

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 $T_{сc}$

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

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]

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

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_{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_{cc}). Можна прийняти, що за T_{cc} для всіх горючих речовин E_{min} наближається до 0 мДж. Якщо вважати температурну компенсацію єдиним фактором впливу температури на зміну E_{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_{min} та T_{cc}) немає прямого зв'язку. Так, для перших семи членів гомологічного ряду алканів (для інших алканів дані не наведені) E_{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_{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_{min} в гомологічному ряду алканів суттєво відрізняється від відповідного характеру зміни T_{cc} (максимум для метану). Це можна пояснити тим, що у гомологічному ряду зі зменшенням T_{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_{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_{min}° – E_{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_{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_{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.