

АНАЛІЗ АВАРІЙНОГО РИЗИКУ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ НАФТОГАЗОТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ

Я. М. Семчук, Я. М. Кочкодан, В. Я. Шиманський, Л. Р. Юрич
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;
e-mail: bzhd@nung.edu.ua

Проведено аналіз небезпек та ризиків аварій при експлуатації нафтогазових транспортних систем. Дається визначення аварії, а також причини її виникнення на газопроводах. Наведено, які чинники спричиняють відмову магістральних газопроводів, і які шкідливі фактори при цьому утворюються. Показано, що енергія стисненого газу реалізується у вигляді повітряних хвиль стиску, причому друга хвиля завжди зміщена в часі стосовно першої на період позитивної фази стиску. Енергетичний потенціал вибуху виражається через тротиловий еквівалент вибухової речовини. Наведено формулу тротилового еквіваленту, який подвоюється при розриві газопроводу. Показано, що одним із чинників уражень людей, споруд, будівель, обладнання техніки при відмові магістральних газопроводів є ударна хвиля. Наведено формулу для визначення безпечної відстані від впливу ударної хвилі. Наводяться основні чинники та наслідки згоряння газу на магістральних газопроводах відразу після аварії або через деякий час. Наведено джерела запалювання газу. Подано масштаби наслідків від руйнувань магістральних газопроводів, джерела утворення осколків при механічних пошкодженнях газопроводів. Дано аналіз руйнування газопроводів з утворенням осколків та дальності їх польоту. Наведено розміри забруднених газом зон атмосферного повітря, а також вплив природних чинників на розміри цих зон. Показано можливість токсичного ураження людей від конкретної аварійної ситуації. Дається формула для визначення величини ризику при попаданні газу у закриті приміщення, при підземній його міграції. Наведено розрахунки ризиків при проектуванні магістрального газопроводу Ананьїв-Ізмаїл. Показано, що природні фактори, які впливають на експлуатацію магістральних газопроводів, за інтенсивністю дії можна оцінити індексом небезпечності. Оцінювати масштаби аварії необхідно за найтяжчими ситуаціями.

Ключові слова: газопровід, аварійний ризик, аналіз безпеки.

Вступ. Аналіз безпеки та ризику аварій на об'єкті підвищеної безпеки включає постановку завдання дослідження, аналіз безпеки та умов виникнення аварій, їх розвитку і наслідків з оцінкою ймовірно-

сті їх виникнення, а також оцінку прийнятого ризику чи рішень щодо його зменшення [1].

Для цього визначається мета та завдання дослідження, виділяються об'єкти для яких потрібно виконати аналіз небезпек та ризику з визначанням об'єктів «турботи» суспільства (людина, соціально важливі об'єкти, елементи екосистеми тощо).

Завдання дослідження ризику, з умовленою експлуатацією об'єкту полягає у встановленні його рівня управління ризиком, шляхом зіставлення визначеного рівня з прийнятим та вибору рішень щодо його зниження.

Виклад основного матеріалу. Небезпеки, властиві газотранспортним системам, реалізуються через аварії, випадкові події, через раптову розгерметизацію трубопроводу (агрегату, посудини, технологічного блоку або елемента), що супроводжується інтенсивним витіканням транспортованого вмісту, і вивільненням закладеної в ньому енергії в навколишній простір, які здатні викликати як ураження людей, так і наносити певний екологічний і матеріальний збиток. При цьому масштаби й важкість наслідків значно залежать від виду продукту, що транспортується. Одні продукти, такі як нафта й нафтопродукти, небезпечні навіть при невеликому об'ємі надходження в навколишнє середовище й, отже, порушення герметичності труби або устаткування вже можна вважати аварією, інші ж продукти, у тому числі природний газ, при аналогічному ступені порушення герметичності серйозної загрози не становлять. Тому необхідно диференційовано підходити до трактування поняття «аварія» за ознакою «ступінь порушення герметичності трубопроводу, агрегату, посудини, технологічного блоку або елемента» для трубопроводів різного призначення.

При аналізі аварійного ризику газотранспортних об'єктів підвищеної небезпеки (ОПН) одним з початкових завдань є адекватне визначення цієї нижньої межі «аварійної розгерметизації» і похідних від неї всього спектру порушень герметичності, які будуть аналізуватися як аварії на тій або іншій складовій.

У загальному під аварією на газопроводі розуміється розрив його на повний перетин або утворення протяжної тріщини, еквівалентної по площі розкриття отвору з діаметром, який дорівнює або більший ніж внутрішній діаметр труби. Таке трактування обумовлене особливостями розгерметизації й руйнування газопроводу високого тиску. Відомо, що для магістральних газопроводів існує критичний розмір наскрізної тріщини по твірній труби, що становить приблизно чверть діаметра труби, при перевищенні якого відбувається, як правило, подальший мимовільний ріст тріщини і виникнення протяжного розриву, що однозначно ідентифікується як аварія. Якщо довжина тріщини менша від критичної, то, найімовірніше, такий дефект не становить серйозної загрози для реципієнтів і, отже, це підпадає під дане вище визначення

аварії. Основні причини аварій на магістральних газопроводах детально описані у роботах [2, 3].

Загалом відмова магістральних газопроводів під дією техногенних, природних чи антропогенних чинників може супроводжуватися: утворенням ударної хвилі; загорянням газу і термічним впливом пожежі на довкілля; токсичним забрудненням атмосферного повітря; створенням пожежновибухової небезпеки у житлових та робочих приміщеннях через потрапляння газу; розлітанням шматків металу та фрагментів внаслідок руйнування лінійної частини трубопроводів.

При раптовому руйнуванні газопроводу (посудини під тиском) енергія стисненого газу частково реалізується у вигляді надлишкового тиску повітряної хвилі стиску. При наявності джерела запалення енергія згоряння газу також частково реалізується у вигляді подібної хвилі. Оскільки загоряння газу можливе лише після його змішування з повітрям до певних концентрацій (5 ÷ 15 %) і з одночасною появою джерела запалювання з необхідним енергетичним потенціалом, друга хвиля завжди зміщена в часі щодо першої – щонайменше на період позитивної фази стиску τ^+ первинного процесу (фізичного вибуху).

Енергетичний потенціал будь-якого вибуху, відповідно до загальноприйнятої практики, виражається через тротиловий еквівалент ($M_{ТНТ}$) вибуху конденсованої вибухової речовини (ВР). Оскільки при розриві газопроводу ударна хвиля має напівсферичну форму, тротиловий еквівалент подвоюється і може бути записаний такою формулою [2]:

$$M_{ТНТ} = 2 \cdot 0,95 \cdot (0,65 \div 0,8) \cdot \frac{M_G \cdot A_G}{Q_{ТНТ}}, \quad (1)$$

де: M_G – маса стисненого газу, що бере участь у формуванні первинної ударної хвилі, кг; A_G – робота розширення одиниці маси газу, Дж/кг; $Q_{ТНТ}$ – теплота згоряння тротилу (4520-103 Дж/кг); 0,95 – коефіцієнт, що враховує витрату потенціальної енергії стисненого газу на повздовжнє руйнування труби після утворення наскрізного дефекту з розмірами більшими за критичні; 0,65 ÷ 0,8 – коефіцієнт, що враховує витрати енергії на утворення вирви – відповідно у середніх ґрунтах і щільних глинах.

При відмові магістральних газопроводів ударна хвиля є одним з чинників, що уражають. Вона утворюється внаслідок розповсюдження в атмосфері природного газу, який під тиском «вирвався» зі зруйнованого газопроводу, а також стиснених хвиль, які утворюються під час загоряння газового шлейфа з розповсюдженням продуктів згоряння.

Маючи великий запас енергії, ударна хвиля може уражати незахищених людей, руйнувати різні споруди, будівлі, обладнання, і техніку. Зі збільшенням відстані від епіцентру вибуху швидкість розповсюдження ударної повторної хвилі і надмірний тиск зменшуються. Безпечна відстань (L_6) від впливу ударної хвилі під час викидів газу з трубо-

проводу, що супроводжується вибухом, визначається за відомою формулою:

$$\Gamma_B = K_B \cdot \sqrt[3]{W_T}, \quad (2)$$

де W_T – тротиловий еквівалент, т; K_B – коефіцієнт пропорційності, м/т.

Величина K_B залежить від характеру пошкодження навколишніх об'єктів, при цьому:

– $K_B = 400$, якщо будь-які пошкодження відсутні;

– $K_B = 100$, якщо пошкоджене заскління будинків;

– $K_B = 30 \div 50$, якщо повністю зруйноване заскління будинків, частково пошкоджено рами, двері, легкі перегородки.

У процесі проектування магістральних газопроводів, для визначення безпечної віддалі від ураження ударною хвилею незахищених людей прийнято $K_B = 15$.

За даними [3] приблизно у половині випадків аварійного руйнування магістральних газопроводів загорання газу відбувається безпосередньо на місці пошкодження. Характер горіння газу і масштаби впливу на довкілля залежать від багатьох чинників, основними серед яких є: робочий тиск і діаметр газопроводу; густина ґрунту тощо. Газ може спалахнути – відразу після аварії або через деякий час.

У випадку запалювання газу відразу після розриву газопроводу характер горіння значною мірою буде визначатися вищеописаними альтернативами руйнування труби та витікання газу.

У першому випадку можуть з'явитись два або один (залежно від місця розриву на перегоні) високошвидкісні незалежні струмені полум'я, що прилягають до горизонту або з деяким кутом нахилу. Ці струмені (струмінь), зазвичай, мають орієнтацію, близьку до осі газопроводу.

У другому випадку ймовірна пожежа «колонного» типу. В умовах ґрунтового новоутворення на місці аварії полум'я пожежі має досить складну об'ємну конфігурацію. З метою математичного моделювання пожежі полум'я представляють у вигляді циліндра – вертикального або зі зміщеною під дією вітру верхньою основою. Геометричні характеристики такого циліндра відповідають розмірам пожежі: висота циліндра – довжині факела L_{ϕ} ; діаметр циліндра – видимому діаметру вогнища горіння D_e . За даними експериментальних досліджень, характерне відношення L_{ϕ}/D_e становить $2 \div 4$. Приблизно такі ж самі значення властиві полум'ю пожеж розлитих рідких вуглеводнів, що може бути підтвердженням загальної фізичної природи цих процесів.

Джерелами запалювання при розриві газопроводу можуть бути, насамперед, фрикційні іскри, що утворюються за динамічного впливу високошвидкісного струменя на ґрунт і повітряно-ерозійне руйнування траншеї з викидом часточок ґрунту в потік газу, а також іскри, що виникають при зіткненні фрагментів зруйнованого газопроводу. Тому ве-

лике значення для наслідків аварії на підземному газопроводі має склад ґрунту, що впливає на ймовірність загоряння газу. У пісках, торфовищах і на болотах ймовірність запалювання значно нижча, ніж у глинах, уламкових породах і ґрунтах з гальковими й кам'янистими вкрапленнями.

Запізніле загоряння струменів газу найчастіше пов'язане з наявністю в безпосередній близькості від місця аварії потенційних джерел відкритого вогню або іскор - шляхів сполучення із рухомими транспортними засобами, місць скупчення людей, житловою й промисловою забудовою, ЛЕП, силових кабелів і т.ін. За наявності джерел відкритого вогню (печі, факели, зварювання) ймовірність запалювання від них стікаючого з газопроводу газу дорівнює 1. За інших випадків (іскровий електророзряд, іскри від викидних труб, жевріючі і сильно нагріті предмети й т.ін.) ймовірність запалювання хмари газу приймають, як правило, значно меншою від одиниці, вона залежить від потужності джерела запалювання, умов формування хмари газу, швидкості та напрямку вітру й ряду інших факторів.

Проектування і будівництво нових трубопроводів та їх експлуатація пов'язані з низкою задач, в тому числі й з оцінкою механічного впливу фрагментів пошкоджених трубопроводів. У табл. 1 наведені узагальнені результати спостережень від руйнування газопроводів.

Таблиця 1. Масштаби наслідків від руйнування магістральних газопроводів

Діаметр, мм	530	720	820	1020	1220	1420
Розміри котлована, м	28×15×4,5	35×12×5	60×15×4	106×30×12	49×22×12	65×40×10
Радіус термічного впливу	150	195	244	244	275	288
Втрати газу, 3 млн.м	2,2	2,3	2,8	7,3	11	13,9

Актуальність оцінки цього уражаючого чинника, постійно зростає через підвищення навантаження на газопроводи, їх старіння.

Джерелом осколків можуть бути як зруйнований трубопровід великого тиску (первинні осколки), так і зруйновані прилеглі об'єкти (вторинні осколки). Останні утворюються через руйнування або переміщення об'єктів, розташованих поруч з магістральними трубопроводами, внаслідок дії на них первинних осколків або ударної хвилі.

Фактор осколкового ураження важко враховувати при аналізі аварійного ризику, тому що зона його дії, зазвичай, не виходить за межі

охоронних зон газотранспортних ОПН, а ймовірність механічного ураження різних реципієнтів осколками труб є значно нижчою ніж ймовірності впливу інших вражаючих факторів, у першу чергу, термічного впливу при спалаху газу. Як свідчать експериментальні дослідження, здебільшого випадки руйнування газопроводів супроводжуються утворенням відносно невеликої кількості фрагментів труб (5 ÷ 15 одиниць). У вибраних понад 270 випадках аварій з розлітанням осколків, дальність польоту в межах 50 м становила понад 59%; у межах 100 м – 72 %; у межах 150 м – 84 %; у межах 200 м – 92 %. Встановлено також, що для сучасних марок високов'язких сталей, застосовуваних для виготовлення газопроводів більших діаметрів, часто відбувається не розрив на шматки, а розвальцьовування труб, до того ж найчастіше по всій довжині зруйнованої ділянки, без викиду їх із траншеї.

Для визначення зон осколкового ураження необхідно враховувати рельєф місцевості та вплив лісу, що примикає до просіки в зоні ураження. Також встановлено, що руйнування трубопроводів з утворенням багатьох фрагментів (відносно незначних розмірів) відбулося здебільшого на трубах, виготовлених зі сталі з недостатньо високими характеристиками в'язкості (12 ГІС, 17ГІС-У). Саме зі сталей цієї групи було побудовано більшість трубопроводів діаметром 1020 мм, на долю яких припадає найбільша кількість відмов і аварій.

У подальшому з переходом переважно до газопроводів з діаметром 1420 мм вимоги до в'язкісних характеристик металу були значно підвищені.

Як відомо, природний газ метан негативно впливає на життєдіяльність людини, оскільки має наркотичну і токсичну дію. У рамках проблеми, яку ми розглядаємо, певний інтерес становить можливість загазованості атмосферного повітря внаслідок руйнування магістральних газопроводів. Розрахунки показали, що максимальні розміри забруднених зон атмосферного повітря не перевищують 250-300м. У районах річних заплав або на болотах, на «слабо проникних» або «оторфованих» ґрунтах внаслідок руйнування газопроводу кінці труб можуть бути значно зміщені вгору або вбік відносно вихідної осі, і, як наслідок, витік двох звукових струменів газу може відбуватись незалежно один від одного. У цьому випадку зона загазованості за напрямком витікання для горизонтальних струменів із газопроводів діаметром 1400 мм може збільшитися до 600-800 м. Проте (як було зазначено вище) у половині випадків під час витікання газу за відмови магістральних газопроводів відбувається загорання газу на місці пошкодження, при цьому зменшуються масштаби загазованості атмосферного повітря.

Зони токсичного ураження людей від конкретної аварійної ситуації розраховуються окремо не лише у разі перебування їх на відкритих територіях, але і в середині робочих та житлових приміщень.

Токсичне ураження людей на відкритих територіях малоїмовірне, всередині ж закритих приміщень воно часто проявляється. Багато таких прикладів є під час відмови газопроводів низького і середнього тиску, які проходять через населені пункти. Виникає пожежовибухова небезпека, коли концентрація метану в повітрі перевищує 5% за об'ємом.

Для визначення величини ризику $R(x, y)$ при попаданні газу у закриті приміщення, при підземній його міграції, пропонуємо формулу [3].

$$R(x, y) = \frac{\lambda \cdot P}{n \cdot L}, \quad (3)$$

де λ – питома відносна частота виникнення аварій, 1/рік*км; L – відстань від трубопроводу, км; n – відкрита ефективна пористість ґрунтів; P – вірогідність запалювання вуглеводневої суміші.

Розрахунки ведемо при: $\lambda = 3 \cdot 10^{-4}$ 1/рік; $n = 0,1$; $P = 0,1$.

Встановлено, що при проектуванні магістрального газопроводу Ананьїв-Ізмаїл у зоні ризику можуть опинитися 50 сіл, і сумарний ризик від поступлення газу у закриті приміщення знаходиться у межах $3 \cdot 10^{-3} - 1,5 \cdot 10^{-4}$ рік⁻¹, а середній індивідуальний ризик $3 \cdot 10^{-6} - 3 \cdot 10^{-8}$ рік⁻¹. Зауважимо, що за міжнародними стандартами прийнятним ризиком є 10^{-6} рік⁻¹ і вище; за нижній рівень ризику прийнято 10^{-11} рік⁻¹, який трактується як «абсолютна безпека».

При експлуатації магістральних газопроводів надто важливим є врахування природних факторів, які можуть вплинути на надійність у регіонах їх розташування. Ці фактори за інтенсивністю дії на газопроводи можна оцінити індексом небезпечності впливу за методикою, наведеною у роботі [4]. Він розраховується на основі відомостей про середні значення цих факторів для районів розміщення газопроводів. Якщо неможливо одержати середні оцінки природних факторів, що враховуються загалом для країни, тоді замість них треба використовувати екстремальні значення природних факторів, які найбільше розповсюдженні.

Висновки. Підсумовуючи вищенаведене визначення рівня ризику на всіх етапах його аналізу долучається застосування будь-яких відомих методів розрахунку й оцінок небезпек, наслідків і ризику для об'єктів «турботи» за умови їх обґрунтування та відповідності до цієї методики.

При оцінці масштабів аварії у випадку виникнення невизначених оцінок і величин слід орієнтуватися на найгірші (найтяжчі) ситуації.

Для моделювання аварій, аналізу безпеки і оцінки ризику рекомендується застосовувати комп'ютерні програми та програмні засоби, обґрунтовані відповідно до вимог цієї методики.

Література

1. Постанова КМУ від 11 липня 2002 г. № 956 «Про ідентифікацію та декларування безпеки об'єктів підвищеної небезпеки».
2. Семчук Я. М. Аналіз сучасного стану досліджень надійності магістральних нафтогазопроводів та причин і умов їх відмови / Семчук Я. М., Говдяк Р. Н., Кривенко Г. Н., Дрогомирецький Я. Н. // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2001. – №38. – С. 159-166.
3. Семчук Я. М. Технічний та екологічний ризик при експлуатації магістральних трубопроводів / Семчук Я. М., Говдяк Р. М., Кривенко Г. М., Гораль Л. Т. // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2001. – №1. – С. 68-71.
4. ДНАОП 000-8-22-02. Методика визначення ризиків та їх прийнятих рівнів для декларування безпеки об'єктів підвищеної небезпеки.

Стаття надійшла до редакційної колегії 10.11.2023 р

**ANALYSIS OF ACCIDENT RISK IN THE OPERATION
OF OIL AND GAS TRANSPORT SYSTEMS**

**Ya. M. Semchuk, Ya. M. Kochkodan, V. Ya. Shymanskyi,
L. R. Yurych**

*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas;
76019, Ivano-Frankivsk, str. Karpatska, 15;
e-mail: bzhd@nung.edu.ua*

An analysis of the dangers and risks of accidents during the operation of oil and gas transport systems was carried out. The definition of the accident is given, as well as the reasons for its occurrence on gas pipelines. What factors cause the failure of main gas pipelines, and what harmful factors are formed at the same time, are given. It is shown that the energy of the compressed gas is realized in the form of compression air waves, and the second wave is always shifted in time relative to the first for the period of the positive compression phase. The energy potential of the explosion is expressed in terms of the TNT equivalent of the explosive substance. The formula for the TNT equivalent, which doubles when the gas pipeline breaks, is given. It is shown that one of the factors of damage to people, structures, buildings, and technical equipment in case of failure of main gas pipelines is a shock wave. The formula for determining the safe distance from the impact of a shock wave is given. The main factors and consequences of gas burning on main gas pipelines immediately after the accident or after some time are given. Sources of gas ignition are given. The scope of consequences from the destruction of main gas pipelines, the sources of the formation of fragments in case of mechanical damage to gas pipelines are given. An analysis of the destruction of gas pipelines with the formation of fragments and their flight

range is given. The dimensions of gas-contaminated zones of atmospheric air are given, as well as the influence of natural factors on the dimensions of these zones. The possibility of toxic damage to people from a specific emergency situation is shown. A formula is given for determining the magnitude of the risk in case of gas ingress into closed rooms, during its underground migration. Calculations of risks in the design of the main gas pipeline Ananyiv-Izmail are given. It is shown that the natural factors affecting the operation of main gas pipelines can be evaluated by the intensity of the action using the danger index. It is necessary to assess the scale of the accident according to the most severe situations.

Key words: *gas pipeline, accidental risk, hazard analysis.*