

Крім цього, як відомо, на території України є дуже багато підприємств зі своїми особливостями виробництва, тому, на наш погляд, актуальним є розробка методик (або універсальної) з конкретними прикладами та рекомендаціями щодо їх складання для різних видів об'єктів господарювання (потенційно небезпечних, підвищеної небезпеки тощо).

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Організація управління цивільним захистом на підприємствах, в установах та організаціях: навч. посіб. / О.Д.Гудович, І.Н.Ісмагілов, С.П.Потеряйко [та ін.]. – К.: ІДУЦЗ, 2011. – 537с.
2. Левчук К.О. Цивільний захист: навч. посіб. / К.О.Левчук, Р.Я.Романюк, А.О.Толок. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2016. – 325с.
3. Кодекс цивільного захисту України. – Відомості Верховної Ради, 2013. – № 34–35. – ст.458.
4. Методичні рекомендації щодо розроблення планів з питань цивільного захисту. – К.: ДСНС, УНДЦЗ, 2015. – 148с.
5. Стеблюк М.І. Цивільна оборона і цивільний захист / М.І.Стеблюк. – К.: Знання, 2010. – 487с.
6. Порядок розроблення планів діяльності єдиної державної системи цивільного захисту. Затверджено постановою Кабінету Міністрів України від 9 серпня 2017 р. № 626 [Ел. ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/626-2017-п>.

*Надійшла до редколегії 24.09.2018.*

УДК 629.039.58

DOI 10.31319/2519-2884.33.2018.209

МАХОВСЬКИЙ В.О., к.т.н, доцент  
КРЮКОВСЬКА О.А., к.т.н, доцент

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

### **АНАЛІЗ ТА ОБГРУНТУВАННЯ ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ І МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ РИЗИКІВ АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЙ НА АВТОЗАПРАВНИХ СТАНЦІЯХ**

**Вступ.** До аварій на промислових і інших об'єктах призводить відмова – подія, що полягає в порушенні працездатного стану обладнання, об'єкта. До однієї і тієї ж аварійної ситуації можуть призвести різні види відмов, і одна і та ж відмова може призвести до різних аварійних ситуацій. У свою чергу аварійна ситуація – це поєднання умов або обставин, поява яких може призвести до виникнення факторів ризику – причин, рушійних сил, що негативно впливають на різних реципієнтів. Кожна ситуація може призвести як до одного фактора ризику, так і до декількох відразу, які, у свою чергу, можуть призводити до виникнення одного або декількох видів ризику залежно від характеру збитку, що завдається.

Причина аварійної ситуації – відмова (накопичення одиничних відмов), ініціююча подію – розвиток аварії. Оцінки сучасних хімічних виробництв дають показник вірогідності аварії  $10^{-3}$ , тобто є великі потенційні технічні можливості для управління ризиком до стану фактичної надійності об'єктів і оснащення їх засобами контролю, діагностики і аварійного захисту.

Небезпеки автозаправних станцій (АЗС) обумовлені наявністю усередині обладнання і трубопроводів дизельного палива, бензину.

При аналізі небезпек на АЗС виконуються теплофізичні, теплові і термодинамічні розрахунки з використанням загальноприйнятих методів. Вибір методів аналізу небезпек і ризику визначається цілями, завданнями аналізу і можливостями виконавців.

**Постановка задачі.** Провести дослідження, проаналізувати та обґрунтувати фізико-математичні моделі і оцінити ступінь ризику, що виникає в ході конкретної діяльності на АЗС.

**Результати роботи.** Основними критеріями, за якими можна визначати, виходячи з конкретних характеристик хіміко-технологічної системи АЗС, шляхи розвитку аварії є наступні.

1. Критерій виникнення руйнуючих вибухів – наявність необмежених газопароповітряних хмар при розливі палива масою  $> 2$  т.

2. Критерій утворення пожеж:

а) рідини, у яких температура спалаху набагато вища від температури навколишнього середовища, а тиск парів низький, не запалюються від близьких джерел і можуть не спалахнути при короткочасному впливі полум'я;

б) рідини з високою температурою спалаху, у яких для досягнення нижньої концентраційної межі розповсюдження полум'я (НКМРП) необхідно підвести додаткове тепло, не запалюються від близьких джерел, але загоряються при короткочасному впливі полум'я і можуть горіти в самопідтримувальному полум'ї;

в) рідини з температурою спалаху, що дорівнює або нижчою від температури навколишнього середовища, а тиск насичених парів такий, що концентрація над поверхнею знаходиться в межах НКМРП – ВКМРП (нижньої, верхньої концентраційної межі розповсюдження полум'я), запалюються від розташованих поруч джерел і швидко утворюють самопідтримувальне полум'я розлиття. Відстань між джерелом, здатним запалити хмару і джерелом розлиття, залежить не тільки від властивостей хмари, але і від швидкості вітру. При певних умовах можливо утворення „пожежі спалаху” або „пожежі хмари”;

г) рідини, для яких при температурі навколишнього середовища тиск насичених парів знаходиться між значенням, відповідним НКМРП, і атмосферним тиском, запалюються від розташованого поруч джерела з утворенням „пожежі спалаху” і подальшою самопідтримувальною пожежею розлиття.

3. Вибухи киплячих рідин, що виділяють пар (вогняна куля):

а) може виникнути всередині резервуара, в якому зберігається речовина при температурі, що перевищує точку її кипіння при атмосферному тиску. При руйнуванні резервуара внаслідок послаблення конструкції його вміст викидається назовні у вигляді турбулентної рідини і газу, що швидко розширюється, зміщується з повітрям, утворює хмару.

При аналізі наслідків аварій використовувалась модель руйнування ємності під тиском. Вважається, що всі ємності є рівновитривалими оболонками з еквівалентним радіусом  $R = \sqrt{3V/4\pi}$ , де  $V$  – об'єм ємності.

При підвищенні тиску вище від розрахункового відбувається миттєве руйнування оболонки з формуванням ударної хвилі.

Тиск у фронті повітряної ударної хвилі в момент руйнування визначається з наступним визначенням тиску у фронті розповсюдження ударної хвилі на вибраній відстані від епіцентру вибуху:

$$\frac{P_1}{P_0} = \frac{P_{so}}{P_0} \left[ 1 - \frac{(y-1)(\alpha_0/\alpha_1)(P_{so}/P_0 - 1)}{\sqrt{2y[2y_0 + (y+1)(P_{so}/P_0 - 1)]}} \right]^{2y/y-1},$$

де  $P_1/P_0$  – безрозмірний тиск у сфері;

$P_{so}/P_o$  – безрозмірний тиск у повітряній ударній хвилі в момент вибуху;

$u$  – відношення теплоємності у джерелі вибуху;

$\alpha_0$  – швидкість звуку в навколишньому середовищі;

$\alpha_1$  – швидкість звуку в джерелі вибуху.

б) вибух газопароповітряних хмар у відкритому просторі. Використовувались наступні дані:

$$\Delta P = 80.8/R + 222/R^2 + 121/R^3, \quad R = r/C_T^{1/3},$$

де  $r$  – відстань від епіцентру вибуху до розглядуваного об'єкта;

$C_T$  – тротиловий еквівалент.

Повне руйнування обладнання і споруд можливе при надлишковому тиску у фронті ударної хвилі 100 кПа і більше. Руйнування, що виникають, можуть призвести до розвитку аварії за принципом „доміно” і переходу аварії на більш високий рівень. Руйнування несучих конструкцій будинків, споруд можливе при надлишковому тиску у фронті ударної хвилі 50 кПа і більше. Руйнування стін дерев'яних каркасних споруд можливе при надлишковому тиску у фронті ударної хвилі 28 кПа і більше. Руйнування найменш тривких споруд (наприклад, дерев'яних і металевих складів – навісів), покрівель будинків відбувається при надлишковому тиску у фронті ударної хвилі 14 кПа і більше. При надлишковому тиску менше 2-5 кПа можливе руйнування скління вікон.

в) спалювання змішаних газових і парових хмар, спалювання незмішаних газопароповітряних хмар (вогняні кулі), пожежі розливів.

При спалюванні газопароповітряних хмар в дефлеграційному режимі (без утворення значного надлишкового тиску у відкритому просторі) можливе горіння хмари з утворенням спливаючої вогняної кулі, горіння проливу горючих рідин. Основними чинниками, що уражають, є температурний вплив полум'я на людей, об'єкти і матеріали на протязі ефективного часу експозиції.

У тих випадках, коли при горінні змішаних газових і парових хмар перехід в детонацію неможливий, формування небезпечних ударних хвиль не відбувається, але є небезпека ураження тепловим випромінюванням і гарячими продуктами спалювання при їхньому розширенні.

Максимальний радіус простору, займаного гарячими продуктами, прийнятий як

$$r_{max} = 2r_0,$$

де  $r_0$  – початковий радіус газопароповітряної хмари стехіометричного складу.

При впливі теплового випромінювання ефективний час експозиції визначається для горіння проливу:

$$t = t_0 + X/U$$

де  $t_0$  – характерний час виникнення пожежі;

$X$  – відстань від місця розташування людини до зони, де інтенсивність теплового випромінювання не перевищує 4 кВт/м<sup>2</sup>;

$U$  – швидкість руху людини (приймається 5 м/с).

Граничними параметрами для можливого ураження людей при пожежах приймаються:

Ступінь травмування	Доза теплового випромінювання, кДж/м <sup>2</sup>
Опіки III ступеня	120
Опіки II ступеня	220
Опіки I ступеня	320

Можлива вибухонебезпечна зона (МВЗ) – це гіпотетична максимально можлива просторова зона, всередині якої під час виникнення або розвитку великої аварії можливе існування горючих газів або парів при концентраціях, що перевищують концентрацію на нижній межі розповсюдження полум'я. На практиці час формування МВЗ обмежений часом зустрічі хмари горючих газів або парів з джерелом запалювання. Якщо джерело запалювання з'являється на ранній стадії формування вибухонебезпечної хмари, то небезпека характеризується детонаційним спалахом і вогняною кулею, для яких можлива кількісна оцінка наслідків.

На більш пізніх етапах розвитку хмари, коли знижується початкова турбулентність хмари і відбувається її розмивання за рахунок атмосферних процесів, більш імовірними стають режими без формування сильних ударних хвиль. При цьому можливе ураження людей, які знаходяться безпосередньо в МВЗ, за рахунок термічного впливу полум'я і руйнування будинків і приміщень внаслідок внутрішніх вибухів.

Виникнення ударних хвиль різноманітної інтенсивності на пізніх етапах розвитку хмари можливе тільки при попаданні у МВЗ споруд, на яких утворюється сильна турбулізація полум'я. Однак, як правило, можна вважати, що спалювання горючої речовини на даху високих тисків вибуху і не призведе до руйнування будівель, споруд, установок, які знаходяться поза хмарою.

МВЗ визначається розрахунковим шляхом за моделлю розсіювання нейтрального газу без врахування сили тяжіння. Оцінки проводяться при наступних умовах: інверсія, літо, наземний викид, швидкість вітру – 1 м/с, ландшафт – індустріальний район з невеликими перешкодами. Зони зображуються у вигляді кіл з центром у місці викиду і радіусом, що дорівнює відстані від точки викиду до точки на рівні землі, де розрахункова концентрація стає рівною нижній концентраційній межі розповсюдження полум'я.

При оцінці ризику, що виникає в ході конкретної діяльності на АЗС, оцінювалися величини наслідків, а також вірогідності того, що вони відбудуться. Факторами, які грають важливу роль в таких оцінках, є ступінь дії, її тривалість, характеристики речовин, розмір області і присутність людей, тварин, рослин, майна, а також природа шкідливих дій.

Наслідки викиду небезпечних речовин (бензин, дизельне паливо) визначалися в три етапи: 1) визначення потужності і швидкості викиду; 2) визначення умов розливу нафтопродуктів в кожній конкретній ситуації; 3) визначення ступеня дії наслідків аварії.

Для аналізу наслідків розглядалися моделі для розрахунку: викидів нафтопродуктів; порушень герметичності резервуарів; витоки з трубопроводу; викид без вибуху і з вибухом; випаровування з поверхні рідини і т.п.; забруднення води; забруднення ґрунту і продовольства; теплового випромінювання; вибухів; збитку для здоров'я населення; довгострокової і короткострокової токсичності (для факторів з пороговою і безпороговою дією, облік адитивності, синергізму, фармакінетики).

Оцінка ризику включала оцінку вірогідності події в поєднанні з аналізом наслідків аварійних ситуацій, можливих на об'єкті. Основні задачі етапу оцінки ризику були пов'язані з:

- 1) визначенням частот виникнення ініціюючих і всіх небажаних подій;
- 2) оцінкою наслідків виникнення небажаних подій;
- 3) узагальненням оцінок ризику.

Для визначення частоти небажаних подій використовувалися:

- статистичні дані з аварійності і надійності технологічної системи, відповідні до специфіки небезпечного виробничого об'єкта (АЗС) або виду діяльності (тобто використовувати існуючі відомості про аварії на автозаправних станціях або відмовах систем);
- аналіз протікання аварії з метою визначення необхідної вірогідності;
- логічні методи аналізу „дерев подій”, „дерев відмов”, імітаційні моделі виникнення аварій в людино-машинній системі;

- експертні оцінки шляхом врахування думки фахівців в даній галузі.

Оцінка наслідків включала аналіз можливих дій на людей, майно і (або) навколишнє середовище. Для оцінки наслідків оцінювалися фізичні ефекти небажаних подій (відмови, руйнування технічних пристроїв, будівель, споруд, пожежі, вибухи, викиди токсичних речовин і т.д.), уточнювалися об'єкти, які можуть бути піддані небезпеці. При аналізі наслідків аварій використовувалися моделі аварійних процесів і критерії ураження, руйнування об'єктів дії, що вивчаються, враховувалися обмеження вживаних моделей. Було також враховано і виявлено зв'язок масштабів наслідків аварій з частотою їх виникнення.

Узагальнена оцінка ризику (або ступінь ризику) аварій відображає стан промислової безпеки з урахуванням показників ризику від всіх небажаних подій, які можуть відбутися на небезпечному виробничому об'єкті, і ґрунтується на результатах інтеграції показників ризиків всіх небажаних подій (сценаріїв аварій) з урахуванням їх взаємного впливу, аналізу невизначеності і точності одержаних результатів та аналізу відповідності умов експлуатації вимогам промислової безпеки і критеріям прийняттого ризику.

При узагальненні оцінок ризику проаналізовано невизначеність і точність одержаних результатів. Як правило, основними джерелами невизначеностей є неповнота інформації по надійності обладнання і людські помилки, припущення і допущення моделей аварійного процесу, що використовуються. Джерела невизначеності були ідентифіковані (наприклад, „людський чинник”) і оцінені.

Практика показує, що крупні аварії, як правило, характеризуються комбінацією випадкових подій, що виникають з різною частотою на різних стадіях виникнення і розвитку аварії (відмови обладнання, помилки людини, непередбачувані зовнішні дії, руйнування, викид, проливи речовини, розсіяння речовин, запалювання, вибух, інтоксикація і т.д.). Для виявлення причинно-наслідкових зв'язків між цими подіями використовувалися логіко-графічні методи аналізу „дерев відмов” і „дерев подій” [1].

Аналіз дерева помилок – алгоритм побудови послідовностей подій, що призводять до основної події, – дозволив обчислити вірогідність основної події, виходячи з вірогідності елементарних подій. При аналізі „дерева відмов” (АДВ) виявлено комбінації відмов (неполадок) обладнання, інцидентів, помилок персоналу і непередбачуваних зовнішніх (техногенних, природних) дій, що призводять до головної події (аварійної ситуації). Метод використано для аналізу можливих причин виникнення аварійної ситуації і розрахунку її частоти (на основі знання частот вихідних подій).

При аналізі дерева відмови (аварії) визначено мінімальні поєднання подій, які сприяють виникненню або неможливості виникнення аварії. Аналіз „дерева подій” (АДП) – алгоритм побудови послідовності подій, що витікають з основної події (аварійної ситуації). Дерево неполадок саме по собі не є ні мірою ризику, ні мірою небезпеки. Аналіз дерева неполадок – алгоритм (набір формальних правил), що призводить до „основної події” (табл.1).

Методологія прогнозу ризику, обумовленого порушенням функціонування систем, включає алгоритми побудови (можливих послідовностей подій, що призводять до небажаного результату) і забезпечує можливість обчислення вірогідності кожної такої події. Такий аналіз дерева неполадок, крім того, що він служить одним з алгоритмів оцінки ризику, є важливим інструментом якісного опису типів несправностей, тобто шляхів, які призводять до будь-якої з проміжних подій або основної події. Проміжна подія, що розглядається як „несправність компоненти системи”, може служити також і основною подією при допоміжному аналізі дерева неполадок. Наприклад, відмова електромотора може бути „несправністю компоненти системи”, що є проміжною несправністю і сприяє настанню основної події. Проте, та ж відмова електромотора може розглядатися і як основна подія в рамках аналізу дерева неполадок цього апарата.

Таблиця 1 – Вихідні події дерева помилок

№ з/п	Найменування подій або стану моделі	Вірогідність події $P_i$
1	Система автоматичної видачі дози (САВД) виявилася відключеною (помилка контролю початкового положення), $P_1$	0,0005
2	Обрив ланцюгів передачі сигналу від датчиків об'єму дози, $P_2$	0,00001
3	Ослаблення сигналу видачі дози перешкодами (непередбачувана зовнішня дія), $P_3$	0,0001
4	Відмова підсилювача-перетворювача сигналу видачі дози, $P_4$	0,0002
5	Відмова витратоміру, $P_5$	0,0003
6	Відмова датчика рівня, $P_6$	0,0002
7	Оператор не помітив світлової індикації про несправність САВД (помилка оператора), $P_7$	0,005
8	Оператор не почув звукової сигналізації про відмову САВД (помилка оператора), $P_8$	0,001
9	Оператор не знав про необхідність відключення насоса після закінчення заданого часу, $P_9$	0,001
10	Оператор не помітив індикації хронометра про закінчення встановленого часу заправки, $P_{10}$	0,004
11	Відмова хронометра, $P_{11}$	0,00001
12	Відмова автоматичного вимикача електропривода насоса, $P_{12}$	0,00001
13	Обрив ланцюгів управління приводом насоса, $P_{13}$	0,00001

Вірогідність базових подій позначимо через  $P_1, P_2, \dots, P_{13}$  (табл.1).

Вирази для головної події (проливу пального) в даному дереві помилок мають вигляд:

$$Q_s(t) = P(S) \cup P(P_{12} \cup P_{13});$$

$$S = P_1 \cup (P_2 \cup P_3) \cup P_4 \cup (P_5 \cap P_6) \cap P(P_7 \cup P_8 \cup P_9 \cup (P_{10} \cup P_{11}));$$

$$P(S) = 8,09873 \cdot 10^{-4} \cdot 6,49745 \cdot 10^{-3} = 5,26228 \cdot 10^{-6};$$

$$P(P_{12} \cup P_{13}) = 1 - (1 - 0,00001) \cdot (1 - 0,00001) = 2 \cdot 10^{-5};$$

$$Q_s(t) = P(S) \cup P(P_{12} \cup P_{13}) = 1 - (1 - 5,26228 \cdot 10^{-6}) \cdot (1 - 2 \cdot 10^{-5}) = 2,526 \cdot 10^{-5} \cdot 0$$

Якщо вірогідність виникнення аварії є непринятною величиною, то виконується аналіз „дерева відмов” і відшукуються рішення щодо її зниження (по рівню небезпеки ризику можна класифікувати як *неприйнятний* – ризик  $> 10^{-6}$ ; *прийнятний* –  $10^{-6} \leq \text{ризик} \leq 10^{-8}$ ; *безумовно прийнятний* – ризик  $> 10^{-8}$ ). Оскільки природними межами ризику для людини є діапазон між  $10^{-2}$  (вірогідність захворювання на душу населення) і  $10^{-6}$  (нижній рівень ризику від природної катастрофи або іншої серйозної небезпеки), техногенний ризик вважається прийнятним, якщо він менший від  $10^{-6}$ .

**Висновки.** Проведення кількісного аналізу вимагає наявності великої кількості інформації по аварійності, надійності обладнання, проведення експертних робіт, обліку особливостей навколишньої місцевості, метеоумов, часу перебування людей в небезпечних зонах та інших факторів.

Кількісний аналіз ризику дозволив оцінити і порівняти різні небезпеки за єдиними показниками при:

- обґрунтовуванні і оптимізації заходів безпеки;
- оцінці небезпеки крупних аварій на небезпечних виробничих об'єктах, що мають однотипні технічні пристрої (наприклад, магістральні трубопроводи);
- комплексній оцінці небезпек аварій для людей, майна і навколишнього природного середовища.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Бегун В.В. Безпека життєдіяльності (забезпечення соціальної, техногенної та природної безпеки): навч. посіб. / Бегун В.В., Науменко І.М. – К., 2011. – 344с.
2. Концепція управління ризиками виникнення надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру, прийнята Розпорядженням Кабінету Міністрів України за № 37-р від 22 січня 2014 р.
3. Про ідентифікацію та декларування безпекою об'єктів підвищеної небезпеки. Постанова Кабінету Міністрів України від 11.07 2002 р. N 956 із змінами, внесеними згідно з Постановами Кабінету Міністрів України.
4. Про затвердження критеріїв, за якими оцінюється ступінь ризику від провадження господарської діяльності та визначається періодичність здійснення планових заходів державного нагляду (контролю) у сфері техногенної та пожежної безпеки. Постанова КМУ від 29 лютого 2012 р. № 306.
5. Дранишников Л.В. Оценка риска возникновения аварии / Дранишников Л.В., Найверт А.В. // Проблеми математичного моделювання: міждерж. наук.-метод. конф., 26-28 травня 2004р.: тези доп. – Дніпродзержинськ: ДГТУ, 2004. – С.56-57.

*Надійшла до редколегії 25.09.2018.*

УДК 65.015.11

DOI 10.31319/2519-2884.33.2018.210

ТРИКІЛО А.І., к.т.н., доцент  
ЛЕВЧУК К.О., к.е.н., доцент

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

### **ВИЗНАЧЕННЯ РІВНЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО СТАНУ ОПЕРАТОРА**

**Вступ.** У загальному вигляді діяльність оператора в автоматизованій системі управління (АСУ) визначають наступним чином: людина повинна сприйняти й оцінити інформацію, що надходить, та прийняти своєчасне, а, головне, правильне рішення, тобто здійснити необхідну оперативну діяльність відповідними органами управління. Оператор позбавлений можливості безпосередньо спостерігати за об'єктами, якими управляє, і змушений користуватися інформацією, що надходить до нього по каналах зв'язку, тобто людина має справу не з реальними об'єктами управління, а з їх відображенням або інформаційними моделями. Тому перед дослідниками стоїть завдання вивчення надійності оператора і підвищення його стійкості під час функціонування в системі «оператор – людина – середовище».

Під надійністю оператора слід розуміти його властивості виконувати функції, продиктовані йому в даній системі, без помилок протягом певного часу в заданих умо-