

УДК 622.692.4

DOI: 10.31471/2304-7399-2024-19(73)-197-206

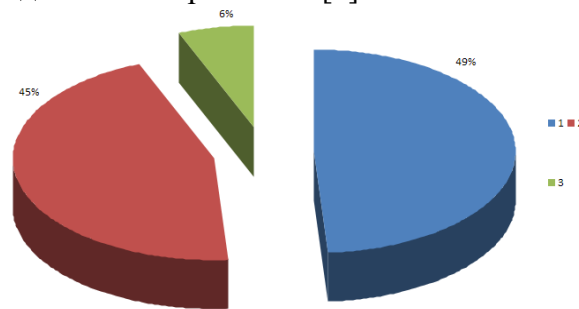
**РИЗИКИ НЕБЕЗПЕКИ ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ
ПРОМИСЛОВИХ ГАЗОПРОВОДІВ****Г. М. Кривенко, О. В. Кривенко, Я. М. Семчук**

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;
тел. +38(0342)72-71-58; e-mail: galyna.krivenko@iung.edu.ua*

Гарантування безпеки трубопроводного транспорту вуглеводневих енергоносіїв є однією з пріоритетних задач у нафтогазовій галузі. Нафтогазопромислові трубопроводи є невід'ємною частиною у технологічних схемах об'єктів видобування нафти і газу. Їх загальна протяжність співпадає з протяжністю магістральних трубопроводів. Тому на підвищення безпеки функціонування промислових трубопроводів акцентується особлива увага. Безпечне функціонування, оперативний аналіз найбільш небезпечних граничних станів є запорукою надійності експлуатації промислових трубопроводів. Найбільший внесок у сукупність надзвичайних ситуацій роблять надзвичайні ситуації техногенного характеру, тому необхідними є заходи реагування, запобігання та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій техногенного характеру як найбільш розповсюджених і загрозливих. Метою роботи є дослідження ризиків безпеки під час експлуатації промислових трубопроводів. Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі: прогнозування масової витрати газу при розриві трубопроводу та оцінка ризиків. Об'єктом дослідження є промисловий трубопровід із значним терміном експлуатації. Причинами виникнення відмов у трубопровідних системах є дефекти зварювання, механічні пошкодження, внутрішня корозія та інші. Найбільші за збитком аварії на трубопроводах виникають при поздовжніх руйнуваннях труб, які можуть відбуватися як по основному металу труб, так і в зоні зварних швів при утворенні корозійних «свищів», «гільйотинних» розривів. Аварійні викиди газу можуть загоратися. Визначено характер зміни масової витрати газу при розриві трубопроводу в залежності від діаметра, початкового тиску, часу та віддалі від місця пошкодження трубопроводу. Витікання газу при розриві трубопроводу, що наносить збитки довкіллю, залежить від діаметра та довжини відключеної ділянки. Для забезпечення продовження терміну служби та безпечної експлуатації промислових трубопроводів зі значним терміном експлуатації потрібно коригувати тиски на початку трубопроводу. Під час оцінки ризиків важливо враховувати показники впливу окремих технологічних процесів на виникнення аварійної ситуації.

Ключові слова: *промисловий трубопровід, прогнозування, оцінка ризиків, масова витрата, вуглеводневі енергоносії, показники впливу.*

Вступ. Забезпечення безпеки трубопровідного транспорту вуглеводневих енергоносіїв є однією з пріоритетних задач у нафтогазовій галузі. Нафтогазопромислові трубопроводи є невід'ємною частиною у технологічних схемах об'єктів видобування нафти і газу. Їх загальна протяжність співпадає з протяжністю магістральних трубопроводів. Тому на підвищення безпеки функціонування промислових трубопроводів акцентується особлива увага. Безпечне функціонування, оперативний аналіз найбільш небезпечних граничних станів є запорукою надійності експлуатації промислових трубопроводів. Найбільше аварійних ситуацій спостерігається через причини техногенного характеру (рис.1). Тому необхідно впроваджувати заходи зі запобігання та мінімізації наслідків надзвичайних ситуацій техногенного характеру як найбільш розповсюджених і загрозливих [1].



1 – НС техногенного характеру; 2 – НС природного характеру;
3 – НС іншого (соціально-політичного) характеру

Рис. 1. Розподіл надзвичайних ситуацій (НС) за характером прояву

Найнебезпечнішими складовими системи транспортування вуглеводневих енергоносіїв є лінійні частини трубопроводів, витік вмісту яких створює найбільші загрози. Промислові трубопроводи на нафтогазових об'єктах є небезпечними через тривалий термін їх експлуатації. Тому зростає ризик утворення аварійно-небезпечних дефектів, які можуть спричинити вибух на трубопроводах. При цьому ударна хвиля при відмові газопроводів є одним з чинників, які спричиняють небезпеку. Внаслідок ударної хвилі атмосферне повітря, ґрунт та водоймища забруднюються складовими природного газу, що призводить до порушення газового балансу. Слід зазначити, що особливо небезпечними є сполуки сірки та окису азоту, які спричиняють кислотні дощі, що випадають на відстані декілька кілометрів від місця витоку вуглеводневих енергоносіїв [2].

Звідси можна зробити висновок, що попередження та прогнозування наслідків аварій є актуальним під час експлуатації промислових трубопроводів.

Аналіз попередніх досліджень. Аналіз літературних джерел свідчить, що проблемі забезпечення техногенної безпеки об'єктів паливно-

енергетичного комплексу присвячено багато наукових робіт. Це праці Грудза В. Я., Говдяка Р. М., Стоєцького В. Ф., Крижанівського Є. І. та ін. [3, 4, 5, 6]. Прогнозування та оцінка ризиків небезпеки наведена в [7, 8, 9]. Слід відмітити, що у наведених роботах [10, 11] методологія аварійного ризику враховує у загальному специфічні особливості експлуатації небезпечних виробничих основних об'єктів і недостатньо газотранспортних систем, які є джерелами підвищеної небезпеки. Тому потрібно проаналізувати вплив чинників для оцінки ризиків, які виявляються під час прогнозування ймовірності аварійних викидів газів на промислових трубопроводах.

Метою роботи є дослідження ризиків небезпеки під час експлуатації промислових трубопроводів. Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі: прогнозування масової витрати газу при розриві трубопроводу та оцінка ризиків. Об'єктом дослідження є промисловий трубопровід із значним терміном експлуатації.

Виклад основного матеріалу. Причинами виникнення відмов у трубопровідних системах є дефекти зварювання, механічні пошкодження, внутрішня корозія та інші. Як видно з рис. 2, найвагоміша причина виникнення відмов під час експлуатації промислових трубопроводів є внутрішня корозія, яка складає 88 % [1].

Якщо експлуатувати трубопроводи без певних заходів із подолання виникнення корозії, то вже через декілька років можна спостерігати збільшення відмов на них.

Отже, прогнозування наслідків аварій є одним із першочергових завдань.

Найбільші за збитком аварії на трубопроводах виникають при поздовжніх руйнування труб, які можуть відбуватися як по основному металу труб, так і в зоні зварних швів при утворенні корозійних «свищів», «гільйотинних» розривів. Аварійні викиди газу можуть загоратися.

Найнебезпечнішим аварійним пошкодженням промислового трубопроводу є «гільйотинний» розрив.

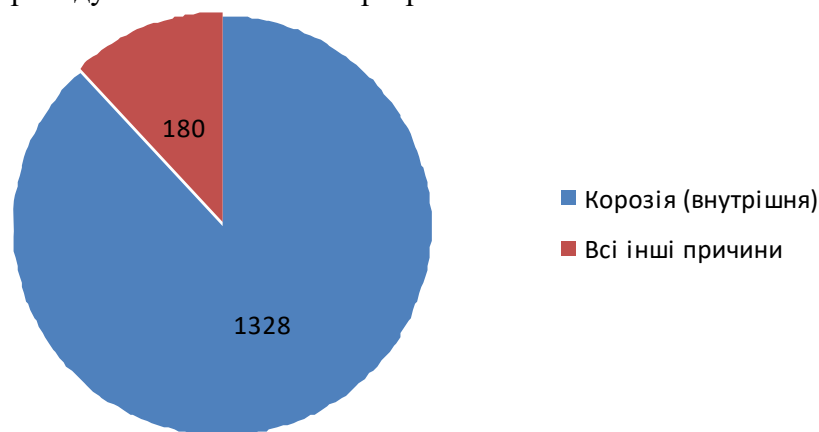


Рис. 2. Причини виникнення відмов

Для прогнозування масової витрати під час витікання газу при «гілльотинному» розриві трубопроводу можна використати рівняння нерозривності, руху та балансу енергії [12]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial \tau}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}(p + \rho v^2) = -\lambda \frac{\rho v^2}{2d_0} \\ \frac{\partial}{\partial \tau} \left[\rho \left(e + \frac{v^2}{2} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho v \left(h + \frac{v^2}{2} \right) \right] = \frac{4\alpha}{d_0} (T_0 - T) \end{cases} \quad (1)$$

де ρ – густина газу, кг/м³; τ – час, с; v – усереднена по перерізу швидкість газу; що транспортується, м/с; p – тиск, Па; e – питома внутрішня енергія, м²/с²; h – питома ентальпія, м²/с²; d_0 – внутрішній діаметр трубопроводу, м; α – коефіцієнт теплообміну з навколишнім середовищем, Вт/(м²·К); T – температура стінки трубопроводу, К; T_0 – температура навколишнього середовища, К; λ – коефіцієнт гідравлічного опору.

Для спрощених розрахунків та інженерної оцінки масової витрати газу при розриві трубопроводу застосовується рівняння Белла [13]:

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

де $G(\tau)$ і G_n – поточна та початкова масова витрата (в момент розриву), кг/с; τ – час, що пройшов з моменту розриву, с; Γ – чинник інерційної затримки ($\cong 0,5$); η – коефіцієнт збереження маси; ε – стала часу, с.

Для можливих наслідків від виникнення аварій на промисловому трубопроводі визначимо характер зміни масової витрати газу при розриві трубопроводу в залежності від діаметра, початкового тиску, часу та віддалі від місця пошкодження трубопроводу, використавши рівняння Белла. Результати розрахунків наведено на рис. 3 [13].

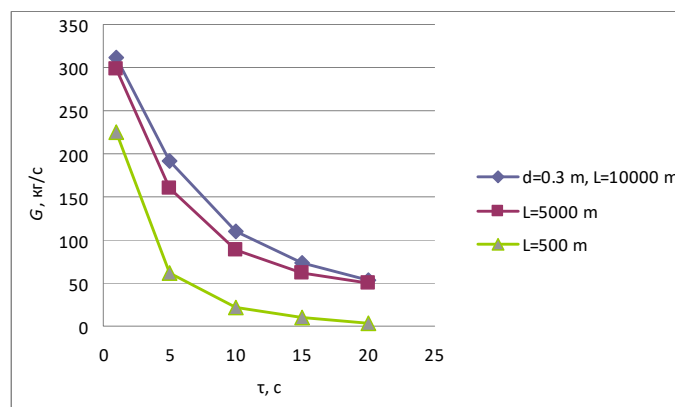


Рис. 3. Зміна масової витрати газу під час розриву трубопроводу діаметром 0,3 м

З аналізу рис. 3 можна зробити висновок, що при «гільйотинному» розриві промислового трубопроводу діаметром 0,3 м ймовірний початковий витік маси газу складає 320 кг/с, а через 5 секунд за максимальної довжини відключеної ділянки витік маси газу складає 190 кг/с, а за мінімальної довжини відключеної ділянки витік маси газу буде 60 кг/с.

Отже, чим більший діаметр, довжина відключеної ділянки та тиск на початку трубопроводу, тим більші втрати газу при «гільйотинному» розриві, що наносять значні збитки довіллю. Тому для забезпечення продовження терміну служби та безпечної експлуатації промислових трубопроводів зі значним терміном експлуатації потрібно коригувати тиски на початку трубопроводу. Для запобігання виникнення аварійної ситуації потрібно проводити детальну оцінку ризику її виникнення. Причини виникнення аварій на промислових трубопроводах поділяються на технічні та організаційні. Недотримання технології виробничого процесу та правил пожежної безпеки під час збирання та підготовки вуглеводневих енергоносіїв часто призводять до аварій, пов'язаних з організаційними причинами. Відступи від проектів під час монтажу установок для збирання та підготовки вуглеводневих енергоносіїв є технічними причинами виникнення відмов. Тому для безпечної експлуатації промислових трубопроводів потрібно проводити оцінку ризиків небезпеки.

Забезпечення безпечної експлуатації складається з таких етапів: прогнозування виникнення та розвитку аварійних ситуацій та оцінка ймовірностей їх виникнення; ймовірна оцінка кожної відмови трубопроводу; кількісний аналіз наслідків відмов; оцінка ризиків; порівняння розрахункових ризиків з допустимими та визначення ступеня безпеки системи. Маючи кількісні показники ризику потрібно забезпечити оптимальну експлуатацію промислового трубопроводу. Для цього проводяться заходи зі зниження рівня ризику до допустимого.

Кожен сценарій ризику – це як ланцюжок відмов : $V_1, V_2 \dots V_k$, де V_1 – початкова некритична відмова, яка може бути причиною другої некритичної відмови, але з більш важкими наслідками, ніж перша, або з критичними наслідками. Так на рис. 3 наведено, яких катастрофічних наслідків для довілля може мати «гільйотинний» розрив трубопроводу.

Прогнозування виникнення аварійних ситуацій та оцінка ймовірностей їх виникнення можна описати так:

$$V_{1,1} \rightarrow V_{2,1} \rightarrow \dots \rightarrow V_{i,1} \rightarrow \dots \rightarrow V_{k,1} \quad (3)$$

$$P_{1,2}^{(1)} \quad P_{2,3}^{(1)} \quad P_{i-1,i}^{(1)} \quad P_{i,i+1}^{(1)} \quad P_{k-1,k}^{(1)},$$

де $P_{1,2}^{(1)}$, $P_{2,3}^{(1)}$, $P_{i-1,i}^{(1)}$, $P_{i,i+1}^{(1)}$, $P_{i,i+1}^{(1)}$, $P_{k-1,k}^{(1)}$ – умовні ймовірності переходу системи з некритичної відмови до критичної.

Оцінка кожної відмови промислового трубопроводу проводиться для всіх можливих причин, що призводять до порушення його цілісності, а саме: внутрішньої та зовнішньої корозії, появи дефектів у стінці трубопроводів, відмови обладнання, дефекти матеріалу та якості будівництва. Для оцінки ризику під час експлуатації промислових трубопроводів широко використовується бальна методика, яка розроблена компанією Dow Chemical Co. [1]. За критерій ризику в методиці приймається відносний показник безпеки трубопроводу (relative index of pipeline safety – RIPS), Цей критерій обчислюється за п'ятьма індексами $\alpha_1, \dots, \alpha_4$ та β .

RIPS визначається за такою залежністю:

$$RIPS = \beta(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4), \quad (4)$$

де α_1 – характеризує антропогенний вплив на виникнення аварійних ситуацій; α_2 – індекс корозійної активності, характеризує внутрішню, атмосферну та ґрунтову корозію; α_3 – характеризує якість проєкту; α_4 – характеризує відмови через помилки диспетчерського персоналу; β – характеризує важкість наслідків аварій.

Слід зауважити, що індекси $\alpha_1, \dots, \alpha_4$ залежать від двох груп чинників. До першої групи належать чинники, на які неможливо вплинути. До другої групи віднесені чинники, на які можна впливати за допомогою технологічних та організаційних заходів. Для використання наведеної методики трубопровід розбивається на секції, у яких чинники практично незмінні. Критерій RIPS обчислюється для секції. Кожен з індексів $\alpha_1, \dots, \alpha_4$ може набувати значення від 0 до 100. Порівняння балів у кожній секції дає змогу зробити певні висновки відносно стану трубопровідної системи. Оскільки трубопроводи експлуатуються не один десяток років, то максимальне значення RIPS спостерігається при поєднанні чинників другої групи. Значний вплив на виникнення аварійних ситуацій, як наведено вище, має індекс корозійної активності α_2 .

Кількісний аналіз наслідків відмов складається з ідентифікації небезпек, оцінки частоти витікань та їх наслідків на довкілля, управління ризиком.

При оцінці ризиків враховується інформація з ймовірності небезпеки і її наслідків, які одержані на попередніх етапах, та визначається індивідуальний та соціальний ризику.

Для визначення частоти критичних відмов можна використати дані зібрані за роки експлуатації трубопроводу, що допоможе спрогнозувати частоту відмов з урахуванням основних чинників, що впливають на неї. Дані про пошкодження аналізуються для одержання статистичних розмірів дефектів та визначається ймовірність того, що даний дефект призведе до відмови конкретного трубопроводу.

Інформація про частоту таких пошкоджень дає змогу визначити частоту відмов F_f :

$$F_f = P_i \times P_f, \quad (5)$$

де P_i – частота інцидентів; P_f – ймовірність відмов.

На кінцевому етапі проводиться порівняння розрахункових ризиків з допустимими та визначається ступінь безпеки системи. Співставлення розрахункових ризиків з нормативними виконується з урахуванням чинників, які можуть впливати на результат.

В Україні для оцінки ризику та декларування безпеки об'єктів підвищеної небезпеки була розроблена «Методика визначення ризиків та їх прийнятних рівнів для декларування безпеки об'єктів підвищеної небезпеки», затверджена Наказом Міністерства праці та соціальної політики України № 637 від 04.12.2002. Методика містить аналіз небезпеки та умов виникнення аварій, оцінку ризику виникнення аварій, аналіз умов і оцінку ймовірності розвитку аварій, оцінку ймовірності наслідків аварій.

У цій методиці пропонується застосування окремих методів, таких як: дерево «відмов»; аналіз видів і наслідків відмов; оброблення статистичних даних про аварійність технологічної системи, що відповідають специфіці об'єктів підвищеної небезпеки чи виду діяльності; «що буде, якщо»?; «перевірочний лист»; аналіз експлуатаційної безпеки (HAZOP-аналіз); експертні оцінки імовірності виникнення події. Але Методика має ряд недоліків. Для визначення рівня екологічної безпеки слід використовувати екологічні показники, зокрема, метод загального оцінювання екологічного ризику, що описаний у ДСТУ ІЕС/ISO 31010:2013, і який дає змогу ідентифікувати можливі способи впливу небезпечного чинника на конкретний цільовий об'єкт.

До найбільш забруднюючих довілля відносяться підприємства нафтогазової галузі. Важливими категоріями при визначенні екологічної безпеки є показники, які класифікуються в залежності від ролі показника в оцінці конкретної діяльності.

Важливо під час визначення екологічної безпеки враховувати показники впливу окремих технологічних процесів на виникнення аварійної ситуації. Для цього використано класифікацію показників Європейської агенції з навколишнього середовища (DPSIR), а саме: рушійні сили (driving force); тиск (pressure); стан (state); вплив (impact); реагування (respon) [14]. Соціально-економічні чинники та види діяльності, що посилюють або зменшують навантаження на довілля, відносяться до рушійних сил. Антропогенне навантаження на довілля – тиск. Стан – тенденції змін навколишнього середовища. Наслідки зміни довілля для здоров'я населення, для природи характеризує вплив. Реагування – дії, що спрямовані на вирішення екологічних проблем. Соціальний і економічний розвиток створює тиск на довілля, що спричиняє зміни

довкілля та призводить до протистояння людського здоров'я, екосистем і матеріалів, які можуть спричинити негативну соціальну реакцію. Реакція підтримується рушійними силами через тиск на довкілля.

Для оцінки ризику під час експлуатації промислових газопроводів рушійні сили є індекси $\alpha_1, \dots, \alpha_4$, що створюють тиск – антропогенне навантаження на довкілля, яке спричиняє його забруднення. Це призводить до забруднення атмосферного повітря (стан), захворюваності населення, екологічних збитків (вплив). Лише екологічно безпечні технології мінімізують виникнення аварійних ситуацій в процесі експлуатації промислових трубопроводів (реагування).

Екологічні показники DPSIR спрямовані на підтримку всіх етапів розроблення екологічної політики. Отже, для оцінки ризиків небезпеки потрібно визначити технічні та екологічні ризики для елементів технологічних процесів та розробити методичні основи прогнозованої оцінки ризиків небезпеки.

Висновки

Визначено характер зміни масової витрати газу при розриві трубопроводу в залежності від діаметра, початкового тиску, часу та віддалі від місця пошкодження трубопроводу. Витік газу при розриві трубопроводу, що наносить збитки довкіллю, залежить від діаметра та довжини відключеної ділянки.

Для забезпечення продовження терміну служби та безпечної експлуатації промислових трубопроводів потрібно коригувати тиски на початку трубопроводу.

Під час оцінки ризиків важливо враховувати показники впливу окремих технологічних процесів на виникнення аварійної ситуації.

Література

1. Енергоекологічна безпека нафтогазових об'єктів / Р. М. Говдяк та ін. Івано-Франківськ: «Лілея НВ», 2007. 556 с.
2. Семчук Я. М., Савчук Л. Я. Захист атмосферного повітря від забруднень. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ. 2019. 198 с.
3. Optimal gas transport management taking into account reliability factor / V. Grudz, Ya. Grudz, V. Zapukhliak. *Systems in Production Engineering*. 2020. Vol. 28, No 3. P. 202-208. DOI: 10.2478/mspe-2020-0030.
4. Говдяк Р. М., Коснирєв Н. М. Кількісний аналіз аварійного ризику газотранспортних об'єктів підвищеної небезпеки. Львів: 2007. 158 с.
5. Стоєцький В. Ф., Дранишников Л. В. Прогнозування наслідків аварій на потенційно небезпечних виробничих об'єктах. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2013. № 43. С. 114-122.
6. Крижанівський Є. І., Кошлак Г. В. Екологічні проблеми енергетики. *Нафтогазова енергетика*. 2016. № 1 (25). С. 80-90.

7. Костанян В. Р., Горобинський С. В. Визначення ризиків виникнення нештатних ситуацій на технологічних об'єктах газотранспортної системи. *Нафтова і газова промисловість*. 2011. No3. С. 50-53.
8. Galyna Kryvenko, Yaroslav Semchuk, Halyna Lialiuk-Viter, Ivan Steliga. Ensuring the Environmental Safety of the Oil Pipelines Operation. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*. 2019. Vol. 6, No. 3. P.483-492.
9. Чернова О. Т., Кривенко Г. М. Аналіз небезпек під час розриву автоцистерни. *Розвиток транспорту*. 4(11). 2021. С.129-136.
10. Бегун В. В., Задача визначення поточного ризику об'єкта підвищеної небезпеки. *Математичні машини і системи*. 2011. № 1 С. 120-126.
11. Абрамов Ю. О., Тютюнник В. В., Шевченко Р. І. Моделювання процесу виникнення техногенної аварії на об'єктах підвищеної небезпеки нафтогазової промисловості. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2006. № 3. С. 5-18.
12. Frank M. White. Fluid Mechanics. Third Edition. 1994. 736.
13. Kryvenko G., Vozniak L. Forecast of gas mass flow rate in case of the industrial pipeline ruptures. *Journal of New Technologies in Environmental Science*. Multidisciplinary Scientific Edition. 2019. 3.vol. 2. 109-115.
14. Черба О. В. Відбір екологічних показників для інтегральної оцінки антропогенного впливу на довкілля. *Екологічні науки*. № 3 (36). 2021. С. 34-38.

Стаття надійшла до редакційної колегії 14.10.2024 р.

DANGER RISKS DURING THE OPERATION OF INDUSTRIAL GAS PIPELINES

G. M. Kryvenko, O. V. Kryvenko, Ya. M. Semchuk

*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas;
76019, Ivano-Frankivsk, Karpatska str. 15;
ph. +38(0342)72-71-58; e-mail: galyna.kryvenko@nung.edu.ua*

Ensuring the safety of pipeline transport of hydrocarbon energy carriers is one of the priority tasks in the oil and gas industry. Oil and gas pipelines are an integral part of technological schemes of oil and gas production facilities. Their total length coincides with the length of main pipelines. Therefore, special attention is paid to improving the safety of the operation of industrial pipelines. Safe functioning, operational analysis of the most dangerous limit states is a guarantee of the reliability of the operation of industrial pipelines. Man-made emergencies make the greatest contribution to the totality of emergency situations, therefore measures to respond, prevent and eliminate the consequences of man-made emergencies as the most widespread and threatening are necessary. The purpose of the work is to study

the risks of danger during the operation of industrial pipelines. To achieve the goal, the following tasks were solved: forecasting the mass flow of gas in the event of a pipeline rupture and risk assessment. The object of the study is an industrial pipeline with a significant service life. The causes of failures in pipeline systems are welding defects, mechanical damage, internal corrosion, and others. The most damaging accidents on pipelines occur in the case of longitudinal pipe fractures, which can occur both on the main metal of the pipes and in the zone of welds when corrosion "fistulas" and "guillotine" tears are formed. Emergency gas releases can catch fire. The nature of the change in the mass flow of gas during a pipeline rupture was determined depending on the diameter, initial pressure, time and distance from the place of damage to the pipeline. Gas leakage during a pipeline rupture, which causes damage to the environment, depends on the diameter and length of the disconnected section. To ensure extended service life and safe operation of industrial pipelines with a significant service life, it is necessary to adjust the pressures at the beginning of the pipeline. During risk assessment, it is important to take into account indicators of the impact of individual technological processes on the occurrence of an emergency situation.

Keywords: *industrial pipeline, forecasting, risk assessment, mass flow rate, hydrocarbon energy carriers, impact indicators.*