

Д.Г. Трезубов, к.т.н., доцент, НУЦЗУ,  
О.В. Тарахно, к.т.н., доцент, нач. каф., НУЦЗУ,  
Д.М. Рогачук, курсант, НУЦЗУ

## ШЛЯХИ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ПАРАМЕТРІВ ЗАПАЛЮВАННЯ ВІД ТЕМПЕРАТУРИ

(представлено д.н. Мізерські А.)

Розглянуто вплив температури навколишнього середовища на мінімальну енергію запалювання горючої речовини ( $E_{\min}$ ) та ширину області вибухонебезпечних концентрацій. За результатами обробки експериментальних та довідкових даних отримані відповідні математичні залежності. Показано збільшення  $E_{\min}$  та звуження області вибухонебезпечних концентрацій зі зниженням температури.

**Ключові слова:** мінімальна енергія запалювання, температура самоспалахування, концентраційні межі поширення полум'я.

**Постановка проблеми.** Проблема забезпечення пожежної безпеки виробництва й житлового сектору, аналіз можливих причин пожежі значною мірою пов'язані з визначенням мінімальних енергій запалювання  $E_{\min}$  речовин, що обертаються [1]. Але, відомо, що цей показник залежить від зовнішніх умов; в першу чергу, він пов'язаний з температурою середовища. Так, за збільшених температур у початковій горючій суміші значення  $E_{\min}$  логічно зменшується, що відповідає збільшенню ступеня пожежної небезпеки. Таке становище формує наукове завдання з пошуку шляхів визначення залежності параметрів запалювання речовин від температури.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Переважна більшість даних стосовно значень  $E_{\min}$  наведена у довідниках [2] і встановлена для стандартних умов за методикою [1]. Зниження  $E_{\min}$  за збільшених температур навколишнього середовища підтверджують довідкові дані [2], однак вони відомі для незначної кількості речовин. Оскільки за температур більших за стандартну  $E_{\min}$  зменшується, відповідно збільшується й пожежна небезпека. Тобто довідкові дані не завжди відображають реальну пожежну небезпеку горючої речовини за фактичних температурних умов та наявності даного джерела запалювання.

Експериментально  $E_{\min}$  визначають як умову, за якої існує 1% ймовірності виникнення горіння у разі дії на стехіометричну горючу суміш електричного розряду певної потужності. Ця методика передбачає, також, визначення найбільш небезпечного електророзрядного зазору. Для визначення фактичної пожежної небезпеки джерела запалювання порівнюють його енергію  $E_{\text{дз}}$  на момент контакту з горючою речовиною зі значенням  $E_{\min}$ , наприклад при розльоті іскор [10].

Методики дослідного визначення  $E_{\min}$  та концентраційних меж по-

ширення полум'я (КМПП) викладені А.М. Баратовим та В.Т. Монаховим [3, 4]. Але в цих роботах не показана залежність КМПП від значення  $E_{дз}$ . Енергія насичення  $E_{насич}$  процесу вимушеного запалювання взагалі не враховується як важливий параметр, хоча теж характеризує ступінь небезпеки як речовини, так і джерела запалювання. Не показано додаткового звуження КМПП за температур менших за стандартні, якщо енергія джерела запалювання менша енергії насичення.

Нами проведені попередні дослідження у даних напрямках. У роботі [5] встановлено, що інтенсивність звуження КМПП  $\Delta\Phi$  (відносно довідкових даних) для масиву речовин залежить від ступеню «ненасиченості» джерела запалювання ( $0 < \Delta\Phi < 100$  % для  $E_{дз} < E_{насич}$ ):

$$\begin{aligned} \text{якщо } E_{дз} = 0,7 \text{ мДж: } \Delta\Phi &= 61,72\ln(E_{мин}) + 115; (R = 0,95), \\ \text{якщо } E_{дз} = 1,0 \text{ мДж: } \Delta\Phi &= 56,35\ln(E_{мин}) + 88,6; (R = 0,98); \end{aligned} \quad (1)$$

де  $\Delta\Phi = \frac{\Delta\Phi_{д} - \Delta\Phi_{ф}}{\Delta\Phi_{д}} \cdot 100$  – відношення різниці довідкових та дослідних діапазонів вибухонебезпеки  $\Delta\Phi$  до  $\Delta\Phi$  за довідником, %;  $\Delta\Phi$  – ширина області вибухонебезпечних концентрацій, %.

Визначена залежність [6] для зміни  $E_{мин}$  газоподібної горючої речовини за температур до температури самоспалахування  $T_{cc}$

$$E_{мин} = E_{мин}^{\circ} \left( 1 - \frac{T_{ф} - 298}{T_{cc} - 273} \right), \text{ мДж}, \quad (2)$$

де  $E_{мин}$ ,  $E_{мин}^{\circ}$  – мінімальні енергії запалювання горючої речовини за даних та стандартних температурних умов, мДж;  $T_{ф}$  – фактична температура навколишнього середовища для якої визначається мінімальна енергія запалювання, К.

З фізичної точки зору процес запалювання пов'язаний з теплоємністю середовища, тому на підставі залежності об'ємної теплоємності вологого повітря від температури встановлена формула [7]

$$E_{мин} = \frac{\pi}{6} d_{кр}^3 \cdot 1,45 \cdot 10^6 (T_{cc}^{0,12} - T_{ф}^{0,12}), \text{ Дж}. \quad (3)$$

Але цей вираз передбачає знання  $d_{кр}$  – величини критичного зазору.

**Постановка завдання та його вирішення.** Зважаючи на викладене вище, з метою встановлення впливу температури середовища на можливість виникнення горіння в результаті дії джерела запалювання, поставила задача провести експериментально-розрахункове дослідження по запалюванню горючих пароповітряних сумішей іскровим розрядом за різних температур.

Експеримент був проведений за методикою: у горизонтальній вибуховій трубі розташовувалася розрахункова кількість досліджуваної рідини для утворення стехіометричної концентрації ( $\phi_{\text{СТМ}}$ ) і створення в реакційному об'ємі найбільш вибухонебезпечних умов. Повнота випаровування контролювалася візуально, інтенсифікація випаровування та усереднення концентрацій проводились за допомогою магнітної мішалки. Після кожного досліду продували трубу повітрям для видалення продуктів горіння й утворення чистого повітряного середовища. Розглядалась дія електричного розряду енергоємністю 0,7 мДж та 1 мДж на горючу суміш за різних концентрацій горючої речовини, температур 288 і 298 К та нормального атмосферного тиску.

Порівнювали характер зміни  $E_{\text{min}}$  для різних речовин відносно мінімальної енергії запалювання за стандартних умов. Дію джерела запалювання при цьому розглядали як компенсацію температури середовища, яка є меншою за температуру самоспалахування ( $T_{\text{cc}}$ ). Можна прийняти, що за  $T_{\text{cc}}$  для всіх горючих речовин  $E_{\text{min}}$  наближається до 0 мДж. Якщо вважати температурну компенсацію єдиним фактором впливу температури на зміну  $E_{\text{min}}$ , то залежність повинна мати характер лінійної, що відповідає характеру отриманих раніше результатів [6] та за інструкцією [1]. В той же час, між параметрами вимушеного запалювання та самоспалахування ( $E_{\text{min}}$  та  $T_{\text{cc}}$ ) немає прямого зв'язку. Так, для перших семи членів гомологічного ряду алканів (для інших алканів дані не наведені)  $E_{\text{min}}$  має значення у близьких межах 0,22 – 0,28 мДж з мінімумом для пентану [8], див. табл. 1.

**Табл. 1. Параметри небезпеки горючих речовин та процесу запалювання**

Речовина ( $T_{\text{сп}}/T_{\text{кип}}$ , К)	$E_{\text{дз}}$ , мДж	$\phi_{\text{н}} - \phi_{\text{в}}$ , (ширина КМПП), %		Звуження КМПП, %	$T_{\text{СТМ}}$ , К	$E_{\text{min}}$ , мДж [2]
		за довідником [2]	за дослідом			
Ацетон (255/330)	1,0	2,7 – 13,0 (10,3)	3,3 – 9,8 (6,5)	37,0	261,6	0,41
	0,7		4,8 – 9,4 (4,6)	55,3		
Гексан (250/342)	1,0	1,24 – 7,5 (6,26)	1,3 – 6,4 (5,1)	18,6	255,6	0,25
	0,7		1,4 – 5,4 (4,0)	36,1		
Циклогексан (256/354)	1,0	1,3 – 7,8 (6,5)	1,3 – 7,7 (6,4)	0,2	257,8	0,22
	0,7		1,3 – 5,5 (4,2)	35,4		
Пентан (229/309)	1,0	1,47 – 7,7 (6,23)	1,3 – 7,7 (6,4)	-2,7	232,3	0,22
	0,7		1,7 – 7,0 (5,3)	15,0		
Ізопропіловий спирт (287/355)	1,0	2,23 – 12,7 (10,47)	2,3 – 6,0 (3,7)	64,6	293,4	0,65
	0,7		3,0 – 5,2 (2,2)	88,4		

Таким чином, характер зміни  $E_{\text{min}}$  в гомологічному ряду алканів суттєво відрізняється від відповідного характеру зміни  $T_{\text{cc}}$  (максимум для метану). Це можна пояснити тим, що у гомологічному ряду зі зменшенням  $T_{\text{cc}}$  водночас збільшується теплоємність речовин.

Досліджували можливість запалювання ацетону, пентану, гексану, циклогексану, ізопропілового спирту; отримані результати та довідкові дані зведені у табл. 1.

Для встановлення  $E_{\min}$  за дослідом необхідно забезпечити випаровування досліджуваної рідини у стехіометричній концентрації  $\varphi_{\text{стм}}$ . Усі досліджені речовини за температурою спалаху  $T_{\text{сп}}$  відносяться до класу постійно небезпечних легкозаймистих рідин, причому  $T_{\text{сп}}$  менша за температуру досліду, див. табл.1. Тобто, утворення вибухонебезпечної пари можливо. Але для деяких речовин температура досліду близька до  $T_{\text{сп}}$ . Температуру, за якої над поверхнею рідини у закритому просторі утворюється  $\varphi_{\text{стм}}$  насиченої пари, назовемо «стехіометричною»  $T_{\text{стм}}$ . Така температура є найбільш небезпечною для зберігання рідин у закритому просторі; визначити її можна за формулою Антуана [8]. Порівнюючи отримані  $T_{\text{стм}}$ , див. табл. 1, з температурою проведення досліду, можна побачити, що з досліджених речовин лише для ізопропілового спирту будуть ускладнення у випаровуванні до  $\varphi_{\text{стм}}$ . Тобто він за температури 288 К може утворити  $\varphi_{\text{стм}}$  пари лише за наявності повітрообміну за допомогою магнітної мішалки (вітрове навантаження може зменшити температуру спалаху не більше ніж на 35 °С [8]). Також, можна побачити, що  $T_{\text{сп}}$  та  $T_{\text{стм}}$  відрізняються незначно.

Для встановлення відсотка зміни КМПП за дослідом необхідно забезпечити випаровування досліджуваної рідини у серії дослідів у послідовних концентраціях в діапазоні від нижньої до верхньої КМПП. Якщо температура рідини більша за ту, за якої утворюється потрібна концентрація пари, то достатньо ввести у робочий об'єм розраховану кількість рідини, і повне випаровування забезпечить необхідну концентрацію. Якщо температура менша за таку, то концентрація насиченої пари буде не більше за ту, яка відповідає даній температурі.

Якщо за температури 298 К запалювання відбулось для усіх випробовуваних речовин, то за температури 288 К – лише для пентану. Запалювання пентану за джерела запалювання потужністю 0,7 мДж та температури 288 К відбулося лише за  $\varphi_{\text{стм}}$  пари. Тому можна прийняти, що в умовах досліду (за температури 288 К)  $E_{\min}$  пентану становить 0,7 мДж. Тобто звуження КМПП за знижених температур відбувається більш інтенсивно [6] ніж за стандартною залежністю [8].

Існує два параметри, які характеризують ширину області КМПП: F-фактор  $F = 1 - (\varphi_{\text{н}}/\varphi_{\text{в}})^{0,5}$  [9] та  $\Delta\varphi = (\varphi_{\text{в}} - \varphi_{\text{н}})$ . Нами використано фактор зміни КМПП відносно довідкових даних, який розрахують за формулами (1). Оскільки зміна  $\Delta\Phi$  за різних  $E_{\text{дз}}$  має близький характер, можна запропонувати загальну формулу для умов  $\Delta\Phi > 0$  та  $E_{\text{дз}} < E_{\text{насич}}$

$$\Delta\Phi = \frac{89}{E_{\text{дз}}^{0,55}} + 56 \ln E_{\min}, \% \quad (4)$$

Дана формула прогнозує звуження КМПП з  $R = 0,98$ . З (4) можна отримати орієнтовне значення для енергії насичення (тобто  $\Delta\Phi = 0$ )

$$E_{\text{насих}} = \left( -\frac{89}{56 \ln E_{\text{min}}} \right)^{1,818}, \text{ мДж}; \quad (5)$$

для досліджених речовин: ацетон – 2,86 мДж, гексан – 1,28 мДж, циклогексан та пентан – 1,09 мДж, ізопропіловий спирт – 10,7 мДж.

Також, за результатами обробки експериментальних та довідкових результатів отримана математична залежність, яка характеризує зміну  $E_{\text{min}}$  газоподібної горючої речовини за різних температур

$$E_{\text{min}} = 15E_{\text{min}}^{\circ} \cdot e^{-0,038 \cdot (T_{\text{ф}} - 232)}, \text{ мДж}, \quad (6)$$

де  $E_{\text{min}}^{\circ}$  –  $E_{\text{min}}$  горючої речовини за стандартних умов, мДж; 232 К – розрахункова температура, за якої над поверхнею пентану утворюється стехіометрична концентрація насиченої пари;  $T_{\text{ф}}$  – фактична температура навколишнього середовища, К.

Формула (6) прогнозує зміну  $E_{\text{min}}$  з коефіцієнтом кореляції  $R = 0,99$ . Але, слід зазначити, що характер отриманої залежності суттєво відрізняється від формули (2). За температур менших за стандартну спостерігається більш інтенсивне зростання  $E_{\text{min}}$ , що можна пояснити зростанням дифузійних ускладнень у готовій горючій суміші.

**Висновки.** Отримані математичні залежності дозволяють прогнозувати звуження області вибухонебезпечних концентрацій повітряних сумішей за ненасиченого значення енергії запалювання ( $R = 0,98$ ) та зміну небезпеки вимушеного запалювання повітряних сумішей від температури ( $R = 0,99$ ). Визначено співвідношення між мінімальною енергією запалювання та енергією насичення для даної горючої речовини.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Инструкция по определению минимальной энергии зажигания / Под ред. Монахова В.Т. и др. – М.: ВНИИПО. – 1977. – 54 с.
2. Корольченко А.Я. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения, в 2 частях / А.Я. Корольченко, Д.А. Корольченко. – М.: Пожнаука, 2004. – 1448 с.
3. Баратов А.Н. Пожарная безопасность. Справочник / А.Н. Баратов, Е.Н. Иванов, А.Я. Корольченко и др. – М.: Химия, 1987. – 272 с.
4. Монахов В.Т. Методы исследования пожарной опасности веществ / В.Т. Монахов. – М.: Химия, 1979. – 424 с.
5. Трегубов Д.Г. Дослідження впливу енергії джерела запалення на концентраційні межі поширення полум'я / Д.Г. Трегубов, Я.В. Щетинін // Проблемы пожарной безопасности. – Х.: АГЗУ, 2006. – Вып. 19. – С. 161-165. Режим доступа: <http://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfFireSafety/vol19/tregubov%2006-19.pdf>.

6. Трегубов Д.Г. Дослідження залежності мінімальної енергії запалювання від температури / Д.Г.Трегубов // Проблемы пожарной безопасности. – Х.: УГЗУ, 2007. – Вып.21. – С. 275-278. Режим доступа: <http://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfFireSafety/vol21/Tregubov-21-2007-Emin.pdf>.

7. Тарахно Е.В. Розрахункове визначення мінімальної енергії запалювання при проведенні судових пожежно-технічних експертиз / Е.В. Тарахно, Д.Г. Трегубов, В.М. Сирих / Проблемы пожарной безопасности. – Х.: УГЗУ, 2007. – Вып. 22. – С. 190-193. Режим доступа: <http://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfFireSafety/vol22/Tregubov-22-2007-Emin.pdf>.

8. Тарахно О.В. Теорія розвитку та припинення горіння. Практикум. У 2-х частинах / О.В. Тарахно, Д.Г. Трегубов, К.В. Жернокльов та ін. – Х.: НУЦЗУ, 2010. – 822 с. Режим доступа: <http://nuczu.edu.ua/sciencearchive/Articles/tarahno/tarahno2010praktikum1.pdf>.

9. Kondo S. Experimental exploration of discrepancies in  $F$ -number correlation of flammability limits / S. Kondo, A. Takahashi, K. Tokuhashi // J. Hazard. Mater. – 2003. – Vol. 100. – № 1-3. – P. 27-36.

10. Шаршанов А.Я. Математическое моделирование разлета искр горючих материалов / А.Я. Шаршанов, А.А. Посник // Проблемы пожарной безопасности. – Х.: УГЗУ, 2013. – Вып.34. – С. 275-278. Режим доступа: <http://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfFireSafety/vol34/sharshanov.pdf>.

*Отримано редколегією 13.03.2017*

Д.Г. Трегубов, Е.В. Тарахно, Д.М. Рогачук

#### **Пути определения зависимости параметров зажигания от температуры**

Рассмотрено влияние температуры окружающей среды на минимальную энергию зажигания горючего вещества ( $E_{\min}$ ) и ширину области взрывоопасных концентраций. Показано увеличение  $E_{\min}$  и сужение области взрывоопасных концентраций с понижением температуры. По результатам обработки опытных и справочных данных получены соответствующие математические зависимости.

**Ключевые слова:** минимальная энергия зажигания, температура самовоспламенения, концентрационные пределы распространения пламени.

D. Tregubov, O. Tarahno, D. Rogachuk

#### **Ways to determine the dependence of the ignition parameters on temperature**

The influence of the environmental temperature on the minimum ignition energy of combustible material ( $E_{\min}$ ) and the width of the explosive concentrations field is considered. The increase of  $E_{\min}$  and narrowing the explosive concentrations field as the temperature decreases is shown. Mathematical relationships is obtained on the results of data processing of the experimental and reference.

**Keywords:** minimum ignition energy, self-ignition temperature, flammability limits.