

УДК 614.841

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/46>**Луценко Ю.В.**

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Добряк Д.О.**

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Кравченко Н.В.**

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Цимбалістий С.З.**

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Савченко О.В.**

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

## ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ НАДЛИШКОВОГО ТИСКУ ВИБУХУ ПИЛОПОВІТРЯНИХ СУМІШЕЙ У ВИРОБНИЧИХ ПРИМІЩЕННЯХ

У даній статті висвітлено особливості розрахунку надлишкового тиску вибуху пилоповітряних сумішей у виробничих приміщеннях. Визначення категорій приміщень і будинків за вибухопожежною та пожежною небезпекою провадять відповідно нормативного документу [1]. Категорію визначають для встановлення вимог щодо забезпечення вибухопожежної та пожежної безпеки приміщень, будинків та зовнішніх установок стосовно планування і забудови, поверховості, площ, розташування приміщень, конструктивних рішень, інженерного устаткування та систем протипожежного захисту. У розрахунку враховують кількість та властивості пожежовибухонебезпеки речовин і матеріалів, що знаходяться в об'ємі даного приміщення або будинку, особливості технологічних процесів виробництва та об'ємно-планувальних рішень, наявності технічних засобів, що запобігають виникненню аварійних ситуацій. Існує два підходи щодо визначення маси горючого пилу, що потрапив у повітря приміщення в результаті аварії. У даній статті розглянуто обидва підходи на прикладі визначення надлишкового тиску вибуху у приміщенні пилорозробного відділення. Наведено пояснення щодо застосування цих підходів під час визначення надлишкового тиску вибуху пилоповітряної суміші. Слід зазначити, що вибух пилу завжди створює умови для переходу пилу з поверхонь обладнання, стін, підлоги у зважений стан. Це приводить до утворення вибухонебезпечних концентрацій в об'ємі всього приміщення. Для горючих пилів аварійний об'єм можна вважати таким, що дорівнює вільному об'єму приміщення.

Аварійну масу пилу, яка може перейти у стан аерозолу, доцільно визначати після розрахунку стехіометричної концентрації горючого пилу у повітрі, виходячи з умови, що об'єм аварійної хмари дорівнює вільному об'єму приміщення [3; 5].

Для визначення стехіометричної концентрації горючого пилу складного елементного складу слід проводити розрахунок кількості повітря, необхідного для згорання маси пилу, що внаслідок аварії перейшов у стан аерозолу. Слід зауважити, що наведені підходи не поширюється на будинки та приміщення, призначені для виробництва, зберігання і утилізації вибухових речовин і засобів підривань, а також зовнішні установки для їх виробництва.

**Ключові слова:** надлишковий тиск вибуху, стехіометрична концентрація, розрахунковий об'єм пилоповітряної хмари, розрахункова маса горючого пилу.

**Постановка проблеми.** Вимоги до визначення категорій приміщень і будинків виробничого та складського призначення, лабораторій, а також зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою залежно від кількості й пожежовибухонебезпечних властивостей речовин і матеріалів, що в них знаходяться, з урахуванням особливостей

технологічних процесів виробництва та об'ємно-планувальних рішень, наявності технічних засобів, що запобігають виникненню аварійних ситуацій, установлює нормативний документ [1].

Категорії приміщень, будинків та зовнішніх установок, які визначені відповідно до цього стандарту, слід використовувати для встановлення

вимог щодо забезпечення вибухопожежної та пожежної безпеки зазначених приміщень, будинків та зовнішніх установок стосовно планування і забудови, поверховості, площ, розташування приміщень, конструктивних рішень, інженерного устаткування та систем протипожежного захисту.

У розділі 7.3 [1] наведено порядок розрахунку надлишкового тиску вибуху пилоповітряних сумішей. Сформульовано два підходи щодо визначення маси горючого пилу, що потрапив у повітря приміщення в результаті аварії.

Однак вибір певного підходу до розрахунку маси горючого пилу, що потрапив у повітря приміщення в результаті аварії, потребує певного уточнення.

**Формування цілі статті.** Метою даної статті є уточнення щодо застосування цих підходів [1] під час визначення надлишкового тиску вибуху пилоповітряної суміші

#### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Проаналізовано питання розрахунку надлишкового тиску вибуху у приміщеннях, в яких обертається велика кількість горючого пилу за двома підходами згідно з вимогами [1], що розглядалося в посібниках [3; 5]. Але обґрунтування вибору методики для певного об'єкту потребують подальших досліджень.

**Викладення основного матеріалу.** У даній статті розглядаються особливості розрахунку надлишкового тиску вибуху пилоповітряної суміші за двома підходами зазначеними вище.

Розрахунок надлишкового тиску вибуху для горючого пилу  $\Delta P$  у кілопаскалях обчислюють за формулою:

$$\Delta P = \frac{m \cdot H_T \cdot P_0 \cdot Z}{V_{\text{вільн}} \cdot \rho_{\text{пов}} \cdot C_p \cdot T_0} \cdot \frac{1}{K_n} \quad (1)$$

де  $m$  – маса горючого пилу, що потрапила в результаті розрахункової аварії до приміщення і яку визначають за формулою (2), кг;

$H_T$  – теплота згоряння, Дж·кг<sup>-1</sup>;

$P_0$  – атмосферний тиск, кПа (дозволено приймати таким, що дорівнює 101,3 кПа);

$Z$  – коефіцієнт участі у вибуху, який може бути розрахований за формулою (3). Дозволено приймати значення  $Z$  відповідно до таблиці 2 [1].

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

$\rho_{\text{пов}}$  – густина повітря до вибуху за початкової температури  $T_0$ , кг·м<sup>-3</sup>;

$C_p$  – теплоємність повітря, Дж·(кг<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>) (дозволено приймати рівною  $1,01 \cdot 10^3$  Дж·(кг<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>);

$T_0$  – початкова температура повітря, К.

Масу горючого пилу, що потрапила в результаті розрахункової аварії до приміщення, визначають за формулою:

$$m = \min \left\{ \begin{array}{l} m_{\text{вз}} + m_{\text{ав}} \\ \rho_{\text{см}} V_{\text{ав}} / Z \end{array} \right. , \quad (2)$$

де  $m_{\text{вз}}$  – розрахункова маса частини відкладеного у приміщенні пилу, що перейшов у стан аерозолу, кг;

$m_{\text{ав}}$  – розрахункова маса горючого пилу, що потрапив до об'єму приміщення з апарата у результаті розрахункової аварії та перейшов у стан аерозолу, кг;

$\rho_{\text{см}}$  – стехіометрична концентрація горючого пилу в аерозолі, кг·м<sup>-3</sup>;

$V_{\text{ав}}$  – розрахунковий об'єм пилоповітряної хмари, утвореної при аварійній ситуації в об'ємі приміщення, м<sup>3</sup>.

Коефіцієнт участі пилу в завислому стані (стані аерозолу), у вибуху,  $Z$ , розраховують за формулою:

$$Z = 0,5 \cdot M_{\text{кр}} \quad (3)$$

де  $M_{\text{кр}}$  – масова частка частинок пилу розміром менше критичного. З перевищенням критичного розміру частинок пилу аерозоль стає вибухобезпечною, а саме такою, що не здатна поширювати полум'я. У разі відсутності даних щодо масової частки частинок пилу розміром менше критичного дозволено приймати  $Z = 0,5$ .

Для визначення надлишкового тиску вибуху пилоповітряної суміші за формулою (1) приймають мінімальну масу пилу, отриману в результаті розрахунків двома способами [1] за формулою (2).

Спробуємо застосувати формулу (2) для визначення надлишкового тиску вибуху у приміщенні, в якому обертається значна кількість горючого пилу складного елементного складу. У приміщенні пилопідготовчого відділення об'ємом 32 000 м<sup>3</sup> обертається значна кількість кам'яного вугілля, що перероблюють у пил. Внаслідок аварії у повітря приміщення відбувається викидання вугільного пилу.

Визначення надлишкового тиску вибуху у приміщенні пилопідготовчого відділення.

Розрахункову масу пилу, що знаходиться у стані аерозолу у вільному об'ємі приміщення пилоприготувального відділення в результаті аварійної ситуації,  $m$ , кг, визначають за формулою:

$$m = m_{\text{зв}} + m_{\text{ав}} \quad (4)$$

Розрахункову масу пилу відкладеного на поверхнях, що перейшов у стан аерозолу,  $m_{\text{зв}}$ , визначають за формулою:

$$m_{36} = K_{36} + m_n, \quad (5)$$

де  $K_{36}$  – частка пилу, що відклалася у приміщенні, яка здатна перейти у стан аерозолу в результаті аварійної ситуації. У разі відсутності експериментальних даних щодо значення  $K_{36}$  допускається приймати  $K_{36} = 0,9$ ;

$m_n$  – маса пилу, що відклалася у приміщенні до моменту аварії, кг і яка за вихідними даними становить 100 кг.

Розрахункову масу пилу, що потрапила до приміщення з апарата або технологічного обладнання в результаті аварійної ситуації,  $m_{ав}$ , визначають за формулою :

$$m_{ав} = (m_{ап} + q \cdot \tau) \cdot K_{п}, \quad (6)$$

де  $m_{ап}$  – маса горючого пилу, що викидається до приміщення з апарата, кг;

$q$  – витрата, з якою продовжують надходити пилоподібні речовини до аварійного апарата по трубопроводах до моменту їх перекидання,  $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1}$ ;

$\tau$  – час перекидання, який визначається за пунктом 7.1.2 в), с [1];

$K_{п}$  – коефіцієнт пилення, що представляє собою відношення маси пилу у стані аерозолу до усієї маси пилу, який надійшов з апарата до приміщення. У разі відсутності експериментальних даних щодо значення  $K_{п}$  допускається приймати:

для пилу з дисперсністю не менше ніж 350 мкм  $K_{п} = 0,5$ ;

для пилу з дисперсністю менше ніж 350 мкм  $K_{п} = 1,0$ .

У даному випадку  $m_{ав}$  дорівнює масі горючого рилу, що містився в продувному бункері (апараті). а коефіцієнт пилення для вугільного пилу, враховуючи, що дисперсність його менше 350 мкм, становить  $K_{п} = 1,0$ .

Приймаємо, що аварія сталася у продувному бункері, коли він перебував в одному з п'яти режимів, а саме в режимі «очікування». В результаті розгерметизації продувного бункеру ємністю 70 м<sup>3</sup> в об'єм пилоприготувального відділення надійшла значна кількість вугільного пилу.

За вихідними даними маса пилу, що відкладається у приміщенні до моменту аварії за добу становить 100 кг. У разі відсутності експериментальних даних щодо значення  $K_{36}$  приймаємо  $K_{36} = 0,9$ .

Розрахункову масу відкладеного у цеху пилу, що перейшов у стан аерозолу,  $m_{36}$ , визначаємо за формулою (5):

$$m_{36} = 0,9 \cdot 100 = 90,$$

За вихідними даними насипна густина вугільного пилу становить 700 кг/м<sup>3</sup>, заповненість ємності становить 0,8.

Маса горючого пилу, що потрапляє у повітря приміщення з продувного бункеру (апарата) становить:

$$m_{ап} = 0,8 \cdot 700 \cdot 70 = 39200 \text{ (кг)}$$

Маса пилу, що надійшла у приміщення в результаті аварії, за формулою (6), становить:

$$m_{ав} = 39200 \cdot 1 = 39200 \text{ (кг)},$$

Розрахункову масу пилу, що знаходиться у стані аерозолу у пилоприготувальному приміщенні в результаті аварійної ситуації,  $m$ , кг, визначають за формулою (4):

$$m = 90 + 39\,200 = 39\,290 \text{ (кг)}$$

Геометричний об'єм приміщення пилопідготовчого відділення становить 32000 м<sup>3</sup>. Приймаємо, що вільний від обладнання об'єм приміщення становить 50% від геометричного, і становить, відповідно, 16 000 м<sup>3</sup>.

Визначаємо надлишковий тиск вибуху за формулою (1):

$$\Delta P = \frac{39290 \cdot 30 \cdot 10^6 \cdot 101 \cdot 0,5}{16000 \cdot 1,2 \cdot 1010 \cdot 293} \cdot \frac{1}{3} = 3492 \text{ (кПа)}$$

Маса вугільного пилу, що бере участь у вибуху з урахуванням, що коефіцієнт  $Z=0,5$ , становить 19 645,0 кг. Надлишковий тиск вибуху в приміщенні будівлі пилоприготувального відділення у разі аварії становить 3492,0 кПа.

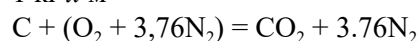
Розрахунок об'єму повітря, необхідного для згорання речовини складного елементного складу.

Склад речовин складного елементного складу, у даному приміщенні це вугільний пил, представлений у масових долях ( $\omega$ , %) кожного елемента. За даними [2] елементний склад кам'яного вугілля такий: вуглець (С) – 79,4%, водень (Н) – 5,3%, кисень (О) – 10,3%, сірка (S) – 2,82%, зола – 2,18%.

При горінні кисень повітря витрачається на окиснення вуглецю С, водню Н, сірки S та інших горючих складових. Розрахуємо, який теоретичний об'єм повітря необхідний для згорання 1 кг кожного елемента за нормальних умов. Для цього скористаємося методикою, викладеною в [2; 4] і запишемо у рівнянні всі відомі та невідомі величини та виведемо пропорцію для вуглецю, водню та сірки.

Визначаємо об'єм повітря для згорання 1 кг вуглецю:

$$1 \text{ кг} \times \text{м}^3$$



$$12 \text{ кг} \cdot 4,76 \cdot 22,4 \text{ м}^3$$

$$V_n(\text{C})^{\text{теор}} = x = \frac{4,76 \cdot 22,4}{12} = 8,885 \text{ м}^3$$

Визначаємо об'єм повітря для згорання 1 кг водню:

$$1 \text{ кг } x \text{ м}^3$$

$$H + 0.25(O_2 + 3.76N_2) = 0.5H_2O + 0.25 \cdot 3.76N_2$$

$$1 \text{ кг } 0.25 \cdot 4.76 \cdot 22.4 \text{ м}^3$$

$$V_n(H)^{теор} = x = \frac{0.25 \cdot 4.76 \cdot 22.4}{1} = 26.656 \text{ м}^3$$

Визначаємо об'єм повітря для згорання 1 кг сірки:

$$1 \text{ кг } x \text{ м}^3$$

$$S + (O_2 + 3.76N_2) = SO_2 + 3.76N_2$$

$$32 \text{ кг } 4.76 \cdot 22.4 \text{ м}^3$$

$$V_n(S)^{теор} = x = \frac{4.76 \cdot 22.4}{32} = 3.332 \text{ м}^3$$

Вуглець, водень та сірка є основними складовими більшої органічних сполук. Значна кількість органічних речовин мають у своєму складі кисень, і, отже, повітря на горіння буде витрачено менше. Розрахуємо об'єм повітря, у якому міститься 1 кг кисню.

$$32 \text{ кг } O_2 - 4.76 \cdot 22.4 \text{ м}^3 \text{ повітря}$$

$$1 \text{ кг } - x \text{ м}^3$$

$$V_n(O)^{теор} = x = \frac{4.76 \cdot 22.4}{32} = 3.332 \text{ м}^3$$

Теоретичний об'єм повітря для згорання заданої маси (m) речовини складного елементного складу за нормальних умов визначається за формулою:

$$V_n^{теор} = m \cdot 0.267 \cdot \left( \frac{\omega(C)}{3} + \frac{\omega(S)}{8} + \omega(H) - \frac{\omega(O)}{8} \right) \text{ м}^3/\text{кг} \quad (7)$$

Теоретичний об'єм повітря для згорання заданої маси (m) речовини, у нашому випадку це 39 290 кг вугільного пилу за формулою (7) становить:

$$V_n^{теор} = 39290 \cdot 0.267 \cdot \left( \frac{79.4}{3} + \frac{2.82}{8} + 5.3 - \frac{10.3}{8} \right)$$

$$= 350 459,04 \text{ (м}^3\text{)}$$

Відповідно, теоретичний об'єм повітря для згорання 1 кг вугільного пилу за формулою (7) становить:

$$V_n^{теор} = 1 \cdot 0.267 \cdot \left( \frac{79.4}{3} + \frac{2.82}{8} + 5.3 - \frac{10.3}{8} \right) = 8.92 \text{ (м}^3\text{)}$$

За даними [2] коефіцієнт надлишку повітря для кам'яного вугілля даного елементного складу становить 1,3. З огляду на коефіцієнт надлишку повітря реально на згорання 1 кг вугільного пилу буде витрачено повітря в об'ємі 11,6 м<sup>3</sup>.

З огляду на вищенаведене реальний об'єм повітря, необхідного для згорання 39290 кг вугільного пилу становить 455 764 м<sup>3</sup>, що значно перевищує вільний об'єм виробничого приміщення.

Визначення стехіометричної концентрації пилоповітряної суміші.

За попередніми розрахунками на згорання 1 кг вугільного пилу теоретично потрібно 8,92 м<sup>3</sup>. Відповідно, стехіометрична концентрація вугільного пилу становить 0,112 кг/м<sup>3</sup>.

Визначення надлишкового тиску вибуху у приміщенні пилопідготовчого відділення за формулою (2) з урахуванням стехіометричної концентрації вугільного пилу.

Для вказаного розрахунку має бути визначений об'єм пилоповітряної хмари, що представляється неможливим. Слід зазначити, що вибух пилу завжди створює умови для переходу пилу з поверхонь обладнання, стін, підлоги у зважений стан. Це приводить к утворенню вибухонебезпечних концентрацій в об'ємі всього приміщення. Для горючих пилів аварійний об'єм можна вважати таким, що дорівнює вільному об'єму приміщення.

З огляду на вищенаведене маса вугільного пилу, що перейшла у стан аерозолі і бере участь у вибуху, за другим рівнянням згідно з формулою (2) становить:

$$m = \frac{\rho_{cm} \cdot V_{аб}}{Z} = 3584 \text{ кг}$$

Для подальшого розрахунку з отриманих значень вугільного пилу, що перейшов у стан аерозолі, останнє значення є мінімальним.

Визначаємо надлишковий тиск вибуху у приміщенні пилопідготовчого відділення за формулою (1)

$$\Delta P = \frac{3584 \cdot 30 \cdot 10^6 \cdot 101 \cdot 0.5}{16000 \cdot 1.2 \cdot 1010 \cdot 293} \cdot \frac{1}{3}, = 318.5 \text{ (кПа)}$$

### Висновки.

На конкретному прикладі розглянуто особливості визначення надлишкового тиску вибуху пилоповітряних сумішей.

Таким чином, у приміщеннях, де обертається горючий пил і де у разі аварії, можливе потрапляння значної кількості горючого пилу (сотні або тисячі кг), аварійну масу пилу,  $m_{ав}$ , яка може перейти у стан аерозолі, доцільно визначити після розрахунку стехіометричної концентрації горючого пилу у повітрі, виходячи з умови, що об'єм аварійної хмари дорівнює вільному об'єму приміщення [3; 5].

Для визначення стехіометричної концентрації горючого пилу складного елементного складу слід проводити розрахунок кількості повітря, необхідного для згорання маси пилу, що внаслідок аварії перейшов у стан аерозолі.

Слід зазначити, що документ [1] описує порядок визначення надлишкового тиску дефлаграційного вибуху.

У приміщеннях, лінійні розміри яких (довжина, ширина, висота) відрізняються один від одного більше ніж у 10 разів і у приміщеннях, із значною

захарашеністю будівельними конструкціями і обладнанням дефлаграційне вибухове горіння може переходити у детонаційне [6–8], відповідно, застосування положень документа [1] щодо визначення надлишкового тиску вибуху для даних приміщень потребує подальшого дослідження.

#### Список літератури:

1. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою.
2. Портола В.А. Расчет процессов горения и взрыва : учебное пособие / В.А. Портола, Н.Ю. Луговцева, Е.С. Торосян. Томск, 2012. 108 с.
3. Корольченко А.Я. Категорирование помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности / Александр Яковлевич Корольченко, Дмитрий Олегович Загорский. М. : Изд-во «Пожнаука», 2010. 118 с. Ил.
4. Хворенкова А.Ж. Теория горения и взрыва: Сб. задач. Екатеринбург : Изд.-во УрГУПС, 2014. 80 с.
5. Посібник по практичному застосуванню ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. 2017.
6. Расчет параметров легкосбрасываемых конструкций для взрывопожароопасных помещений промышленных объектов : рекомендации. М. : ВНИИПО, 2015. 48 с.
7. Пожарная профилактика в строительстве / под редакцией В.Ф. Кудаленкина. Высшая инженерная техническая школа МВД СССР, 1985. 447 с.
8. Пилюгин Л.П. Обеспечение взрывоустойчивости зданий с помощью предохранительных конструкций. М. : Ассоциация «Пожарная безопасность и наука», 2000. 224 с.

**Lutsenko Yu.V., Dobriak D.O., Kravchenko N.V., Tsymbalistiy S.Z., Savchenko O.V.**

#### **PECULIARITIES OF CALCULATION OF EXCESS EXPLOSION PRESSURE OF DUST-AIR MIXTURES IN PRODUCTION PREMISES**

*This article highlights the features of the calculation of the excess pressure of the explosion of dust-air mixtures in production facilities. Determination of categories of premises and buildings by explosion and fire hazard is carried out in accordance with the normative document [1]. The category is determined to establish the requirements for explosion and fire safety of premises, buildings and outdoor installations in relation to planning and construction, storeys, areas, location of premises, design solutions, engineering equipment and fire protection systems. The calculation takes into account the number and properties of fire and explosion substances and materials in the volume of the room or house, the peculiarities of technological processes of production and spatial planning solutions, the availability of technical means to prevent emergencies. There are two approaches to determining the mass of combustible dust that enters the room as a result of an accident. This article considers both approaches on the example of determining the excess explosion pressure in the room of the dust preparation department. An explanation of the application of these approaches in determining the excess pressure of the explosion of the dust-air mixture is given. It should be noted that the explosion of dust always creates conditions for the transition of dust from the surfaces of equipment, walls, floors in a suspended state. This leads to the formation of explosive concentrations throughout the room. For combustible saws, the emergency volume can be considered equal to the free volume of the room.*

*The emergency mass of dust, which can turn into an aerosol, should be determined after calculating the stoichiometric concentration of combustible dust in the air, based on the condition that the volume of the emergency cloud is equal to the free volume of the room [3; 5].*

*To determine the stoichiometric concentration of combustible dust of a complex elemental composition, it is necessary to calculate the amount of air required for the combustion of the mass of dust, which as a result of the accident went into aerosol. It should be noted that these approaches do not apply to buildings and premises intended for the production, storage and disposal of explosives and explosives, as well as outdoor installations for their production.*

**Key words:** *excess explosion pressure, stoichiometric concentration, calculated volume of dust-air cloud, calculated mass of combustible dust.*