

ДОСЛІДЖЕННЯ НАСЛІДКІВ ВИНИКНЕННЯ АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЙ НА ПРОМИСЛОВИХ ТРУБОПРОВОДАХ

Г.М. Кривенко, Л.В. Возняк

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська 15; тел. (0342) 727159,
e-mail: vozniaak@tvnet.if.ua

Наведено причини виникнення аварійних ситуацій на тривало експлуатованих промислових трубопроводах. Виявлено, що найбільший ризик виникнення аварій на цих об'єктах пов'язаний з повздовжніми руйнуваннями, які можуть відбуватися як по основному металу труб, так і в зоні зварних швів, внаслідок утворення корозійних «свищів» та «гільотинних» розривів. Промислові газопроводи є об'єктами підвищеної небезпеки. У випадку відмови газопроводів виникає ударна хвиля, яка є одним із чинників, що уражають.

Визначено умовну ймовірність спалахування аварійних викидів вуглеводневих енергоносіїв з урахуванням розташування джерел загоряння. Визначено пробіт-функції при термічному ураженні людей. Запропоновано методику для визначення аварійних витрат газу у випадку розриву трубопроводу. Виконано порівняльний аналіз масової витрати газу при розриві трубопроводу в залежності від діаметра трубопроводу, початкового тиску, часу та віддалі від місця пошкодження труб.

Ключові слова: промисловий трубопровід, розрив трубопроводу, ударна хвиля, ймовірність загоряння, масова витрата газу, пробіт-функція, діаметр трубопроводу.

Приведены причины возникновения аварийных ситуаций на длительно эксплуатируемых промышленных трубопроводах. Наибольший риск возникновения аварий на промышленных трубопроводах связан с продольными разрушениями, которые могут проходить как по основному металлу труб, так и в зоне сварных швов из-за образования коррозионных «свищей», «гильотинных» разрывов. Промысловые газопроводы являются объектами повышенной опасности. В случае отказа газопроводов возникает ударная волна, которая является одним из поражающих факторов.

Определена условная вероятность возгорания аварийных выбросов углеводородных энергоносителей с учетом расположения источников возгорания. Определены пробит-функции при термическом поражении людей. Предложена методика определения аварийных потерь газа при разрыве трубопровода. Выполнен сравнительный анализ массового расхода газа при разрыве трубопровода в зависимости от диаметра трубопровода, начального давления, времени и расстояния от места повреждения труб.

Ключевые слова: промышленный трубопровод, разрыв трубопровода, ударная волна, вероятность возгорания, массовый расход газа, пробит-функция, диаметр трубопровода.

The reasons of emergency situations for the long-term operated industrial pipelines were presented. It was revealed that the greatest risk of accidents at these objects is related to longitudinal destruction, which can occur both in the main metal pipes and in the weld zone, due to the formation of corrosive "fistulas" and "guillotine" ruptures. Industrial gas pipelines are objects of high danger. In case of the gas pipeline failure, there is a shock wave, which is one of affecting factors.

The conditional probability of ignition of emergency emissions of hydrocarbon energy carriers was determined, considering the location of ignition sources. The probit-functions by the thermal effect on people were determined. The determination method of emergency gas losses in case of pipeline rupture was developed. A comparative analysis of gas mass flux at pipeline rupture was performed, depending on the pipeline diameter, initial pressure, time and distance from the point of pipe damage.

Key words: industrial pipeline, pipeline rupture, shock wave, probability of ignition, gas mass flux, probit function, pipeline diameter.

Значну роль у забезпеченні енергетичної безпеки України відіграє нафтогазова галузь держави. Промислові трубопроводи є одним з основних елементів технологічного процесу видобування та підготовки до транспортування газу та газового конденсату. Загальна їх протяжність відповідає протяжності магістральних газопроводів. Промислові трубопроводи прокладаються на території об'єктів, де безпосередньо присутній персонал. Тому експлуатація промислових трубопроводів повинна бути безаварійною і гарантувати безпеку життя та здоров'я працівників даного об'єкта і охорону довкілля.

Згідно з результатами досліджень найбільший внесок у сукупність надзвичайних ситу-

ацій роблять надзвичайні ситуації техногенного характеру. Тому актуальним є розроблення засобів реагування, запобігання та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій техногенного характеру як найбільш розповсюджених і загрозливих [1]. Промислові трубопроводи на нафтогазових об'єктах не є безпечними через тривалий термін їх експлуатації, тому ризик виникнення аварійно-небезпечних дефектів постійно зростає.

Надходження до атмосферного повітря, ґрунту та водойм складових природного газу призводить до порушення газового балансу. Особливо небезпечними є сірчисті сполуки й окиси азоту, що спричиняють кислотні дощі, які можуть випадати на відстані багатьох со-

ть і тисяч кілометрів від місця витікання вуглеводневих енергоносіїв. Однак найбільшого техногенного впливу навколишнє середовище зазнає через розрив трубопроводу під час його експлуатації.

Отже, виходячи з актуальності безаварійної експлуатації трубопроводів, запобігання виникненню та прогнозування наслідків аварій є одним першочергових завдань у процесі їх експлуатації.

Тому дана робота присвячена дослідженню наслідків виникнення аварійних ситуацій на промислових трубопроводах.

Цим актуальним питанням, що стосуються проблеми забезпечення техногенної безпеки об'єктів паливно-енергетичного комплексу, присвячено багато наукових робіт, серед яких на особливу увагу заслуговують праці Мазура І. І., Іванцова, О. М., Семчука Я. М., Чабановича Л. Б., Грудза В. Я., Говдяка Р. М. та інших [1, 2, 3, 4, 5].

Незважаючи на успіхи в дослідженні питань забезпечення техногенної безпеки, все ж виникає ряд труднощів у процесі експлуатації промислових трубопроводів, а саме: які тиски є найбільш оптимальними з огляду на безпечну експлуатацію; за яких умов відбувається спалахування аварійних викидів газу; які наслідки термічного ураження обслуговуючого персоналу.

Із аналізу джерел, присвячених проблемам екологічної безпеки, випливає актуальність комплексних досліджень чинників для прогнозування ймовірності аварійних викидів газів у випадку аварійних ситуацій, розповсюдження ударної хвилі та впливу їх на обслуговуючий персонал та довкілля, що розглядається у даній статті.

Метою дослідження є прогнозування обсягів викидів газу при розриві промислового трубопроводу, ймовірності утворення ударної хвилі та спалахуючих аварійних викидів газу і оцінювання впливу їх на обслуговуючий персонал.

Об'єктом дослідження є промисловий трубопровід із тривалим терміном експлуатації.

Для досягнення поставленої мети здійснено прогнозування масової витрати газу при розриві трубопроводу в залежності від діаметра трубопроводу, ймовірність загоряння та утворення ударної хвилі.

Маючи великий запас енергії, ударна хвиля може уражати незахищених засобами безпеки людей, руйнувати різні споруди, обладнання і техніку. Із віддаленням від епіцентра вибуху швидкість розповсюдження ударної повторної хвилі та ударний тиск зменшуються. Безпечна відстань (G_6) від впливу ударної хвилі під час викидів газу з трубопроводу, що супроводжується спалахуванням, визначається за відомою формулою [3]:

$$G_6 = K_6 \cdot \sqrt[3]{W_T}, \quad (1)$$

де W_m - тротиловий еквівалент, т;

K_6 - коефіцієнт пропорційності, м/т, величина якого залежить від характеру пошкодження навколишніх об'єктів.

Приблизно у половині випадків аварійного руйнування магістральних газопроводів загоряння газу відбувається безпосередньо на місці пошкодження. Характер горіння газу і масштаби впливу на довкілля залежать від багатьох чинників, основними серед яких: робочий тиск, діаметр трубопроводу, густина ґрунту. Виникнення аварійних розривів на магістральних трубопроводах та технологічних газопроводах компресорних станцій пов'язане з такими фізичними ефектами:

- утворенням хвиль стискання за рахунок розширення в атмосфері природного газу, який виривається під тиском з пошкодженої ділянки трубопроводу, а також хвиль стискання, що утворюються у випадку спалахування газової хмари внаслідок розширення продуктів згоряння;

- відколонуванням та розлітанням фрагментів пошкодженої ділянки трубопроводу;

- термічною дією пожежі на навколишнє середовище.

Аналізуючи процес пошкодження магістрального газопроводу, можна виділити три стадії: зародження пошкодження; швидке поширення наскрізної тріщини вздовж тіла труби; гальмування і зупинка тріщини [1].

У момент пошкодження ділянки газопроводу реалізується лише енергія стисненого газу. Загоряння газу може виникнути лише з деякою затримкою поза порожниною трубопроводу, тобто після змішування газу з повітрям до певних концентрацій (5...15 % за об'ємом) з одночасним виникненням джерела запалювання з фізично необхідним енергетичним потенціалом.

Руйнування газопроводів, що експлуатуються при кільцевих напруженнях в тілі труби нижче межі плинності, може відбутися лише за наявності в тілі труби наскрізного дефекту, лінійні розміри якого більші від критичних. Внаслідок цього на процес руйнування труби витрачається відносно незначна частина вихідної потенціальної енергії стисненого газу, 2...10 % (для розрахунку приймається 5 %) [1].

Для розрахунку затрат енергії на утворення вирви в ґрунті необхідно вводити поправочний коефіцієнт, який для середніх ґрунтів дорівнює 0,65, а для щільних суглинків та глин – 0,8 [1]. Отже, для напівсферичної хвилі тиску маса "тротилового еквіваленту" розраховується за формулою [1]:

$$M_m = 2 \cdot 0,95(0,65 + 0,8) \frac{M_z \cdot A_z}{Q_m}, \quad (2)$$

де M_z – маса стисненого газу, що бере участь у формуванні первинної ударної хвилі, кг;

A_z – робота з розширення одиниці маси газу, Дж/кг;

Q_m – теплота згоряння тротилу ($4,24 \cdot 10^6$ Дж/кг).

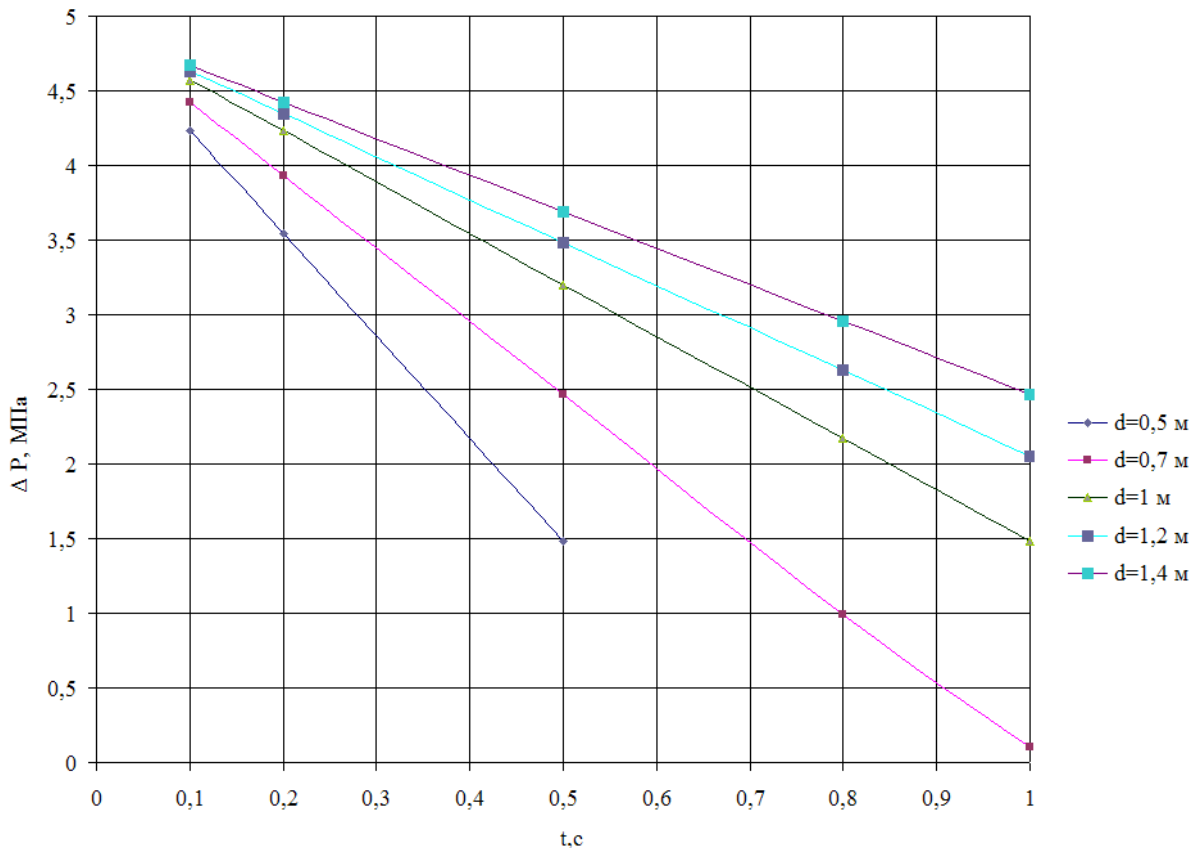


Рисунок 1 – Залежність зміни тиску від часу для трубопроводів з різним діаметром при $a = 0,7$ м

Щоб проаналізувати можливі наслідки від аварії на магістральному газопроводі, визначено характер зміни тиску залежно від діаметра трубопроводу, часу та віддалі від епіцентра вибуху a . Результати розрахунків наведено на рисунку 1 [2].

Одним із основних завдань є розроблення критеріїв виникнення та розвитку аварійних ситуацій та здійснення заходів із їх запобігання. Вихідними даними для прогнозування аварійної ситуації є опис технічних відхилень, що призводять до відмов обладнання, результати аналізу діагностування трубопроводів та помилок обслуговуючого персоналу.

Найбільші за збитком аварії на трубопроводах виникають при повздовжніх руйнуваннях труб, які можуть відбуватися як по основному металу труб, так і в зоні зварних швів внаслідок утворення корозійних «свищів» або «гільотинних» розривів.

Визначимо умовну ймовірність спалахування аварійних викидів вуглеводневих енергоносіїв з огляду на віддаленість джерела загоряння.

Умовна ймовірність спалахування аварійних викидів газу за наявності періодично діючих джерел загоряння розраховується за формулою [5].

$$P_p = 1 - Q(\tau), \quad (3)$$

де $Q(\tau)$ – ймовірність неспалахування хмари від джерел загоряння, натуральний логарифм якої розраховується за такою залежністю [5]:

$$\ln Q(\tau) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J A_{ih} \mu_j \left[(1 - a_j p_j) e^{-\lambda_j p_j d_{ih}} - 1 \right], \quad (4)$$

де i – номер елементарної площинки в розрахунковій області;

$j = 1, \dots, J$ – номер джерела загоряння на елементарній площинці;

F_{ih} – площа i -ої елементарної площинки, га;

μ_j – щільність розподілу джерел загоряння, шт/га.

$$a_j = \tau_i / (\tau_a + \tau_i), \quad (5)$$

де τ_i – час, протягом якого активне джерело загоряння, хв;

τ_a – час (період) між періодами активації джерела загоряння, хв;

p_j – фізичний потенціал загоряння j -го джерела загоряння

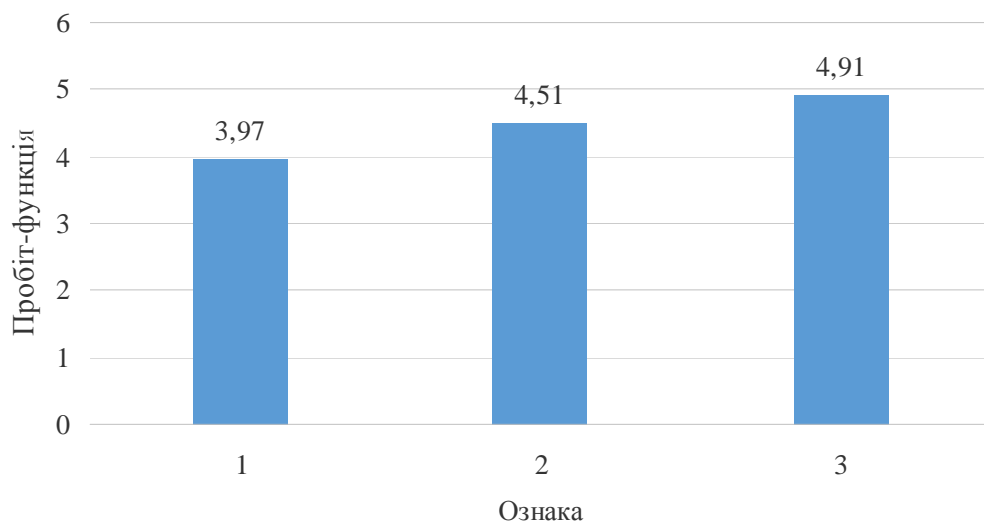
d_{ih} – час, протягом якого джерело контактувало з хмарою (рекомендується приймати 60 хвилин);

λ_j – частота активації j -го джерела запалювання, 1/хв.

$$\lambda_j = 1 / (\tau_a + \tau_i).$$

Щоб підтвердити, які наслідки можуть виникнути при витіканні газу у випадку розриву трубопроводу, визначимо ймовірність загоряння аварійних викидів газу під час внутрішнього перевезення вантажів за наявності періодично діючих джерел загоряння за залежністю (4).

Потенціал спалаху джерел загоряння залежить від виду джерела загоряння. Так, напри-



- 1 – глибина ураження шкіри менше 0,12 мм;
 2 – глибина ураження шкіри менше 2 мм;
 3 – глибина ураження більше 2 мм.

Рисунок 2 – Пробіт-функції термічного ураження 10% шкірного покриву

клад, фізичний потенціал загоряння відкритого полум'я – $p_j = 1$, а для електрообладнання – $p_j < 0,05$. Якщо використовуються електромотори з гарячим обробленням, то $p_j > 0,5$. Для вибухобезпечного обладнання потенціал загоряння $p_j = 0$. Для несправних провідників транспортних засобів – $0,5 > p_j > 0,05$.

Вихідні дані для визначення ймовірності спалахування аварійних викидів газу під час внутрішнього перевезення вантажів за наявності періодично діючих джерел загоряння: $p_{j=1} ; a_j = 0,2 ; \mu_j = 20$ шт/га; $\lambda_j = 0,0333$ [5].

Ймовірність незагоряння хмари від джерел згідно з (4) становить $Q(\tau) = 0,01930$.

Умовна ймовірність загоряння аварійних викидів газу за наявності періодично діючих джерел загоряння під час внутрішнього перевезення вантажів становить

$$P_p = 1 - 0,0193 = 0,9807.$$

Результати розрахунків вказують на високу ймовірність спалахування аварійних викидів газу при розриві трубопроводу під дією негативних чинників у процесі його експлуатації.

Під час розрахунку показників ризику для людей рекомендується враховувати лише небезпеку термічного ураження. Приймається, що в залежності від діаметра газопроводу та робочого тиску, умов прокладання трубопроводу в ґрунтах, характеристик ґрунтів та ряду інших факторів, горіння газу під час аварій може протікати за двома варіантами [1]:

- горіння інтегрального потоку газу у вигляді вертикального «стовпа вогню»;
- незалежне горіння в протилежних напрямках двох струмин вздовж осі трубопроводу.

Під час розрахунків ймовірності ураження людей, елементів екосистеми та технологічного обладнання при аваріях на газопроводах про-

понується використовувати систему «вагових» коефіцієнтів, які відображають для кожного діаметра трубопроводу як ймовірність загоряння газу при розриві, так і найбільш характерні співвідношення між сценаріями пожежі [1].

Загоряння аварійних викидів газу створює особливу небезпеку для обслуговуючого персоналу.

Термічна дія на людину при виникненні пожеж на газопроводах характеризується біохімічними змінами верхніх шарів шкірного покриву. За даними Б. Бетнера людина відчуває сильний біль, коли температура верхнього шару шкірного покриву перевищує 45°C [1].

Ступінь пошкодження шкіри під дією високих температур залежить від тривалості взаємодії людини з тепловим потоком. Важливим показником є такий рівень теплової взаємодії на людину, за якого можливий летальний випадок.

Визначимо пробіт-функції при термічному ураженні людей з опіками I, II і III ступенів за залежністю [1]

$$Pr = a + b \cdot \ln(\tau \cdot q^{4/3}), \quad (6)$$

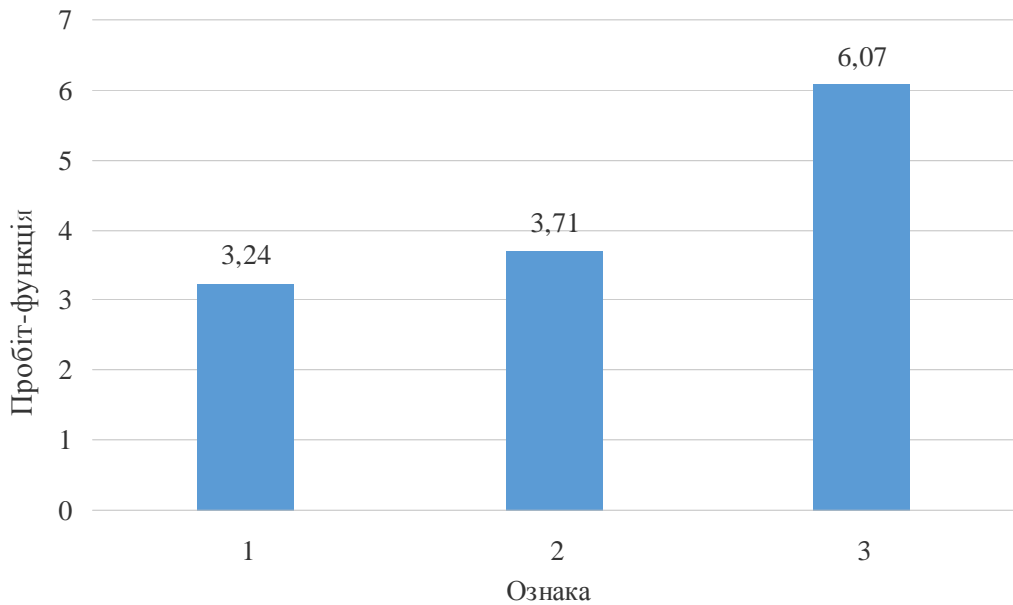
де $(\tau \cdot q^{4/3})$ – доза теплової взаємодії, $[q] - \text{В/м}^2$; $[\tau] - \text{с}$,

a, b – коефіцієнти пробіт-функцій термічного ураження різних ступенів важкості.

Результати розрахунків наведено на рисунках 2, 3, 4.

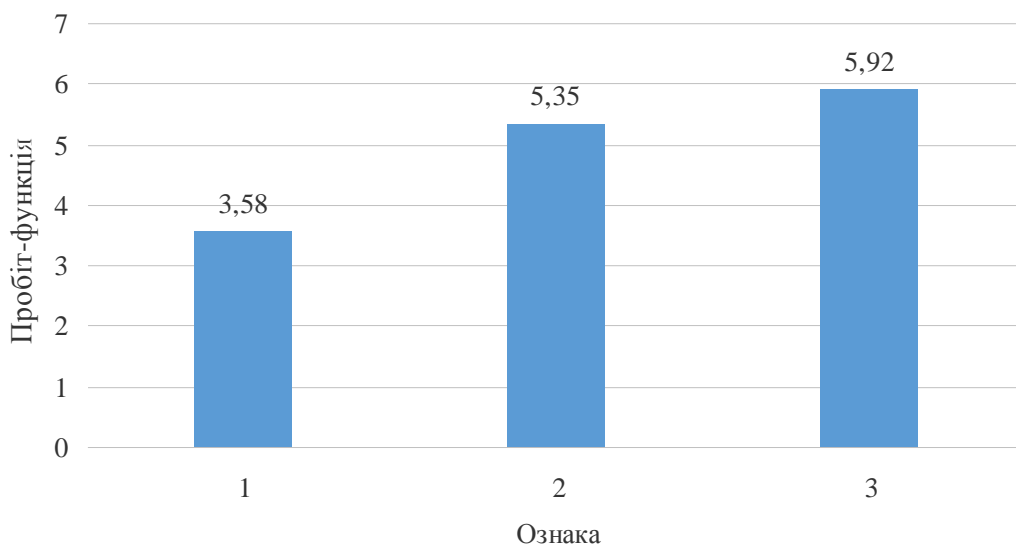
За даними К. М'юдана здорові дорослі люди виживають, якщо опіки II і III ступенів охоплюють менше 20 % поверхні тіла. Виживання різко знижується при опіках 50 % поверхні тіла [1].

Наведені розрахунки свідчать про важливість прогнозування аварійних витікань газу. Маючи дані діагностування поверхні трубопро-



- 1 – глибина ураження шкіри менше 0,12 мм;
 2 – глибина ураження шкіри менше 2 мм;
 3 – глибина ураження більше 2 мм.

Рисунок 3 – Пробіт-функції термічного ураження 50% шкірного покриву



- 1 – глибина ураження шкіри менше 0,12 мм;
 2 – глибина ураження шкіри менше 2 мм;
 3 – глибина ураження більше 2 мм

Рисунок 4 – Пробіт-функції термічного ураження 80% шкірного покриву

воду інтелектуальними поршнями, потрібно наперед спрогнозувати ймовірність розриву трубопроводу на найбільш небезпечних ділянках і провести заходи для підвищення безпеки експлуатації.

Слід відмітити, що сучасний етап розроблення нафтових і газових родовищ також супроводжується зростаючою кількістю технічних, екологічних та економічних проблем.

Проблема техногенної безпеки не може бути вирішена лише за допомогою засобів технічного захисту, а потребує комплексного дослідження

чинників, що впливають на виникнення аварійної ситуації на даному об'єкті, при виконанні певної технологічної операції. Для цього потрібно наперед спрогнозувати витікання кількості газу у випадку виникнення аварійної ситуації та проводити заходи із забезпечення надійності процесу експлуатації та попередження забруднення довкілля.

Найнебезпечнішим аварійним пошкодженням промислового трубопроводу є «гільтинний» розрив.

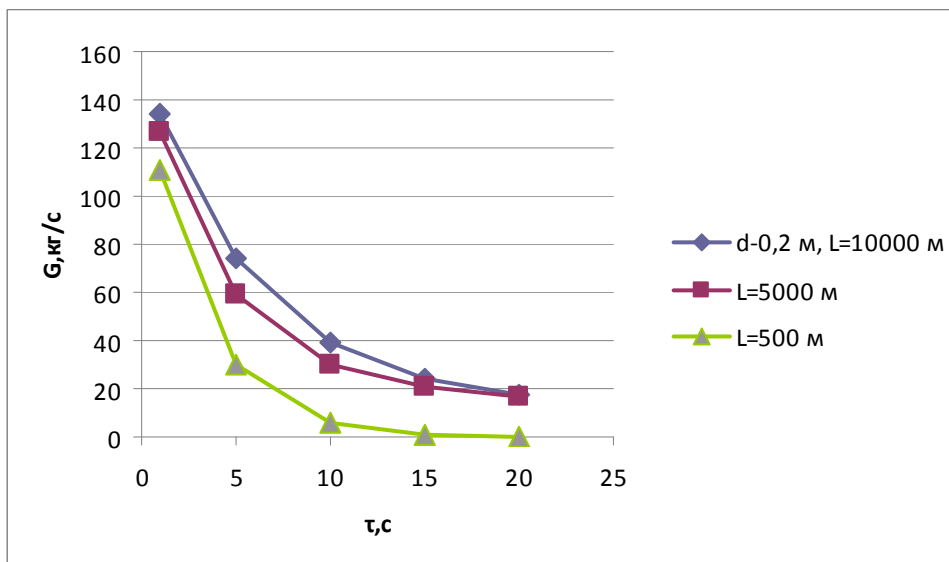


Рисунок 5 – Зміна масової витрати газу при розриві трубопроводу діаметром 0,2 м у часі

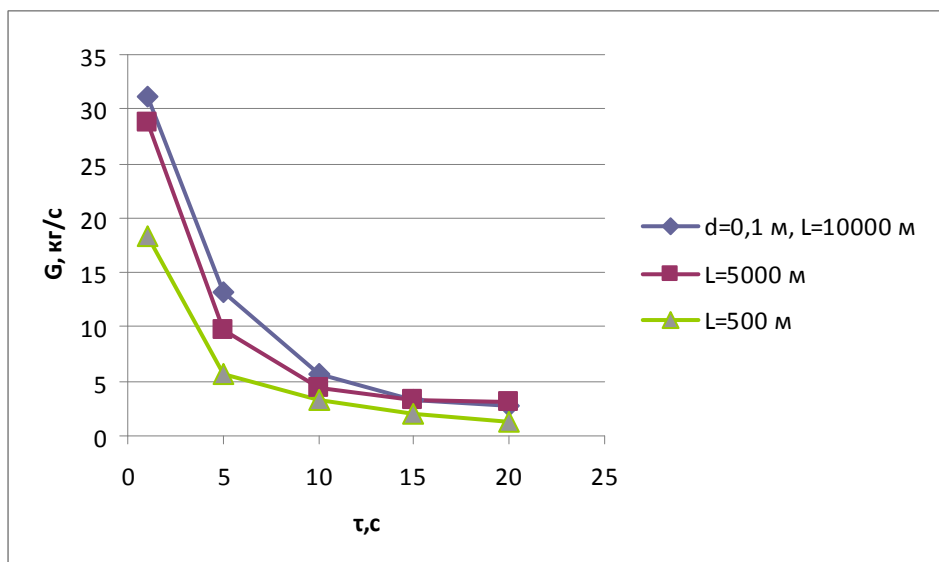


Рисунок 6 – Зміна масової витрати газу при розриві трубопроводу діаметром 0,1 м у часі

Для прогнозування масової витрати газу під час його витікання при «гільйотинному» розриві трубопроводу можна використати рівняння нерозривності, руху та балансу енергії [6].

Відомі числові методи реалізації системи рівнянь вимагають великих затрат, пов'язаних з підготовкою вихідних даних до розрахунку. Тому для прогнозування аварійних втрат ці методи не придатні, оскільки не дозволяють прийняти оперативне рішення для виявлення масштабів викидів продукту у випадку аварії та проведення термінових заходів щодо попередження забруднення довкілля.

Для досягнення поставленої мети використано методику розрахунку масової витрати газу під час розриву трубопроводу [3] при течії газу в промислових трубопроводах діаметром від 100 мм до 200 мм, різного розташування місць розривів від 500 до 10000 м. Розрахунки здійснювалися в MS Excel.

Для інженерної оцінки масової витрати газу при розриві трубопроводу можна використати рівняння Белла [3].

$$G(\tau) = \frac{\Gamma G_i}{1 + \eta} \cdot \left[\exp\left(-\frac{\tau}{\eta^2 \cdot \varepsilon}\right) + \eta \cdot \exp\left(-\frac{\tau}{\varepsilon}\right) \right], \quad (7)$$

де $G(\tau)$ і G_n – поточна та початкова масові витрати (в момент розриву), кг/с;

τ – час, що пройшов від моменту розриву, с;

Γ – фактор інерційної затримки ($\cong 0,5$);

η – коефіцієнт збереження маси;

ε – стала часу, с.

Для аналізу можливих наслідків від виникнення аварій на промисловому трубопроводі визначимо характер зміни масової витрати газу під час розриву трубопроводу в залежності від його діаметра, початкового тиску, часу та віддалі від місця пошкодження труби, скориставшись залежністю (7). Результати розрахунків наведено на рисунках 5, 6.

Література

При розриві трубопроводу діаметром 0,2 м та довжині відключеної ділянки 10000 м початковий витік газу становить 130 кг/с. Якщо довжина відключеної ділянки – 500 м, то початковий витік газу становить 115 кг/с. Через 5 секунд за максимальної довжини відключеної ділянки витік маси газу – 78 кг/с, а за мінімальної довжини відключеної ділянки – 30 кг/с (рисунок 5).

Аналогічно при розриві трубопроводу діаметром 0,1 м та довжині відключеної ділянки 10000 м початковий витік газу – 32 кг/с. Якщо довжина відключеної ділянки – 500 м, то початковий витік газу – 19 кг/с. Через 5 секунд за максимальної довжини відключеної ділянки витік маси газу становить 13 кг/с, а за мінімальної довжини відключеної ділянки – 5 кг/с (рисунок 6).

Отже, чим більший діаметр трубопроводу та довжина відключеної ділянки, тим більші втрати газу при розриві трубопроводу, що носять значні збитки довкіллю. Аварійні викиди газу за сприятливих умов можуть загорітися. Це особливо небезпечно для працівників, що знаходяться у зоні ризику.

Висновки

Для прогнозування можливих наслідків від виникнення аварії на магістральному газопроводі визначено характер зміни масової витрати газу при розриві трубопроводу в залежності від діаметра трубопроводу, початкового тиску, часу та віддалі від місця пошкодження труби, зміни тиску від часу для різних діаметрів трубопроводу у разі виникнення ударної хвилі.

Розглянуто в комплексі такі чинники, як прогнозована оцінка викиду газу у випадку аварійного розриву трубопроводу, вплив аварійного викиду газу на ймовірність спалахування за наявності періодично діючих джерел загоряння та небезпеки ураження обслуговуючого персоналу. Маючи дані діагностування поверхні трубопроводу інтелектуальними поршнями, потрібно наперед спрогнозувати ймовірність пошкодження трубопроводу на найбільш небезпечних ділянках та провести ряд заходів для підвищення промислової безпеки експлуатації трубопроводів, якими транспортуються вуглеводневі енергоносії.

Подальший напрямок досліджень полягає у розробленні багатифункціональної системи забезпечення екологічної безпеки газонафтопроводів.

1 Мазур И. И. Безопасность трубопроводных систем / И. И. Мазур, О. М. Иванцов. – М.: ИЦ “Елима”, 2004. – 1104 с.

2 Кривенко Г. М. Дослідження впливу діаметра трубопроводу на поширення ударної хвилі у аварійних ситуаціях / Г. М. Кривенко, М. П. Возняк, Л. В. Возняк С. О. Кривенко // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2014. – № 1 (36). – С. 110-117.

3 Энергоекотическая безопасность нефтегазовых объектов / Р. М. Говдяк, Я. М. Семчук, Л. Б. Чабанович, Б. І. Шелковський, Г. М. Кривенко / Энергоекотическая безопасность нефтегазовых объектов. – Івано-Франківськ: Лілея – НВ, 2007. – 556 с.

4 Kryvenko G.M.: Forecasting of emergency oil losses through the defective orifices in industrial pipelines / G. M. Kryvenko, L. V. Vozniak // World Science, Multidisciplinary Scientific Edition. Warsaw: No 3 (31), vol. 1, March 2018. – pp. 17-25.

5 Руководство по безопасности «Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей. Серия 27. Выпуск 9. – М.: ЗАО «Научно-технический центр исследования проблем промышленной безопасности, 2015. – 44 с.

6 Лурье М. В. Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа / М. В. Лурье. – М.: Нефть и газ, 2003. – 335 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії
26.10.18

Рекомендована до друку
професором Грудзом В.Я.
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
канд. техн. наук Степ'юком М.Д.
(УМГ «Прикарпаттрансгаз»,
м. Івано-Франківськ)