

Д.Г. Трезубов, к.т.н., доцент, НУЦЗУ

## ЗАЛЕЖНІСТЬ КОНЦЕНТРАЦІЙНИХ МЕЖ ПОШИРЕННЯ ПОЛУМ'Я ВІД ЕНЕРГІЇ ДЖЕРЕЛА ЗАПАЛЮВАННЯ ТА ТЕМПЕРАТУРИ СЕРЕДОВИЩА

(представлено д.т.н. Кривцовою В.І.)

Розглянуто вплив температури навколишнього середовища та енергії запалювання горючої речовини на ширину області вибухонебезпечних концентрацій. За результатами обробки експериментальних та довідкових даних отримано відповідні математичні залежності. Введено термін «відносна енергія джерела запалювання».

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

**Постановка проблеми.** Основною причиною виникнення пожеж за статистикою є порушення правил експлуатації електрообладнання, теплогенеруючих установок та необережне поводження з вогнем, що за перші місяці 2017 р. склало близько 90 % з усіх причин виникнення пожеж [1]. Більшість з цих випадків можна кваліфікувати як такі, що виникли внаслідок дії певного джерела запалювання. Запобігання виникненню пожеж внаслідок дії джерел запалювання є однією з найважливіших проблем пожежної безпеки, яка потребує комплексу різнопланових заходів. Якщо взяти до уваги такий напрямок діяльності як «запобігання утворення джерел запалювання», то чи не найважливішим питанням постає достатність енергії джерела запалювання для ініціювання горіння даної концентрації горючої речовини за певних температурних умов. На теперішній час не існує загальної математичної залежності, яка описує такий взаємозв'язок. Означений стан питання формує наукову проблему, пов'язану з аналізом та обробкою дослідних даних процесу запалювання.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Зниження мінімальної енергії запалювання  $E_{\min}$  за збільшених температур досліджено та наведено у довідниках для незначної кількості речовин [2]. Визначено таку залежність в діапазоні до температури самоспалахування  $T_{cc}$  [3]

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

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

Водночас існує залежність і для зміни концентраційних меж поширення полум'я (КМП) за зміни температурних умов [4]:

$$\begin{aligned}\varphi_H(t) &= (-0,8 \cdot 10^{-3}(t - 25) + 1)\varphi_H, \%, \\ \varphi_B(t) &= (1,25 \cdot 10^{-3}(t - 25) + 1)\varphi_B, \%,\end{aligned}\quad (2)$$

де  $t$  – температура середовища, °C;  $\varphi_H$  та  $\varphi_B$  – КМПП речовини у повітрі за стандартних умов, %.

Порівняння небезпеки горючих повітряних сумішей за значенням КМПП проводять за критеріями: ширина вибухонебезпечної області між нижньою та верхньою КМПП  $\Delta\varphi = (\varphi_B - \varphi_H)$  та співвідношення між ними при розрахунку F-фактору  $F = 1 - (\varphi_H/\varphi_B)^{0,5}$  [5]. Для подальших досліджень нами обрано критерій  $\Delta\varphi$  у порівнянні з довідковими даними у вигляді відсотка звуження області вибухонебезпеки  $\Delta\Phi$  відносно стандартних значень КМПП

$$\Delta\Phi = \frac{\Delta\varphi_c - \Delta\varphi_\phi}{\Delta\varphi_c} \cdot 100, \%, \quad (3)$$

де  $\Delta\varphi_c$  та  $\Delta\varphi_\phi$  – ширина вибухонебезпечної області за значеннями КМПП речовини у повітрі за стандартних умов та за фактичних умов, %.

Відсоток звуження КМПП  $\Delta\Phi$  за різних енергій джерела запалювання  $E_{dz}$  можна розрахувати за апроксимаційною формулою [6] (для  $\Delta\Phi > 0$  та ненасиченого значення енергії джерела запалювання)

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

де  $E_{dz}$  – мінімальна енергія запалювання горючої речовини, мДж;  $E_{\min}$  – енергія джерела запалювання, мДж.

Слід зауважити, що дана формула не дає залежності звуження КМПП від температури середовища.

**Постановка завдання та його вирішення.** З викладеного вище впливає завдання з встановлення впливу температури середовища на можливість виникнення горіння внаслідок дії джерела запалювання різної потужності на повітряні суміші за різних концентрацій горючої речовини.

Відомо, що джерелом запалювання є розжарене тіло або електричний розряд, які мають достатні для запалювання і енергію, і температуру. Тобто, коли ми говоримо про можливість вимушеного запалювання певних концентрацій, потрібно враховувати як значення енергії джерела запалювання, так і значення температури середовища (якщо розглядається електричний розряд, який вже має достатню температуру для запалювання).

За результатами обробки дослідних даних [7] для нижньої та верхньої КМПП була отримана залежність від температури середовища (в діапазоні характерних температур навколишнього середовища):

$$\begin{aligned}\varphi_H(t) &= (-0,9 \cdot 10^{-3}t + 1,025)\varphi_H, \%, \\ \varphi_B(t) &= (1,2 \cdot 10^{-3}t + 0,97)\varphi_B, \%. \end{aligned}\quad (5)$$

де  $t$  – температура середовища, °С.

Залежність (5) виявилася близькою до відомої (2). Якщо підставити вказані вирази у формулу (3) та провести апроксимаційні спрощення, можна отримати рішення

$$\Delta\Phi(t) = \frac{(\varphi_{\text{в}} - \varphi_{\text{н}}) - (\varphi_{\text{в}}(t) - \varphi_{\text{н}}(t))}{(\varphi_{\text{в}} - \varphi_{\text{н}})} \cdot 100 = \frac{(0,03 - 1,1 \cdot 10^{-3} t)(\varphi_{\text{н}} + \varphi_{\text{в}})}{(\varphi_{\text{в}} - \varphi_{\text{н}})} \cdot 100, \% \quad (6)$$

Від’ємні значення за даним розрахунком означають розширення КМПП. Формула (6) прогнозує  $\Delta\Phi$  з коефіцієнтом кореляції 0,997.

За ненасиченого значення енергії джерела запалювання область вибухонебезпечних концентрацій звужується. На нижній та верхній КМПП ненасичену енергію джерела запалювання можна вважати за мінімальну енергію запалювання за даних умов, оскільки  $E_{\text{min}}$  є результатом випробування суміші у якій нижня та верхня КМПП дорівнюють одна одній. Тоді за ненасиченої енергії на нижній та верхній КМПП існує ймовірність 1 % для запалювання даної суміші, але за тих самих умов КМПП повинні бути дещо звужені, порівняно з насиченим значенням енергії джерела запалювання. На нижній межі повинна бути менша інтенсивність зміни ніж на верхній, оскільки суміш бідна і для більшості речовин дифузійні ускладнення менше проявляються.

Відсоток зміни КМПП за певного співвідношення між енергією насичення ( $E_{\text{насич}}$ ) та енергією джерела запалювання (відносна енергія джерела запалювання  $K_E$ ) за зміни температури горючого середовища виявився стабільним для різних речовин, рис. 1.

КМПП мають стандартні значення починаючи з насиченого значення енергії джерела запалювання. Відповідно, буде деяка пропорційність між часткою, на яку енергія джерела запалювання менша за енергію насичення, та інтенсивністю звуження області вибухонебезпечних концентрацій.

Тоді групи формул (2) та (5) можна перетворити у наступну форму, яка враховує зміну значень нижньої та верхньої КМПП горючих повітряних сумішей при зменшенні температури від стандартної за ненасиченого значення енергії джерела запалювання:

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{н}}(E_{\text{дз}}, t) &= (-0,001(t - 30) \left( \frac{E_{\text{насич}}}{E_{\text{дз}}} \right)^2 + 0,995) \varphi_{\text{н}}, \% \\ \varphi_{\text{в}}(E_{\text{дз}}, t) &= (0,01(t - 30) \left( \frac{E_{\text{насич}}}{E_{\text{дз}}} \right)^{0,5} + 1,005) \varphi_{\text{в}}, \% \end{aligned} \quad (7)$$

де  $t$  – температура середовища, °С;  $K_E = \frac{E_{\text{насич}}}{E_{\text{дз}}}$  – відносна енергія джерела запалювання (у скільки разів енергія джерела запалювання менша за енергію насичення).

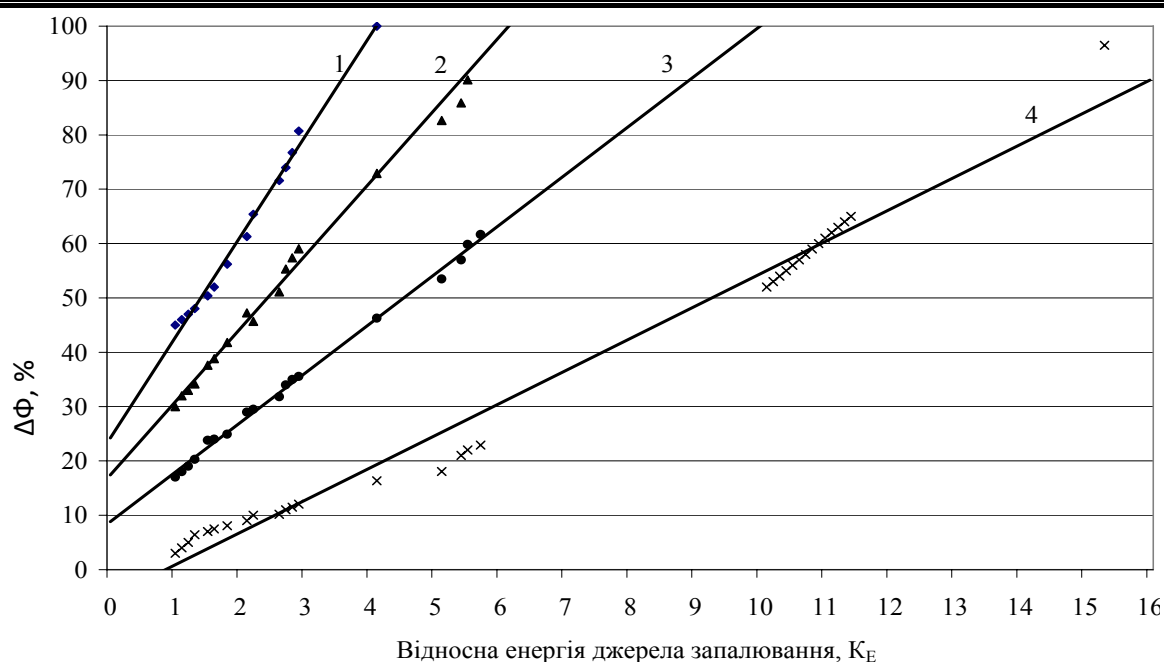


Рис. 1. Звуження області вибухонебезпечних концентрацій ( $\Delta\Phi$ ) за різної відносної енергії джерела запалювання та за зміни температур: 1.  $10^\circ\text{C}$ ; 2.  $0^\circ\text{C}$ ; 3.  $10^\circ\text{C}$ ; 4.  $20^\circ\text{C}$

Умова  $\varphi_n(t) = \varphi_v(t)$  для виразів (7) формально показує температуру середовища, за якої дія даного ненасиченого джерела запалювання (за умови  $E_{\text{дз}} > E_{\text{min}}$ ) не викликає виникнення горіння, тобто досягається звуження області вибухонебезпечних концентрацій на  $\Delta\Phi = 100\%$ .

Отримано загальні апроксимаційні залежності виду  $\Delta\Phi(E_{\text{насич}}/E_{\text{дз}}, t)$ :

$$\Delta\Phi = \left( \frac{3 \cdot 10^4}{(t + 49)^2} - 1 \right) \cdot \frac{E_{\text{насич}}}{E_{\text{дз}}} - 0,01(t + 49)^2 + 40, \%, \quad (8)$$

або

$$\Delta\Phi = -0,0244t^2 - 0,3876 \left( t \frac{E_{\text{насич}}}{E_{\text{дз}}} + 1,438 \right) + 13,692 \frac{E_{\text{насич}}}{E_{\text{дз}}} + 16,6, \%, \quad (9)$$

що можна відобразити поверхнею, рис. 2.

За умови дії джерела запалювання з насиченою або більшою енергією розширення області вибухонебезпечних концентрацій припиняється,  $\Delta\Phi = 0\%$ . Таке розширення може мати місце за зміни інших умов, наприклад, за підвищених температур від стандартної.

Якщо  $\Delta\Phi > 100\%$ , це означає, що за даних навколишніх умов та енергії джерела запалювання газо- або пароповітряна суміш є негорючою.

За умови  $\Delta\Phi = 100\%$  область вибухонебезпеки зникає, тому за даної температури з виразів (8, 9) можна отримати значення енергії джерела запалювання як мінімальної енергії запалювання речовини.

Енергія насичення для формул (7–9) у довідниках, як правило, не наведена. Її можна визначити розрахунковим чином. Енергія насичення пов'язана з мінімальною енергією запалювання виразом [6] (для речовин з  $E_{\text{min}} < 1,0$  мДж)

$$E_{\text{насих}} = \left( -\frac{89}{56 \ln E_{\text{min}}} \right)^{1,818}, \text{ мДж.} \quad (10)$$

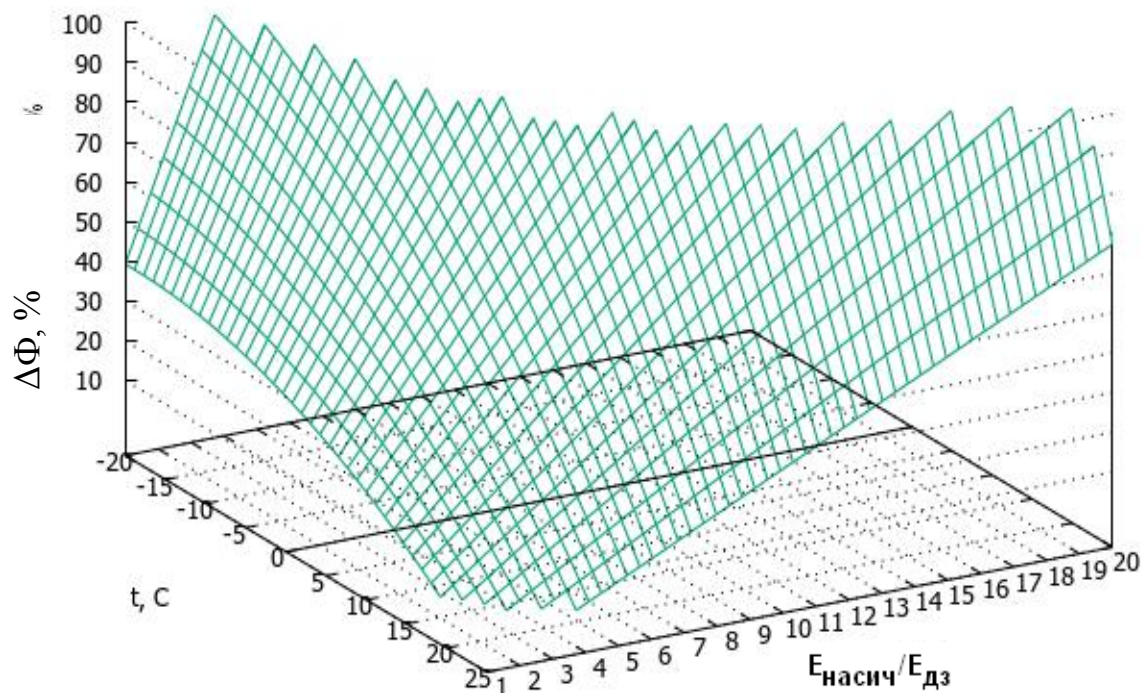


Рис. 2. Поверхня, що характеризує загальну залежність звуження області  $\Delta\Phi$  від температури середовища та відносної енергії джерела запалювання

Внаслідок обмеженості дії залежності (10) можна запропонувати наступну апроксимаційну формулу

$$E_{\text{насих}} = 10,55 E_{\text{min}}^{1,5}, \text{ мДж,} \quad (11)$$

наприклад,  $E_{\text{насих}}$  для деяких речовин за формулою (11): ацетон – 2,77 мДж, гексан – 1,32 мДж, циклогексан та пентан – 1,09 мДж, ізопропіловий спирт – 5,5 мДж.

Розрахунок відсотка звуження області вибухонебезпечних концентрацій для ненасиченого значення енергії джерела запалювання для даних температурних умов для речовин різних гомологічних класів за формулами (8) або (9) та (11), а також за формулами (7) та (6) дає коефіцієнт кореляції з експериментальними даними 0,93. Меншу похибка розрахунку, близько 12 %, дає використання формул (7) та (9).

**Висновки.** Отримано математичні залежності, які дозволяють прогнозувати зміну звуження області вибухонебезпечних концентрацій повітряних сумішей для ненасиченого значення енергії запалювання за зміни температури середовища з використанням енергії насичення даної горючої речовини. Існує відносна енергія джерела запалювання як співвідношення енергій насичення та джерела запалювання, яка показує легкість процесу запалювання.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Аналіз масиву карток обліку пожеж (rog\_stat) за 2 місяці 2017 року. – К.: ВДіСП УкрНДІЦЗ. 2017.- 10 с. Режим доступу: [http://undicz.dsns.gov.ua/files/Статистика/2017/AD\\_02\\_17.pdf](http://undicz.dsns.gov.ua/files/Статистика/2017/AD_02_17.pdf).
2. Корольченко А.Я. Пожаровзвывоопасность веществ и материалов и средства их тушения, в 2 частях / А.Я. Корольченко, Д.А. Корольченко. – М.: Пожнаука, 2004. – 1448 с.
3. Трегубов Д.Г. Дослідження залежності мінімальної енергії запалювання від температури / Д.Г. Трегубов // Проблемы пожарной безопасности. – Х.: УЦЗУ, 2007. – Вип. 21. – С. 275-278. Режим доступу: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/2833>.
4. 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 доступу: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/3233>.
5. 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.
6. Трегубов Д.Г. Шляхи визначення залежності параметрів запалювання від температури / Д.Г. Трегубов, О.В. Тарахно, Д.М. Рогачук // Проблемы пожарной безопасности. – Х.: НУЦЗУ, 2017. – Вип. 41. – С. 275-278. Режим доступу: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/3942>.
7. 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 доступу: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/2828>.

*Отримано редколлегиею 12.10.2017*

Д.Г. Трегубов

**Зависимость концентрационных пределов распространения пламени от энергии источника зажигания и температуры**

Рассмотрено влияние температуры окружающей среды и энергии насыщения процесса зажигания горючего вещества на ширину области взрывоопасных концентраций. По результатам обработки экспериментальных и справочных данных получены соответствующие математические зависимости. Введен термин «относительная энергия источника зажигания».

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

D. Tregubov

**Dependence of the flammability limits on the ignition source energy and temperature**

The influence of the ambient temperature and saturation energy of the ignition process of the combustible substance on the width of the region of explosive concentrations is considered. According to the results of processing of experimental and reference data, the appropriate mathematical functions were obtained. The term "relative energy of the ignition source" is introduced.

**Keywords:** minimum ignition energy, temperature, flammability limits, relative energy of the ignition source.