (7)$$

Слід зазначити, що внаслідок зроблених припущень у цій моделі довжина ділянки зразка l значення не має.

На рис.1 показано рішення системи диференціальних рівнянь (2), (3) і (7), отримане з допомогою MathCad у вигляді сімейства кривих для зразків різних діаметрів.

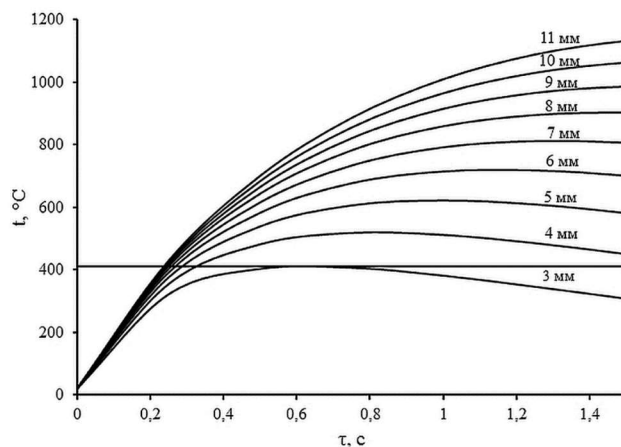


Рис. 1 – Розрахункова динаміка температури ділянки зразка для різних значень його діаметра (цифри на кривих)

Очевидно, що зі збільшенням діаметра зразка зростає швидкість його розігріву, що пояснюється зниженням питомих втрат теплоти в навколишнє середовище через зменшення відношення величини зовнішньої поверхні ділянки зразка до її об'єму (висхідні ділянки кривих).

Оскільки дана модель враховує тільки горіння сірки, але не займання металевого пального, криві мають спадні ділянки, обумовлені природним охолодженням зразка.

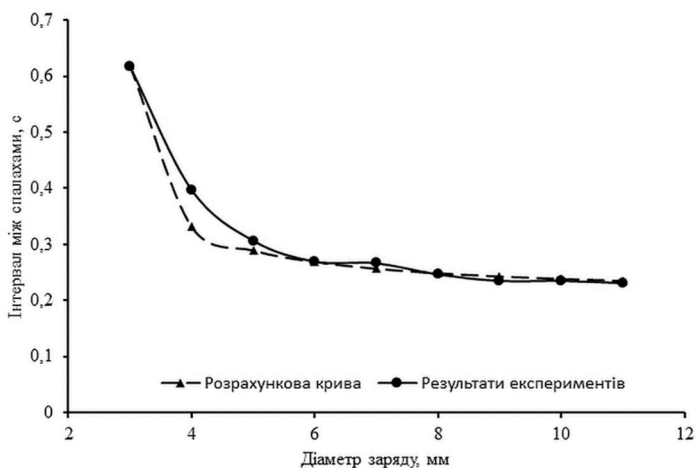


Рис. 2 – Розрахункова та експериментальна залежності тривалості інтервалу між спалахами від діаметра зразка

На рис.2 показана залежність часу розігріву ділянки зразка до температури 410°C (перетин кривих на рис. 1 з горизонтальною лінією) від величини його діаметру. Там же наведена експериментальна крива, кожна точка якої отримана усередненням 10–12 результатів.

Очевидно, що припущення про вплив величини діаметра мерехтливого піротехнічного виробу на характер його горіння, підтвердилося. Збільшення діаметра майже вчетверо дозволяє зменшити інтервал між спалахами у три рази.

Величина діаметра 11 мм для зразків дослідженого складу виявилася граничною. Більші зразки не «пульсують» – горять безперервно. Однак горить не вся їх поверхня, а лише окремі ділянки, причому зона горіння безперервно переміщаються по ній.

В ході розрахунків значення коефіцієнтів рівнянь (2), (3) і (7) умисно задавалися таким чином, щоб домогтися максимального співпадіння розрахункової кривої з експериментальною. Мається на увазі, що саме такі значення адекватно описують реальні процеси і, власне, є тими кількісними характеристиками процесів, що протікають під час горіння мерехтливих виробів, знаходження яких було метою дослідження. Вони є такими.

Коефіцієнт тепловіддачі та передекспоненціальний множник. Втрата теплоти в навколишнє середовище відбувається не тільки за рахунок випромінювання теплоти поверхнею зразка і конвективного руху повітря, що її обтікає, але також з масовим потоком газоподібних продуктів згорання. Знаходження коефіцієнта α для цього нетипового випадку тепловіддачі [8] є темою подальшого дослідження, тому для даного розрахунку його підбирали. Теж саме можна сказати і про величину передекспоненціального множника. Використані значення склали, відповідно, $\alpha=5514 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ і $k_0=0,125 \text{ с}^{-1}$.

Початкова концентрація сірки $C_S=545 \text{ кг}/\text{м}^3$ була завищена в порівнянні розрахованою для зазначеного складу $506 \text{ кг}/\text{м}^3$. Це більш відповідає реальному стану речей, тому що частина сірки при нагріванні плавиться і витікає на поверхню зразка, де і горить.

Тепловий ефект реакції. Частина теплоти горіння сірки витрачається на розкладання нітрату стронцію. З цієї причини в розрахунку використана величина теплового ефекту $q=8,47 \text{ МДж}/\text{кг}$, яка менше величини $9,28 \text{ МДж}/\text{кг}$, наведеної в [6].

Висновки. Щоб змінювати тривалість інтервалу між спалахами мерехтливих піротехнічних виробів в певних межах достатньо змінювати величину їх діаметру.

Практичне застосування описаної методики дослідження для створення сірковмісних мерехтливих піротехнічних виробів з заданою тривалістю інтервалу між спалахами є таким. Необхідно отримати експериментальні значення цього інтервалу для зразків одного складу, але 2–3 різних діаметрів. Шляхом суміщення результатів розрахунків з цими даними знайти коефіцієнти рівнянь (2), (3) і (7), а потім з цими коефіцієнтами розрахувати величини діаметра виробів, що забезпечують іншу, бажану, тривалість інтервалу між спалахами.

Перспективи подальших досліджень. Уточнення описаної методики шляхом дослідження мерехтливих піротехнічних виробів іншого складу та виготовлених за іншою методикою. Уточнення окремих результатів з застосування незалежних методів. Дослідження горіння зразків при обдуванні повітрям, що відповідає реальним умовам спрацювання феєрверкових виробів.

Список використаної літератури

1. Шидловский А. А. Основы пиротехники. М: Машиностроение, 1964. 300 с.
2. Пиротехнический состав белого огня: А.с. 241269 СССР, МПК С 06D. № 1206743/40-23; заявл. 28.12.1967; опубл. 01.04.1969, Бюл. №13.
3. Пиротехнический состав белого огня с периодическими вспышками пламени: А.с. 390053 СССР, МПК С 06D 1/00. № 1630472/40-23; заявл. 26.11.1971 ; опубл. 11.07.1973, Бюл. №30.
4. Пиротехнический состав пульсирующего горения цветного огня: Пат. 2448936 Российская Федерация, МПК С06D 5/00, С06В 31/02, С06В 33/04; заявл. 06.12.10; опубл. 27.04.12, Бюл. № 12.
5. Пиротехнический состав белого огня с периодическими вспышками пламени: Пат. 2331619 Российская Федерация, МПК С06В 33/04, С06В 31/24; заявл. 23.04.07; опубл. 20.08.08, Бюл. № 23.
6. Спосіб виготовлення піротехнічного заряду пульсуючого горіння: Пат. 116901 Україна МПК8 F 24 В 4/30, С 06 В 31/02, С 06 В 33/04. № u201510356, завл. 23.10.2015; опубл. 25.05.2018, Бюл. №10.
7. Васильев Б. Т. Технология серной кислоты. М.: Химия, 1985. 384 с.
8. Справочник химика. Том 5 / Под ред. Б.П.Никольского. М.: Химия, 1968.

Надійшла до редакції 07.02.2020

Podzhars'kyj M. A., Yarly'kova V. O.

RESEARCH OF COMBUSTION OF FLICKERING PYROTECHNICAL PRODUCTS

The process of combustion of flickering pyrotechnic products containing metallic and non-metallic fuel was investigated. A research method based on the comparison of experimental and calculated data is proposed, which allows the creation of flickering pyrotechnic products with a given duration of the interval between flashes.

Flickering pyrotechnic products, the burning of which is accompanied by a series of bright flashes, are used in the technique of fireworks to create original light paintings.

According to the known works, the range of characteristics of such products is quite wide. In particular, the duration of the interval between flashes may range from hundredths of a second to several seconds. However, in literature there are no details of the reasons pulsating nature of combustion and quantitative characteristics of the processes that occur at the same time. Due to the lack of a theoretical base, pyrotechnic product developers have to go empirically, relying only on experimental experience. An unresolved scientific problem is the lack of a theoretical approach to the development of flickering pyrotechnic articles with a given duration of the interval between flashes.

The purpose of the article is to obtain data on the quantitative characteristics of the processes occurring during the burning of flickering pyrotechnic articles, and to develop a methodology that will allow to create products whose combustion parameters - primarily the duration of the interval between flashes - would be predictable in advance.

The pulsating character of the combustion is a consequence of the parallel course of processes having different time scales. There are at least two types of such processes: fast exothermic combustion reactions and slow heat loss to the environment. The speed of the latter, among other things, depends on the size of the heat transfer surface, which is determined by the diameter of the product, if it has the shape of a body of rotation. By varying the diameter obviously can affect the rate of heat transfer, and with it the nature of combustion. From this assumption follows the task of this study - to investigate the burning of flickering products of cylindrical shape, which differ only in diameter.

The results were obtained by comparing experimental data on the duration of the interval between flashes with the data obtained in the calculated way.

The temporal characteristics of the combustion of the samples were determined using a storage oscilloscope, to which a photocell was connected. The interval between flashes was determined by the screen scale as the distance between the peaks of the waveform.

According to our observations, the following occurs in the process of sample burning. During ignition, non-metallic fuel - sulfur, is first lit. It lights up easily but burns slowly, warming the composition of the site to the ignition temperature of the metal fuel. The latter lights up harder but burns quickly with a flash.

The sharp flash of metallic fuel is accompanied by spreading hot combustion products, because they are unable to ignite the next batch of metal. However, the sulfur continues to burn, so the cycle repeats. The duration of the interval between flashes is determined by the heating time of the sample portion of the burning sulfur to the ignition temperature of the metallic fuel. The study confirmed the assumption that to change the duration of the interval between flashes of flashing pyrotechnic products within certain limits, it is enough to change their diameter.

Keywords: *flickering pyrotechnic product, burning, fireworks, heat balance.*

References:

1. Shidlovsky A. A. (1964), «Fundamentals of pyrotechnics», M: Mechanical Engineering, 300 p.
2. Pyrotechnic composition of the white light: A.S. 241269 USSR, IPC S 06D. No. 1206743 / 40-23; declared 12/28/1967; publ. 04/01/1969, Bull. No. 13.
3. Pyrotechnic composition of a white fire with periodic flashes of flame: A.S. 390053 USSR, IPC C 06D 1/00. No. 1630472 / 40-23; declared 11/26/1971; publ. 07/11/1973, Bull. No. 30.
4. The pyrotechnic composition of the pulsating burning of colored fire: Pat. 2448936 Russian Federation, IPC C06D 5/00, C06B 31/02, C06B 33/04; declared 12/06/10; publ. 04/27/12, Bull. Number 12.
5. Pyrotechnic composition of white fire with periodic flashes of fire: Pat. 2331619 Russian Federation, IPC C06B 33/04, C06B 31/24; declared 04/23/07; publ. 08.20.08, Bull. Number 23.
6. The method of visualization of the technical charge of a pulsating burning: Pat. 116901 Ukraine IPC 8 F 24 B 4/30, C 06 B 31/02, C 06 B 33/04. No. u201510356, head 10/23/2015; publ. 05/25/2018, Bull. No. 10.
7. Vasiliev B. T. (1985), Technology of sulfuric acid, M.: Chemistry, 384 p.
8. Handbook of a chemist (1968), Volume 5 / Ed. B.P. Nikolsky, M. : Chemistry.