

**ВИЗНАЧЕННЯ ВИБУХОНЕБЕЗПЕКИ ВИРОБНИЧИХ ПРИМІЩЕНЬ ЗА  
НАДХОДЖЕННЯ ДО НИХ ГОРЮЧИХ ГАЗІВ АБО ПАРІВ  
ГОРЮЧИХ РІДИН**

*Розрахунками показана методична невідповідність між показниками нижньої концентраційної межі займання і розрахунковим надлишковим тиском вибуху у випадку аналізу вибухопожежної небезпеки виробничих процесів, приміщень.*

*Ключові слова: надлишковий тиск вибуху, нижня концентраційна межа займання.*

*Виклад основного матеріалу.* Нижня концентраційна межа займання  $C_{нмз}$  (нижня концентраційна межа поширення полум'я) це мінімальний вміст пального у суміші "горюча речовина - окиснювальне середовище", за якого можливе поширення полум'я по суміші на любую віддаль від джерела запалювання [1]. Визначають цей показник пожежної небезпеки речовин і матеріалів шляхом підпалювання газо-, паро- або пилоповітряної суміші з заданою концентрацією досліджуваної речовини у об'ємі реакційної посудини і встановлюють факт наявності або відсутності поширення полум'я.

Змінюючи склад суміші, знаходять таку концентрацію горючого компонента, за якої полум'я поширюється на весь об'єм реакційної посудини, а при значенні концентрації на 0,1 % (об) менше суміш не займається або полум'я, що виникає, не поширюється до верхньої частини реакційної посудини, тобто не поширюється на весь об'єм реакційної посудини. Перед запалюванням суміш перемішують. Реакційна посудина являє собою циліндр внутрішнім діаметром 105 мм і висотою 425 мм. Об'єм циліндра становить  $3,678 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$  [2].

Для більшості горючих газів і парів горючих рідин значення  $C_{нмз}$  знаходиться у межах від 1 % (об) до 5 % (об). Є речовини для яких значення  $C_{нмз}$  або менші 1 % (об), або більші 5 % (об). Значення показника  $C_{нмз}$  включається у стандарти і технічні умови на горючі гази, горючі рідини, на тверді горючі речовини у пилоподібному стані, використовується при аналізі пожежної небезпеки технологічних процесів і виробництв. Вважається, що якщо концентрація горючої речовини менше  $C_{нмз}$  то умови ведення технологічного процесу повинні бути безпечними.

У [1] констатується, що способом попередження пожежі, вибуху є попередження утворення горючого середовища і умовою пожежовибухобезпеки процесів виробництв, переробки, зберігання і транспортування речовин і матеріалів є виконання нерівності:  $C_{безп} \leq 0,9(C_{нмз} - 0,7 R)$ ;  $C_{безп} \geq 1,1(C_{вмз} + 0,7 R)$ , де:  $R$  – відтворюваність методу визначення показника пожежної небезпеки за довірчої імовірності 95 %;  $C_{безп}$  – безпечна концентрація горючої речовини, % (об), г/м<sup>3</sup>. При визначенні  $C_{нмз}$   $R$  становить 0,3, а при визначенні  $C_{вмз}$   $R$  становить 0,6. Для нижньої концентраційної межі займання  $C_{безп} \leq 0,9(C_{нмз} - 0,21)$ . Ця умова справедлива для випадків коли газоповітряне середовище у апаратах гомогенізоване, перемішане і концентрація горючої речовини по всьому об'єму однакова.

У [3] вибухобезпечними вважаються умови, коли вибухонебезпечна концентрація горючої речовини ( $C_{нмз}$ ) досягається у об'ємі, що не перевищує 5 % від загального об'єму апарату або об'єму приміщення. Тобто загальна концентрація горючої речовини у об'ємі апарату або приміщення повинна становити не більше  $0,05 C_{нмз}$ . Таке безпечне значення

концентрації горючої речовини використовується при підготовці апаратів до ремонтних вогневих робіт. Ця умова справедлива для не гомогенізованих об'ємів в яких концентрація горючої речовини не однакова у різних точках досліджуваного об'єму.

Враховуючи методику визначення  $C_{нмз}$ , можна вважати, що якщо концентрація горючих речовин у апаратах, приміщеннях (далі – приміщеннях) буде менше значення  $C_{нмз}$  на 20 % і більше, то у таких приміщеннях займання газо-, паро- або пилоповітряного середовища не повинно бути. Це і використовується у практичній роботі, коли розробляються протипожежні заходи для конкретного виробництва. Безпечними вважаються виробничі умови, коли значення концентрацій горючих речовин не перевищує  $C_{безп} \leq 0,9(C_{нмз} - 0,21)$  (далі по тексту  $C_{безп}$ ), а газоаналізатори спрацьовують, коли концентрація горючої речовини досягає величини, наприклад, 20 % від значення  $C_{нмз}$ , тобто тоді, коли, як вважається, вибуху у приміщенні не повинно бути. Але ця умова буде виконуватись тільки тоді, коли концентрація горючої речовини буде однакою у всьому об'ємі приміщення. Якщо ж цього не буде то вибухонебезпечне середовище може утворитися у частині об'єму приміщення і тоді небезпеку необхідно визначати за можливим тиском вибуху горючого середовища.

Виробничі і складські приміщення та зовнішні установки категоруються за вибухопожежною і пожежною небезпечністю згідно з [4]. Для того, щоб віднести приміщення до тієї чи іншої категорії враховується агрегатний стан горючої речовини, температура спалаху, надлишковий розрахунковий тиск вибуху газо-, паро- або пилоповітряної горючої суміші.

Надлишковий розрахунковий тиск вибуху  $\Delta P$  для індивідуальних горючих речовин, які складаються з атомів С, Н, О, N, Cl, Br, I, F, згідно з [4], визначається за формулою:

$$\Delta P = (P_{max} - P_o) \cdot \frac{m \cdot Z}{V_{вільн} \cdot \rho_{г,п}} \cdot \frac{100}{C_{ст}} \cdot \frac{1}{K_n}, \quad (1)$$

де  $P_{max}$  - максимальний тиск вибуху стехіометричної газоповітряної або пароповітряної суміші у замкнутому об'ємі, у разі відсутності таких даних, допускається приймати  $P_{max}$  таким, що дорівнює 900 кПа;

$P_o$  - початковий тиск, кПа (допускається приймати таким, що дорівнює 101 кПа);

$m$  - маса ГГ або парів ЛЗР та ГР, що потрапили в результаті розрахункової аварії до приміщення, кг;

$Z$  - коефіцієнт участі ГГ або парів у вибуху. Для горючих газів значення  $Z$  становить 0,5, для водню значення  $Z$  становить 1, для парів горючих рідин нагрітих вище температури спалаху значення  $Z$  становить 0,3;

$V_{вільн}$  - вільний об'єм приміщення, м<sup>3</sup>;

$\rho_{г,п}$  - густина газу або пари при розрахунковій температурі  $t_p$ , кг·м<sup>-3</sup>, що визначається за формулою:

$$\rho_{г,п} = \frac{M}{V_o(1 + 0,00367 \cdot t_p)}, \quad (2)$$

де  $M$  - молярна маса, кг·кмоль<sup>-1</sup>;

$V_o$  – мольний об'єм для нормальних умов, що дорівнює 22,413 м<sup>3</sup>·кмоль<sup>-1</sup>;

$t_p$  - розрахункова температура, °С, приймаємо 20 °С;

$C_{ст}$  - стехіометрична концентрація ГГ або парів ЛЗР та ГР, % (об.), що визначається за формулою:

$$C_{ст} = \frac{100}{1 + 4,84 \cdot \beta}, \quad (3)$$

де  $\beta = n_c + \frac{n_n - n_x}{4} - \frac{n_o}{2}$  - стехіометричний коефіцієнт кисню в реакції згоряння (при розрахунку  $\beta$  атоми азоту не враховуються);

$n_c, n_n, n_o, n_x$  - число атомів С, Н, О та галогенів у молекулі ГГ або парів ГР;

$K_n$  - коефіцієнт, що враховує негерметичність приміщення й неадіабатичність процесу горіння. Приймаємо  $K_n$  рівним 3.

Для встановлення вибухопоженої небезпеки для приміщень, в яких можливе утворення різної концентрації горючої речовини, розрахуємо надлишковий тиск вибуху для деяких речовин, приймаючи значення  $m$  у формулі 1 рівним значенню  $C_{нмз}$ ,  $C$  безп згідно з [1],  $0,2 C_{нмз}$  і  $0,05 C_{нмз}$  згідно з [3] Назви речовин і деякі показники їх пожежної небезпеки наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Назва речовини	Хімічна формула	Молекулярна маса, кг/кмоль	$P_{max}$ , кПа	$C_{нмз}$ , %, (об)
Ацетальдегід	$C_2H_4O$	44,053	648	4,12
Ацетилен	$C_2H_2$	26,038	1009	2,5
Ацетон	$C_3H_6O$	58,08	572	2,7
Аміак	$NH_3$	17,03	588	15,0
Бензин А-93 зимній	$C_{6,911}H_{12,168}$	95,3	900	1,1
Винілхлорид	$C_2H_3Cl$	62,499	820	3,6
Водень	$H_2$	2,016	730	4,12
Метан	$CH_4$	16,04	706	5,28
Метилловий спирт (метанол)	$CH_4O$	32,04	620	6,98
Формальдегід	$CH_2O$	30,03	900	7,0

Значення  $m$  у формулі 1 дано у кг, тому перерахуємо значення нижньої концентраційної межі поширення полум'я з об'ємних часток у кілограми у метрі кубічному за формулами (4,5):

$$C_{нмз}^* = \frac{C_{нмз}^0 \times M}{V_t} \quad (4)$$

де  $C_{нмз}^*$ ,  $C_{нмз}^0$  - значення концентраційних меж поширення полум'я відповідно в кг/м<sup>3</sup> та в об'ємних частках;

$M$  – молекулярна маса речовини, кг/кмоль;

$V_t$  – молярний об'єм парів або газів

$V_t$  визначається з наступної формули:

$$V_0 = V_t \frac{T_0 \times P_h}{T_h \times P_0} \quad V_t = V_0 \frac{T_k \times P_o}{T_o \times Pk} \quad (5)$$

де  $V_0 = 22,41$  м<sup>3</sup>/кмоль – молярний об'єм парів або газів у нормальних умовах;

$T_0 = 273,15$  К – температура у нормальних фізичних умовах;

$P_0 = 1,01325 \cdot 10^5$  Па – тиск у нормальних фізичних умовах ( $P_0 = 1 \cdot 10^5$  Па);

$T_h$  та  $P_h$  - відповідно робоча температура (К) та робочий тиск системи, Па.

$$V_t = 22,41 \cdot \frac{293 \cdot 1,01 \cdot 10^5}{273 \cdot 1,01 \cdot 10^5} = 24,05 \text{ м}^3 / \text{моль}$$

Розраховуємо значення  $C_{\text{нмз}}^*$ ,  $\text{кг}/\text{м}^3$ , за формулою 4 :

для ацетальдегіду:  $C_{\text{нмз}}^* = \frac{0,0412 \cdot 44,053}{24,05} = 0,0755 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

Так же само розраховано за формулою 4  $C_{\text{нмз}}^*$  і для інших речовин, що наведені в таблиці 1. Результати розрахунків наведено в таблиці 2.

Розраховуємо стехіометричну концентрацію горючої речовини, % (об), за формулою 3:

для ацетальдегіду:  $\beta = 2 + \frac{4}{4} - \frac{1}{2} = 2,5$      $C_{\text{ст}} = \frac{100}{1 + 4,84 \cdot 2,5} = 7,6336$

Так же само розраховано за формулою 3 стехіометричний коефіцієнт кисню в реакції згоряння і стехіометричну концентрацію ГГ або парів ЛЗР і для інших речовин, що наведені в таблиці 1. Результати розрахунків наведено в таблиці 2.

Розраховуємо густину речовин,  $\text{кг}/\text{м}^3$ , за формулою 2:

для ацетальдегіду:  $\rho = \frac{44,053}{22,413(1 + 0,00367 \cdot 20)} = 1,8317 \text{ кг}/\text{м}^3$

Так же само розраховано густину речовин за формулою 2 і для інших речовин, що наведені в таблиці 1. Результати розрахунків наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Назва речовини	Значення показників			
	$C_{\text{нмз}}^*$ , $\text{кг}/\text{м}^3$	стехіометричний коефіцієнт $\beta$	стехіометрична концентрація, $C_{\text{ст}}$ , % (об.),	густина, $\text{кг}/\text{м}^3$
1	2	3	4	5
Ацетальдегід	0,0755	2,5	7,6336	1,8317
Ацетилен	0,0271	2,5	7,6336	1,0827
Ацетон	0,0625	4	4,9116	2,415
Аміак	0,1062	3/4	21,598	0,708
Бензин А-93	0,0436	9,953	2,034	3,962
Винілхлорид	0,0935	2,5	7,6336	2,599
Водень	0,00345	0,5	29,24	0,0838
Метан	0,0352	2	9,363	0,667
Метиловий спирт (метанол)	0,093	1,5	12,106	1,331
Формальдегід	0,0874	1	17,123	1,2486

Розрахуємо надлишковий тиск вибуху ( $\Delta P$ ) для виробничого приміщення вільним об'ємом  $100 \text{ м}^3$  (варіант 1, концентрація горючої речовини рівна значенню  $C_{\text{нмз}}$ ).

Маса горючої речовини при цьому в приміщення об'ємом 100 м<sup>3</sup> буде становити:

$$m = 100 \text{ м}^3 \cdot \tilde{N}_{i\zeta}, \text{кг/м}^3 = 100 \cdot C_{нмз}, \text{кг.}$$

$$\text{Для ацетальдегіду: } \Delta P = (648 - 101) \cdot \frac{7,55 \cdot 0,3 \cdot 100}{100 \cdot 1,8314 \cdot 7,6336 \cdot 3} = 29,54 \text{кПа}$$

$$\text{Для ацетилену: } \Delta P = (1009 - 101) \cdot \frac{2,71 \cdot 0,5 \cdot 100}{100 \cdot 1,0827 \cdot 7,6336 \cdot 3} = 49,62 \text{кПа}$$

$$\text{Для ацетону: } \Delta P = (572 - 101) \cdot \frac{6,25 \cdot 0,3 \cdot 100}{100 \cdot 2,415 \cdot 4,9116 \cdot 3} = 24,80 \text{кПа}$$

$$\text{Для аміаку: } \Delta P = (588 - 101) \cdot \frac{10,62 \cdot 0,5 \cdot 100}{100 \cdot 0,708 \cdot 21,598 \cdot 3} = 56,37 \text{кПа}$$

$$\text{Для бензину: } \Delta P = (900 - 101) \cdot \frac{4,36 \cdot 0,3 \cdot 100}{100 \cdot 3,962 \cdot 2,034 \cdot 3} = 43,23 \text{кПа}$$

$$\text{Для вінілхлориду: } \Delta P = (820 - 101) \cdot \frac{9,35 \cdot 0,5 \cdot 100}{100 \cdot 2,599 \cdot 7,6336 \cdot 3} = 56,47 \text{кПа}$$

$$\text{Для водню: } \Delta P = (730 - 101) \cdot \frac{0,345 \cdot 1 \cdot 100}{100 \cdot 29,24 \cdot 0,0838 \cdot 3} = 29,52 \text{кПа}$$

$$\text{Для метану: } \Delta P = (706 - 101) \cdot \frac{3,52 \cdot 0,5 \cdot 100}{100 \cdot 0,667 \cdot 9,363 \cdot 3} = 56,83 \text{кПа}$$

$$\text{Для метанолу: } \Delta P = (620 - 101) \cdot \frac{9,3 \cdot 0,3 \cdot 100}{100 \cdot 1,331 \cdot 12,106 \cdot 3} = 29,95 \text{кПа}$$

$$\text{Для формальдегіду: } \Delta P = (900 - 101) \cdot \frac{8,74 \cdot 0,5 \cdot 100}{100 \cdot 1,2486 \cdot 17,123 \cdot 3} = 54,44 \text{кПа}$$

За такою ж схемою розраховано надлишковий тиск вибуху газо- пароповітряних сумішей для випадків, коли концентрація горючих речовин у об'ємі приміщення становить величину рівну  $C_{безп} \leq 0,9(C_{нмз} - 0,2I)$  згідно з [1] (варіант 2),  $0,2 C_{нмз}$  (варіант 3) і  $0,05 C_{нмз}$  згідно з [3] (варіант 4). Результати усіх розрахунків надлишкового тиску вибуху наведено у таблиці 3.

Таблиця 3

Назва речовини	Розраховані значення надлишкового тиску вибуху для варіантів:			
	варіант 1 ( $C_{нмз}$ )	варіант 2 ( $C_{безп} \leq 0,9 \cdot (C_{нмз} - 0,2I)$ )	варіант 3 ( $0,2 C_{нмз}$ )	варіант 4 ( $0,05 C_{нмз}$ )
1	2	3	4	5
ацетальдегід	29,54	25,22	5,91	1,48
ацетилен	49,62	41,03	9,92	2,48
ацетон	24,80	21,47	4,96	1,24
аміак	56,37	50,03	11,27	2,82
бензин	43,22	31,43	8,64	2,16
вінілхлорид	56,47	47,89	11,29	2,82
водень	29,52	25,24	5,90	1,48
метан	56,83	49,13	11,37	2,84
метиловий спирт	29,95	26,14	5,99	1,50
формальдегід	54,44	47,53	10,89	2,72

Розрахунковий надлишковий тиск вибуху величиною 101,3 кПа у перерахунку на тиск по площі становить  $10000 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2}$ .

За тиску  $\Delta P \geq 100$  кПа відбувається повне руйнування будівельних конструкцій;

за тиску  $\Delta P \approx 70$  кПа повністю руйнується 50 % будівельних конструкцій;

за тиску  $\Delta P \approx 28$  кПа будівля стає непридатна до використання;

за тиску  $\Delta P \approx 14$  кПа відбуваються помірні руйнування, пошкодження внутрішніх не міцних перегородок;

за тиску  $\Delta P \leq 5$  кПа відбувається руйнування легко скидних конструкцій (вікон, дверей, воріт);

за тиску  $\Delta P \leq 2$  кПа спостерігаються малі пошкодження.

За тиску  $5 \text{ кПа} \leq \Delta P \leq 50 \text{ кПа}$  руйнуються цегляні стіни товщиною до 51 см, бетонні стіни товщиною до 26 см.

За тиску  $50 \text{ кПа} \leq \Delta P \leq 100 \text{ кПа}$  руйнуються цегляні стіни товщиною до 64 см, бетонні стіни товщиною до 36 см.

Розрахунки показують, що для першого варіанту аварії, коли у приміщенні концентрація горючих речовин рівна  $C_{нмз}$ , розрахунковий надлишковий тиск вибуху для взятих речовин знаходиться у межах від 29 кПа до 57 кПа (за такого надлишкового тиску будівля стає непридатною до використання, руйнуються цегляні стіни товщиною до 51 см, бетонні стіни товщиною до 26 см).

Для другого варіанту аварії, коли у приміщенні концентрація горючих речовин рівна  $C_{безп} \leq 0,9(C_{нмз} - 0,21)$  розрахунковий надлишковий тиск вибуху для взятих речовин знаходиться у межах від 21 кПа до 50 кПа (за такого надлишкового тиску будівля теж стає непридатною до використання, руйнуються цегляні стіни товщиною до 51 см, бетонні стіни товщиною до 26 см).

Для третього варіанту аварії, коли у приміщенні концентрація горючих речовин становить 20 % від  $C_{нмз}$ , розрахунковий надлишковий тиск вибуху для взятих речовин знаходиться у межах від 5 кПа до 11 кПа (можуть відбуватися помірні руйнування).

І тільки для четвертого варіанту аварії, коли у приміщенні концентрація горючих речовин становить 5 % від  $C_{нмз}$  ( $0,05 C_{нмз}$ ) розрахунковий надлишковий тиск вибуху для взятих речовин знаходиться у межах від 1,5 кПа до 2,8 кПа. ). За такого надлишкового тиску можуть спостерігатися тільки малі пошкодження.

*Висновки.* Наведені розрахунки показують, що існує певна невідповідність у характеристиці пожежної небезпеки технологічних процесів і приміщень з використанням такого показника пожежної небезпеки речовин і матеріалів, як  $C_{нмз}$  і розрахованою величиною надлишкового тиску вибуху для приміщень з використанням значення концентрації горючої речовини рівного  $C_{нмз}$ .

Показник  $C_{нмз}$  визначається у фіксованому невеликому об'ємі з використанням гомогенізованої суміші горючих газів, парів або пилу з повітрям. За таких умов випробувань незначна зміна концентрації горючої речовини у сторону зменшення від значення  $C_{нмз}$  приводить до не займання суміші або до не поширення горіння по всьому об'єму суміші.

У великих об'ємах (апаратах або приміщеннях), де перемішування горючої речовини з повітрям іде тільки за рахунок дифузії від місця витікання газу або випаровування рідини, або середовище за умовами технології не гомогенізується, концентрація горючої речовини зі значеннями, які перевищують значення  $C_{нмз}$  може утворитися у якійсь частині об'єму. Тому використовувати тільки середньооб'ємне значення концентрації горючої речовини (без врахування стану гомогенізації

середовища), яке буде менше місцевого значення у конкретній частині об'єму, для характеристики пожежної небезпеки даного об'єму не можна. За таких умов необхідно враховувати тиск вибуху суміші горючої речовини з повітрям.

Для таких випадків безпечні умови будуть тільки тоді, коли середньооб'ємна концентрація горючої речовини не буде перевищувати 5 % від значення  $C_{нмз}$ .

**Список використаних джерел**

1. ГОСТ 12.1.044-89 Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения.

2. Баратов А.Н., Корольченко А.Я., Кравчук Г.Н. и др. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: Справочное издание: в 2 книгах; М., Химия, 1990.

3. М.В.Алексеев, О.М.Волков, Н.Ф.Шатров. Учебник "Пожарная профилактика технологических процессов производств", ВИПТШ, Москва, 1986.

4. НАПБ Б.03.002-2007 Норми визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою.