

DOI: <https://doi.org/10.32353/khrife.1.2021.20>  
УДК 343.983

**Р. Н. Гусейнов,**

судовий експерт лабораторії інженерно-технічних, екологічних,  
військових досліджень та досліджень відео-, звукозапису  
ННЦ «ІСЕ ім. Засл. проф. М. С. Бокаріуса», м. Харків, Україна,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3021-3472>,  
e-mail: [huseinov\\_ruslan@ukr.net](mailto:huseinov_ruslan@ukr.net)

**Ю. В. Панчук,**

науковий співробітник лабораторії інженерно-технічних, екологічних,  
військових досліджень та досліджень відео-, звукозапису  
ННЦ «ІСЕ ім. Засл. проф. М. С. Бокаріуса», м. Харків, Україна,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8605-6029>,  
e-mail: [expert.ryndina31071988@gmail.com](mailto:expert.ryndina31071988@gmail.com)

## **Основні розрахункові методи дослідження обставин і механізму техногенних вибухів**

*Проаналізовано небезпеку техногенних вибухів, комплекс небезпечних чинників яких може спричинити тяжкі наслідки.*

*Метою статті є проведення аналізу небезпеки техногенних вибухів і наведення розрахункових методів дослідження для визначення механізму їх виникнення.*

*У статті викладено основні розрахункові методи дослідження техногенних вибухів на відкритій місцевості, у приміщеннях і в обмеженому об'ємі, що дасть змогу систематизувати процес дослідження та проаналізувати, як відбуваються вибухи в конкретних ситуаціях, і визначити механізм їх виникнення під час виконання судових експертиз дослідження обставин і механізму техногенних вибухів.*

**Ключові слова:** вибухова речовина, газопароповітряна суміш, концентраційні межі поширення полум'я, надзвичайна ситуація, надлишковий тиск, техногенний вибух.

**Постановка наукової проблеми.** Надзвичайні ситуації (далі — НС) техногенного характеру, пов'язані з техногенними вибухами, є дуже небезпечними. Вибух поєднує комплекс небезпечних чинників, які можуть спричинити травмування та смерть людей, а також значні матеріальні збитки й забруднення навколишнього середовища.

Оскільки сучасне виробництво та побут неможливі без застосування легкозаймистих і вибухонебезпечних речовин, особливу увагу варто приділяти попередженню виникнення НС, пов'язаних із вибухами, а також проведенню досліджень з визначення механізму виникнення техногенних вибухів із метою в подальшому мінімізувати ймовірність їх виникнення. Тому ця тема є актуальною і потребує ретельного розгляду.

**Аналіз основних досліджень і публікацій.** Прогнозування наслідків техногенних вибухів, що відбуваються під час дефлаграційного горіння вибухо-пожежонебезпечних сумішей на об'єктах господарської діяльності, докладно дослідив Л. П. Пілюгін <sup>1</sup>. Науковець схарактеризував руйнування будівель і споруд унаслідок впливу надлишкового тиску. Динаміку протікання сценаріїв пожеж і вибухів наведено у праці Н. Н. Брушлинського та А. Я. Корольченка <sup>2</sup>. Наслідки пожеж і техногенних вибухів, залежно від умов протікання небезпечного сценарію, виклав С. І. Таубкін <sup>3</sup>. Його син, І. С. Таубкін, сформулював основи виконання судових експертиз дослідження обставин і механізму техногенних вибухів <sup>4</sup>.

Механізму виникнення техногенних вибухів, а також алгоритму проведення дослідження О. В. Тарахно, В. М. Сирих і Р. В. Тарахно присвятили праці «Проблемні питання дослідження вибухів газоповітряних сумішей при проведенні пожежно-технічних експертиз» <sup>5</sup> та «Експертне дослідження версії виникнення вибуху газоповітряної суміші у приміщенні» <sup>6</sup>.

**Мета статті:** аналіз безпеки техногенних вибухів та наведення розрахункових методів дослідження для визначення механізму їх виникнення під час проведення судових експертиз дослідження обставин і механізму техногенних вибухів.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Дослідження техногенних вибухів на відкритій місцевості спрямоване на визначення умов утворення вибухонебезпечних концентрацій горючих речовин, можливості займання і наслідків розвитку вибухонебезпечної події. Потенційну небезпеку становлять підприємства, що використовують великі обсяги горючих газів і легкозаймистих рідин (АЗС, склади зріджених газів і нафтопродуктів, газопроводи й нафтопроводи). Передусім це обумовлено загрозою викиду значних обсягів горючих речовин в атмосферу з подальшим їх вибухом.

Тому моделювання НС, пов'язаних з аварійним витіканням газу або легкозаймистих рідин із технологічного обладнання й утворенням вибухонебезпечних зон є актуальною проблемою.

<sup>1</sup> Пілюгін Л. П. Прогнозирование последствий внутренних аварийных взрывов. Москва, 2010. 380 с.

<sup>2</sup> Брушлинский Н. Н., Корольченко А. Я. Моделирование пожаров и взрывов. Москва, 2000. 482 с.

<sup>3</sup> Таубкин С. И. Пожар и взрыв, особенности их экспертизы. Москва, 1999. 600 с.

<sup>4</sup> Таубкин И. С. Судебная экспертиза техногенных взрывов. Организационные, методические и правовые основы. Москва, 2009. 592 с.

<sup>5</sup> Тарахно О. В., Сирих В. М., Тарахно Р. В. Проблемні питання дослідження вибухів газоповітряних сумішей при проведенні пожежно-технічних експертиз. *Проблеми пожежної безпеки* : сб. науч. тр. Харьков, 2009. Вып. 25. С. 175—180.

<sup>6</sup> Їх же. Експертне дослідження версії виникнення вибуху газоповітряної суміші у приміщенні. *Там же*. Харьков, 2010. Вып. 27. С. 198—205.

Для отримання достовірних висновків про можливість виникнення пожеж і вибухів необхідно застосовувати науково обґрунтовані методики. У наявних наукових і нормативно-методичних розробках з прогнозування наслідків аварійного виходу горючих речовин у навколишнє середовище наведено послідовність розрахунку таких параметрів, як надлишковий тиск, радіус і час «життя» вогненної сфери тощо. Важливим питанням дослідження техногенних вибухів на відкритій місцевості є визначення можливості руйнування будівель, споруд і загибелі людей від вражаючої дії вибуху. Ступінь руйнування навколишніх будівельних конструкцій та ураження людей залежить від надлишкового тиску, який створюється внаслідок різкого теплового розширення продуктів горіння й розповсюджується в усіх напрямках від центра вибуху. Надмірний тиск визначають так:

$$\Delta P = P_o \left( 0,8 \frac{m_{\text{тнт}}^{0,33}}{r} + 3 \frac{m_{\text{тнт}}^{0,66}}{r^2} + 5 \frac{m_{\text{тнт}}}{r^3} \right), \text{ кПа}, \quad (1)$$

де:  $P_o$  — атмосферний тиск, кПа;

$m_{\text{тнт}}$  — тротильовий еквівалент вибуху, кг;

$r$  — відстань від геометричного центра парогазової суміші, м<sup>1</sup>.

Визначення потужності вибуху визначають за формулою:

$$m_{\text{тнт}} = \frac{Q_r m_{\text{ГВ}}}{4520}, \text{ кг}, \quad (2)$$

де:  $Q_r$  — теплота згоряння горючої речовини, кДж/кг;

$m_{\text{ГВ}}$  — маса горючої речовини, яке вибухає, кг;

4520 — теплота вибуху тринітротолуолу, кДж/кг.

Однак, на відміну від вибуху конденсованих вибухових речовин, горіння газопароповітряної суміші (далі — ГППС) у режимі вибуху відбувається лише на зовнішній частині хмари та з іншою швидкістю, у якій концентрація горючої речовини перебуває в межах від нижньої до верхньої концентраційної межі поширення полум'я. Отже, для оцінювання параметрів вибуху газо- пароповітряної хмари на відкритому просторі вважають, що у вибуховому (кінетичному) горінні бере участь від 2 % до 10 % (*max*) горючої речовини<sup>2</sup>.

Крім того, вибух конденсованих вибухових речовин відбувається в детонаційному режимі, водночас перехід дефлаграційного горіння ГППС у детонацію можливий тільки для вузького кола горючих газів: наприклад, водню, ацетилену. Зважаючи на зазначене, максимально можливий коефіцієнт корисної дії вибуху ГППС унаслідок виникнення дефлаграційного горіння становить не більше 30 %. Частина енергії переходить в нагріті продукти згоряння. Тоді тротильовий еквівалент вибуху визначають так:

<sup>1</sup> Таубкин С. И. Указ. соч.

<sup>2</sup> Тарахно О. В., Сирих В. М., Тарахно Р. В. Проблемні питання дослідження вибухів ...

$$m_{\text{тгг}} = \frac{0,3zQ_r m_{\text{гв}}}{0,9 \cdot 4520}, \text{ кг}, \quad (3)$$

де: 0,3 і 0,9 відповідно — частка енергії, витрачена на формування вибуху газопароповітряної хмари та тринітротолуолу;

$m_{\text{гв}}$  — маса горючої речовини, яка надійшла в навколишнє середовище внаслідок аварійної ситуації й утворила ГППС, кг;

$z$  — коефіцієнт участі енергії пари та газів у вибуху.

Зоною, де можливе руйнування і травмування людей, заведено вважати площу з прийнятим для розрахунку центром вибуху й межами, які визначено радіусом ураження  $r_{\text{пор}}$ . А ймовірну руйнівну дію під час вибуху можна визначити за узагальненими даними за апроксимаційною формулою:

$$r_{\text{пор}} = \frac{k_i \sqrt[3]{m_{\text{вз}}}}{\left[ 1 + \left( \frac{3180}{m_{\text{вз}}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{6}}}, \text{ м}, \quad (4)$$

де:  $k_i$  — безрозмірний коефіцієнт рівня впливу вибуху, який визначають залежно від надлишкового тиску;

$m_{\text{вз}}$  — маса горючої речовини, яка бере участь у вибуху і дорівнює  $m_{\text{гв}} \cdot z$ , кг.

Як відомо, надзвичайна ситуація із загрозою виникнення вибуху та подальшої пожежі у виробничій будівлі або приміщенні може виникнути внаслідок аварійної розгерметизації зовнішньої установки. Імовірність вибуху в разі витікання горючого газу в об'єм приміщення створюється за умови досягнення концентрації газу нижньої концентраційної межі поширення полум'я. Отже, для визначення можливості виникнення горіння необхідно порівняти фактичну середню концентрацію горючого газу з нижньою концентраційною межею поширення полум'я цього газу.

Середню фактичну концентрацію газу, що утворилася у приміщенні внаслідок аварійного витікання, можна розрахувати за формулою:

$$\varphi'_{\text{сер}} = \frac{m_r}{V_{\text{прим}} (1 - \eta)} = \frac{m_r}{V_{\text{вільн}}}, \text{ кгм}^{-3} \quad \text{або} \quad \varphi_{\text{сер}} = \frac{100m_r}{\rho_r V_{\text{вільн}}}, \% \quad (5)$$

де:  $\varphi'_{\text{сер}}$ ,  $\varphi_{\text{сер}}$  — відповідно масова й об'ємна середня фактична концентрація газу у вільному об'ємі приміщення;

$m_r$  — маса газу, що надійшла до приміщення за час аварійної ситуації, кг;

$V_{\text{прим}}$  — загальний об'єм приміщення, м<sup>3</sup>;

$\eta$  — частка об'єму приміщення, зайнята обладнанням або меблями;

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

Для визначення середньої концентрації горючого газу необхідно знати масу газу, що надійшла під час аварійного натікання до приміщення, з певною масовою витратою  $g_r^{\text{налк}}$  за певний час розвитку аварійної ситуації.

Як відомо <sup>1</sup>, масову витрату, із якою газ витікає крізь отвір і надходить у приміщення, можна розрахувати за формулу  $\frac{P_{\text{сис}}}{P_{\text{атм}}} < 2$

- якщо режим витікання є докритичним ( $\frac{P_{\text{сис}}}{P_{\text{атм}}} < 2$ ) —

$$g_{\text{г}}^{\text{надх}} = K_{\text{отв}} S_{\text{отв}} P_{\text{сис}} \sqrt{\frac{1}{R_{\text{пит}} T} \cdot \frac{2k}{k-1} \left[ \left( \frac{P_{\text{атм}}}{P_{\text{сис}}} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{P_{\text{атм}}}{P_{\text{сис}}} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \quad (6)$$

- якщо режим витікання є критичним ( $\frac{P_{\text{сис}}}{P_{\text{атм}}} > 2$ ) —

$$g_{\text{г}}^{\text{надх}} = K_{\text{отв}} S_{\text{отв}} P_{\text{сис}} \sqrt{\frac{1}{R_{\text{пит}} T} \cdot \frac{2k}{k+1} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}}} \quad (7)$$

де:  $K_{\text{отв}}$  — коефіцієнт опору отвору, через який надходить газ (зазвичай  $K_{\text{отв}} = 0,64$ );

$k$  — коефіцієнт адіабати горючого газу;

$P_{\text{сис}}$  — тиск у системі подачі газу, який є більшим за тиск середовища, у яке відбувається витікання, Па;

$P_{\text{атм}}$  — тиск у середовищі, у яке відбувається витікання газу, Па;

$S_{\text{отв}}$  — площа отвору, через який витікає газ, м<sup>2</sup>;

$T$  — температура газу, К;

$R_{\text{пит}}$  — питома газова стала, Дж·кг<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>.

Отже, час, за який середня фактична концентрація газу, що утворилася у приміщенні внаслідок аварійного натікання й відсутності газообміну із навколишнім середовищем, досягне значення нижньої концентраційної межі поширення полум'я, можна визначити за формулою:

$$\tau_{\text{нкмш}} = \frac{m_{\text{г}}}{g_{\text{г}}^{\text{надх}}} = \frac{V_{\text{вильн}} \phi'_{\text{н}}}{g_{\text{г}}^{\text{надх}}}, \text{ с} \quad (8)$$

де:  $\phi'_{\text{н}}$  — масова нижня концентраційна межа поширення полум'я горючого газу, кг·м<sup>-3</sup>.

Рівняння матеріального балансу горючого газу, який виходить у навколишнє середовище, можна виразити диференціальним рівнянням:

$$\frac{dm_{\text{г}}}{dt} = V_{\text{вильн}} \frac{d\phi'_{\text{г}}}{dt} = g_{\text{г}}^{\text{надх}} - g_{\text{гс}}^{\text{вит}} \frac{\phi'_{\text{г}}}{\rho_{\text{гс}}} \quad (9)$$

де:  $\phi'_{\text{г}}$  — середня масова концентрація газу в приміщенні на момент часу  $t$ , кг·м<sup>-3</sup>;

$g_{\text{гс}}^{\text{вит}}$  — масова витрата, із якою суміш повітря та горючого газу витікає із приміщення крізь отвори (розраховують залежно від схеми газообміну), кг·с<sup>-1</sup>;

$\rho_{\text{гс}}$  — густина газоповітряної суміші за даних умов, кг·м<sup>-3</sup>.

<sup>1</sup> Рябова І. Б., Сайчук І. В., Шаршанов А. Я. Термодинаміка і теплопередача у пожежній справі : навч. посіб. Харків, 2002. 356 с.

Масову витрату, із якою газова суміш витікає крізь отвори приміщення, можна розрахувати за формулою:

- якщо отвори розташовані на одному рівні —

$$g_{\text{Гс}}^{\text{Вит}} = \frac{2}{3} K_{\text{отв}} S_{\text{отв}} \sqrt{\frac{2gh_{\text{отв}} \rho_{\text{пов}} \rho_{\text{пг}} (\rho_{\text{пов}} - \rho_{\text{пг}})}{(\rho_{\text{пов}}^{0,33} + \rho_{\text{пг}}^{0,33})^3}}, \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (10)$$

- якщо отвори розташовані на різних рівнях —

$$g_{\text{Гс}}^{\text{Вит}} = K_{\text{отв}} S_{\text{прип}} S_{\text{вит}} \sqrt{\frac{2gHg_{\text{пов}} \rho_{\text{пг}} (\rho_{\text{пов}} - \rho_{\text{пг}})}{\rho_{\text{пов}} S_{\text{прип}}^2 + \rho_{\text{пг}} S_{\text{вит}}^2}}, \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (11)$$

де:  $K_{\text{отв}}$  — коефіцієнт витрати отвору, який враховує втрати кінетичної енергії газового потоку під час його проходження крізь отвори за рахунок тертя, завихрення тощо, і залежить від форми отвору й товщини стінок (для віконних та дверних отворів приймають рівним 0,6÷0,65);

$S_{\text{прип}}$  — площа отвору, що працює на приплив повітря;

$S_{\text{вит}}$  — площа витяжного отвору;

$g$  — прискорення вільного падіння;

$H$  — відстань між центрами припливного й витяжного отворів;

$\rho_{\text{пов}}$  — густина повітря ззовні приміщення;

$\rho_{\text{пг}}$  — густина газового середовища в приміщенні.

Розв'язання рівняння матеріального балансу дає змогу визначити масу газу, що накопичується в приміщенні за певний час розвитку аварійної ситуації, з урахуванням газообміну із навколишнім середовищем:

$$m_{\text{Г}} = \frac{g_{\text{Г}}^{\text{Надх}} \rho_{\text{Гс}} V_{\text{Вільн}}}{g_{\text{Гс}}^{\text{Вит}}} \left( 1 - e^{-\frac{g_{\text{Гс}}^{\text{Вит}} \tau}{\rho_{\text{Гс}} V_{\text{Вільн}}}} \right), \text{ кг}. \quad (12)$$

де:  $K_{\text{отв}}$  — коефіцієнт витрати отвору, який враховує втрати кінетичної енергії газового потоку під час його проходження крізь отвори за рахунок тертя, завихрення тощо, і залежить від форми отвору й товщини стінок (для віконних та дверних отворів приймають рівним 0,6÷0,65);

$S_{\text{прип}}$  — площа отвору, що працює на приплив повітря;

$S_{\text{вит}}$  — площа витяжного отвору;

$g$  — прискорення вільного падіння;

$H$  — відстань між центрами припливного й витяжного отворів;

$\rho_{\text{пов}}$  — густина повітря ззовні приміщення;

$\rho_{\text{пг}}$  — густина газового середовища в приміщенні.

Вирішення рівняння у межах  $\tau = 0$ ,  $\varphi_{\text{Г}} = 0$  та  $\tau = \tau_{\text{НКМП}}$ ,  $\varphi_{\text{Г}} = \varphi_{\text{н}}$  дає змогу розрахувати час, за який середня концентрація горючого газу в вільному об'ємі приміщення досягне значення нижньої концентраційної межі поширення полум'я, з урахуванням часткового витоку горючого газу крізь отвори приміщення в процесі його аварійного надходження:

$$\tau_{\text{нкмш}} = \frac{V_{\text{вильн}} \rho_{\text{гс}}}{g_{\text{гс}}} \ln \frac{g_{\text{г}}^{\text{надх}}}{g_{\text{г}}^{\text{надх}} - \frac{g_{\text{гс}}^{\text{виг}} \Phi_{\text{н}}'}{\rho_{\text{г}}}}, \text{ с.} \quad (13)$$

За певний час витоку горючого газу нижньої концентраційної межі поширення полум'я можна досягти тільки в деякій частині приміщення. Створюється так звана зона вибухонебезпечної загазованості. Радіус зони вибухонебезпечної загазованості визначають так:

$$R_{\text{заг}} = 1,1314 L \sqrt{\ln \left( \frac{1,38 \varphi_0}{\varphi_{\text{н}}} \right)}, \text{ м,} \quad (14)$$

де:  $L$  — довжина приміщення, м;

$\varphi_{\text{н}}$  — об'ємна нижня концентраційна межа поширення полум'я горючого газу, %;

$\varphi_0$  — передекспоненціальний множник, який визначають за емпіричними формулами:

• у нерухомому середовищі —

$$\varphi_0 = 3,77 \cdot 10^3 \frac{m_{\text{г}}}{\rho_{\text{г}} V_{\text{вильн}}}, \text{ \%}; \quad (15)$$

• у рухомому середовищі ( $v_{\text{пов}} > 0,1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ ) —

$$\varphi_0 = 300 \frac{m_{\text{г}}}{\rho_{\text{г}} V_{\text{вильн}} v_{\text{пов}}}, \text{ \%}, \quad (16)$$

де:  $v_{\text{пов}}$  — швидкість руху повітря в приміщенні,  $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Час, за який вибухопожежонебезпечна суміш досягне потенційного джерела запалювання (наприклад, електричного вимикача, установки з відкритим полум'ям тощо), можна розрахувати за формулами (за відсутності руху повітряних потоків):

• у нерухомому середовищі —

$$\tau = 1,92 \cdot 10^{-4} \frac{\rho_{\text{г}} V_{\text{вильн}} \varphi_{\text{н}}}{g_{\text{г}}^{\text{надх}}} e^{\left( \frac{R}{1,1314 L} \right)^2}, \text{ с,} \quad (17)$$

• у рухомому середовищі —

$$\tau = 2,4 \cdot 10^{-3} \frac{\rho_{\text{г}} V_{\text{вильн}} v_{\text{пов}} \varphi_{\text{н}}}{g_{\text{г}}^{\text{надх}}} e^{\left( \frac{R}{1,1314 L} \right)^2}, \text{ с,} \quad (18)$$

де:  $R$  — відстань від джерела витікання газу до ймовірного джерела запалювання, м.

Дослідження аварій на виробництві внаслідок вибухів в обладнанні, що перебувало під тиском (із метою встановити ймовірну причину їх виникнення), — є одним з головних завдань, покладених на дослідження техногенних вибухів (це зумовлено можливістю виникнення такого фізичного

явища, як розпад газодинамічного розриву). Унаслідок вивільнення енергії, яка накопичується під час стиснення газів, ємність розривається на окремі фрагменти. Як відомо <sup>1</sup>, під час довільного розпаду газодинамічного розриву можливі три ситуації, які докладно розглянуто далі.

*Перша ситуація* — газодинамічний розрив розпадається на дві хвилі, що поширюються врізнобіч від початкового розриву й на контактний розрив. Така ситуація може виникнути під час зіткнення двох мас газу, які рухаються назустріч одна одній зі значною швидкістю, якщо виконано умову <sup>2</sup>:

$$u_1 - u_2 > (P_2 - P_1) \sqrt{\frac{2/\rho_1}{P_1(\gamma_1 - 1) + P_2(\gamma_1 + 1)}}, \quad (19)$$

де:  $P_1, P_2$  — тиск газових середовищ (тиск першого газового середовища  $P_1$  менший за тиск другого газового середовища  $P_2$ );

$u_1, u_2$  — швидкість руху газів першого та другого середовищ;

$\rho_1$  — густина газу першого середовища;

$\gamma_1$  — коефіцієнт адиабати першого газового середовища.

На практиці подібні події можуть виникати на виробничих установках та обладнанні внаслідок порушення умов ведення технологічних процесів. Так, одним з етапів встановлення причини виникнення вибуху за наведених обставин є дослідження роботи технологічної автоматики.

*Друга ситуація* — це коли розрив розпадається на дві окремі хвилі розрідження, що рухаються в протилежні боки й на контактний розрив. Так, на практиці згадана вище ситуація реалізується під час руйнування оболонки ємності з наступним зіткненням газів. Варто зауважити, що це найбільш типовий сценарій розвитку аварійного вибуху ємностей під тиском як з горючими, так і з негорючими речовинами, який реалізується за такої умови <sup>3</sup>:

$$\frac{2c_{s2}}{\gamma_2 - 1} \left(1 - \frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{\gamma_2 - 1}{2\gamma_2}} < u_1 - u_2 < (P_2 - P_1) \sqrt{\frac{2/\rho_1}{P_1(\gamma_1 - 1) + P_2(\gamma_1 + 1)}}, \quad (20)$$

де:  $\gamma_2$  — коефіцієнт адиабати другого газового середовища;

$c_{s2}$  — швидкість поширення звуку в другому газовому середовищі.

Так, руйнування ємностей, що перебувають під тиском, де міститься скраплений газ або легкокиплячі рідини, також супроводжується виникненням зовні повітряної хвилі й потраплянням усередину ємності хвилі розрідження. Це явище викликає скипання рідкої фази в ємності й інтенсивне пароутворення. Під час описаного процесу, тобто вивільнення енергії фазового переходу й енергії, що накопичилася через стиснення речовини, стінки оболонки ємності руйнуються з можливим розльотом осколків на значні відстані.

<sup>1</sup> Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. И., Либрович В. Б., Махвиладзе Г. М. Математическая теория горения и взрыва : монография. Москва, 1980. 492 с.

<sup>2</sup> Таубкин С. И. Указ. соч.

<sup>3</sup> Там же.



Третя ситуація — це коли газодинамічний розрив розпадається на дві окремі хвилі розрідження (їх поширення відбувається у протилежні боки). Завдяки цьому відбувається розліт газів. За доволі значної швидкості розльоту тиск у хвилях розрідження падає до 0, а на місці довільного розриву виникає область без газу, яка розширюється,— вакуум.

Так, розрив ємності зі стиснутими газами й легкокиплячими рідинами в осередковій зоні пожежі називається *BLEVE* (*Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion*, тобто вибух парів, що розширюються під час скипання рідини).

Досліджуючи версію виникнення фізичного або комбінованого вибуху, зумовлених *BLEVE*, зазвичай визначають потенційну можливість такого явища для конкретної речовини, що перебувала в ємності. Для цього розраховують частку речовини, що миттєво випаровується за заданої температури, за формулою:

$$\xi_T = \frac{H_T - H_{T_{\text{кип}}}}{\Delta H_{\text{вип}}} = \frac{c_p (T - T_{\text{кип}})}{\Delta H_{\text{вип}}} \quad (21)$$

де:  $\xi_T$  — частка рідини, що миттєво випаровується за температури  $T$ ;

$H_T$  — питома ентальпія рідини за температури  $T$ ;

$H_{T_{\text{кип}}}$  — питома ентальпія рідини за температури  $T_{\text{кип}}$  за атмосферного тиску;

$\Delta H_{\text{вип}}$  — питома теплота випаровування в точці кипіння за атмосферного тиску;

$c_p$  — питома теплоємність рідкої фази;

$T_{\text{кип}}$  — температура кипіння речовини за атмосферного тиску;

$T$  — температура рідкої фази (за наявності в ємності запобіжного пристрою величину  $T$  визначають за формулою:

$$T = \frac{B}{A - \lg P_k} - C_A + 273 \quad , K \quad (22)$$

де:  $P_k$  — тиск спрацювання запобіжного пристрою;

$A, B, C_A$  — константи Антуана (їх визначають за довідниковою літературою).

Якщо  $\xi < 0,35$ , то *BLEVE* не виникає. За  $\xi > 0,35$  імовірність виникнення цього явища є значною.

Потужність вибуху ємності з перегрітими легкозаймистими й горючими рідинами або зрідженими вуглеводневими газами визначають тритиловим еквівалентом, а ступінь руйнування конструкцій об'єкта зумовлено надлишковим тиском  $\Delta P$  та імпульсом  $i$  вибуху, які можна розрахувати за формулами:

$$\Delta P = P_0 \left( 0,8 \frac{m_{\text{пр}}^{0,33}}{r} + 3 \frac{m_{\text{пр}}^{0,66}}{r^2} + 5 \frac{m_{\text{пр}}}{r^3} \right) \quad \text{кПа}, \quad (23)$$

$$i = 123 \frac{m_{\text{пр}}^{0.66}}{r}, \quad (24)$$

де:  $P_0$  — атмосферний тиск, кПа;

$r$  — відстань від центра ємності, м;

$m_{\text{пр}}$  — приведена маса або тротиловий еквівалент вибуху (маса тринітротолуолу, що викликає подібний ступінь руйнування), кг;

$Q_{\text{ТНТ}} = 4,52 \cdot 10^6 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$  — теплота вибуху тринітротолуолу;

$E_{\text{еф}}$  — ефективна енергія вибуху під час розширення середовища, яке перебуває в ємності та яку розраховують за формулою:

$$E_{\text{еф}} = V \frac{P_p - P_0}{\gamma - 1}, \quad (25)$$

де:  $\gamma$  — коефіцієнт адиабати газового середовища, що розширяється;

$V$  — об'єм резервуара, що руйнується;

$P_p$  — тиск, за якого руйнується резервуар<sup>1</sup>.

Отже, наведені вище розрахунки дають змогу проаналізувати, як відбуваються вибухи в конкретних ситуаціях, і визначити механізм їх виникнення під час виконання судових експертиз дослідження обставин і механізму техногенних вибухів.

**Висновки.** У роботі наведено основні методи дослідження техногенних вибухів на відкритій місцевості, у приміщеннях і в обмеженому об'ємі. Варто відзначити, що в експертній практиці дослідження техногенних вибухів фахівці часто стикаються з неоднозначними ситуаціями механізму виникнення й розвитку таких вибухів. Наведений повний і всебічний аналіз імовірних обставин розвитку аварійної ситуації із застосуванням розрахункових методів дає змогу вирішити цю проблему й у стислі терміни провести відповідні дослідження.

### References

- Brushlinskii, N. N., Korolchenko, A. IA. (2000). *Modelirovanie pozharov i vzryvov*. Moskva [in Russian].
- Piliugin, L. P. (2010). *Prognozirovanie posledstviivnutrennikh avariinykh vzryvov*. Moskva [in Russian].
- Riabova, I. B., Saichuk, I. V., Sharshanov, A. Ya. (2002). *Termodinamika i teploperedacha u pozhezhnii spravi* : navch. posib. Kharkiv [in Ukrainian].
- Tarakhno, O. V., Syrykh, V. M., Tarakhno, R. V. (2010). Ekspertne doslidzhennia versii vynykennia vybukhu hazopovitrianoi sumishi u prymishchenni. *Problemy pozharnoi bezopasnosti* : sb. nauch. tr. Kharkov. Vyp. 27 [in Ukrainian].
- Tarakhno, O. V., Syrykh, V. M., Tarakhno, R. V. (2009). Problemni pytannia doslidzhennia vybukhiv hazopovitrianykh sumishei pry provedenni pozhezho-tekhnichnykh ekspertyz. *Problemy pozharnoi bezopasnosti* : sb. nauch. tr. Kharkov. Vyp. 25 [in Ukrainian].
- Taubkin, I. S. (2009). *Sudebnaia ehkspertiza tekhnogennykh vzryvov. Organizatsionnye, metodicheskie i pravovye osnovy*. Moskva [in Russian]

<sup>1</sup> Таубкин С. И. Указ. соч.

Taubkin, S. I. (1999). *Pozhar i vzryv, osobennosti ikh ehkspertizy*. Moskva [in Russian].  
Zeldovich, I.A. B., Barenblatt, G. I., Librovich, V. B., Makhviladze, G. M. (1980). *Matematicheskaiia teoriia goreniiia i vzryva* : monografiia. Moskva [in Russian].

**Р. Н. Гусейнов, Ю. В. Панчук**

### **Основные расчётные методы исследования обстоятельств и механизма техногенных взрывов**

*Цель данной статьи — проанализировать опасность техногенных взрывов и привести расчётные методы исследования для установления механизма их возникновения при проведении судебных экспертиз исследования обстоятельств и механизма техногенных взрывов.*

*Актуальность данной работы обусловлена тем, что современное производство и быт не могут обходиться без использования горючих и взрывоопасных веществ. При этом особое внимание следует уделять предупреждению чрезвычайных ситуаций, связанных со взрывами, а также проведению исследований по определению механизма возникновения техногенных взрывов. Исследования механизма возникновения техногенных взрывов позволят установить техническую причину их возникновения, проанализировать, по какой причине и по чьей вине наступило данное событие, а также какие меры следует предпринимать для минимизации вероятности возникновения подобных ситуаций.*

*Отмечено, что для получения достоверных выводов о механизме возникновения техногенных взрывов необходимо использовать научно обоснованные методы и методики, позволяющие оценить масштабы разрушения. Степень разрушения окружающих строительных конструкций и поражения людей зависит от избыточного давления, создаваемого в результате значительного расширения продуктов взрыва и распространения во все стороны от эпицентра. На взрывоопасных объектах причинами взрывов чаще всего являются: разрушение и повреждение производственных резервуаров, оборудования и трубопроводов; отклонение от технологического регламента (превышение давления и температурного режима работы оборудования), некачественный контроль за оборудованием и работой при проведении необходимых работ, а также несвоевременное или некачественное технологическое обслуживание оборудования.*

*Приведены основные расчётные методы исследования техногенных взрывов на открытой местности, в помещениях и ограниченном объёме, что позволит систематизировать процесс исследования и проанализировать протекание взрывов в конкретных ситуациях, а также установить механизм их возникновения при проведении судебных экспертиз исследования обстоятельств и механизма техногенных взрывов.*

**Ключевые слова:** *взрывчатое вещество, газопаровоздушная смесь, концентрационные пределы распространения пламени, чрезвычайная ситуация, избыточное давление, техногенный взрыв.*

*R. Huseinov, Yu. Panchuk*

**Basic calculation methods of investigation of circumstances and mechanism of man-made explosions**

*The article purpose is to analyze the danger of man-made explosions and provide calculation methods for determining the mechanism of the occurrence of an explosion during forensic examinations of the study of the circumstances and mechanism of man-made explosions.*

*The relevance of the article is caused by the fact that present-day production and everyday life cannot dispense with the usage of combustible and explosive substances. The particular attention to be paid to emergency prevention related to explosives, as well as the research to determine the mechanism of man-made explosions. The research on the mechanism of man-made explosions will make it possible to determine the technical cause of their occurrence, to analyze for what reason and for whose fault the event occurred, and also what measures should be taken to minimize the likelihood of such situations occurrence.*

*It is noted that in order to obtain reliable conclusions about the mechanism of man-made explosions, it is necessary to use scientifically based methods and methodologies allowing us to assess the extent of destruction. The degree of destruction of surrounding building structures and harm to people depends on overpressure caused as the result of a significant expansion of the explosion products and their spread to all directions from the center of explosion. The most frequent causes of explosions in the explosive object are: destruction and damage to production tanks, equipment and pipelines; deviation from production regulations (excess pressure and temperature of equipment operating mode), low-quality control of equipment and work while conducting require work, and untimely or poor-quality maintenance of technological equipment.*

*The main calculation methods for the research of the man-made explosions in open areas, indoors, and limited space are given, which will allow to systematize the research process and analyze the flow of explosions in specific situations, and to establish a mechanism for their occurrence when conducting forensic examinations of the circumstances and mechanism of man-made explosions.*

**Keywords:** *explosive, gas-vapor mixture, concentration limits for flame propagation, emergency situation, overpressure, man-made explosion.*

*Надійшла до редколегії 31.03.2021 р.*

Гусейнов Р. Н., Панчук Ю. В. Основні розрахункові методи дослідження обставин і механізму техногенних вибухів. *Теорія та практика судової експертизи і криміналістики* : зб. наук. пр. / редкол.: О. М. Ключев, В. Ю. Шепітько та ін. Харків : Право, 2021. Вип. 23. С. 258—269. DOI: <https://doi.org/10.32353/khrife.1.2021.20>.