

УДК 621.532.4

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.1-52.1.25>

ЧИННИКИ НЕБЕЗПЕКИ ПІД ЧАС ЗБЕРІГАННЯ СКРАПЛЕНИХ ПРИРОДНИХ ГАЗІВ У РЕЗЕРВУАРАХ

Чернова О.Т., Кривенко Г.М.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
вул. Карпатська, 15, 76019, м. Івано-Франківськ
oksana.chernova@nung.edu.ua, galyna.kryvenko@nung.edu.ua

Технологічні операції, що проводяться на об'єктах зберігання та транспортування скраплених природних газів магістральними газопроводами за певних умов можуть створювати пожежну та вибухову небезпеку. Недотримання вимог безпечної експлуатації може призвести до виникнення вибухів та пожеж, які є причиною забруднення навколишнього середовища, травм та загибелі людей. Тому особливо актуальним є питання збереження здоров'я та життя обслуговуючого персоналу. Метою даної роботи є аналіз чинників небезпеки під час зберігання скраплених природних газів у наземних резервуарах. Для досягнення поставленої мети були сформульовані наступні завдання досліджень: аналіз небезпек під час зберігання скраплених природних газів; оцінка ймовірних негативних наслідків для здоров'я обслуговуючого персоналу. Об'єктом дослідження є наземні резервуари, призначені для зберігання скраплених природних газів. Предмет дослідження – чинники, що впливають на виникнення аварійних ситуацій. Проведено комплексний аналіз небезпек під час зберігання скраплених природних газів. Основною небезпекою виникнення аварії з резервуаром є вибух і пожежа, які можуть відбутися у разі порушення персоналом правил пожежної безпеки й реалізації небезпек зовнішніх чинників. Розраховано надлишковий тиск вибуху внаслідок аварійної розгерметизації резервуарів. Наведена кількісна оцінка умовної ймовірності різного ступеня ураження людини під впливом надлишкового тиску. Визначено ймовірність розриву барабаних перетинків та ймовірність летального наслідку для людини, спричиненого вибуховою хвилею. Наведено пробіт-функції при термічному ураженні людей та ймовірність ураження опіками. Результати наукових досліджень, викладені у цій статті, можуть використовуватися для аналізу питань безпечної експлуатації об'єктів, пов'язаних зі скрапленими природними газами, мінімізацією їх негативного впливу на довкілля та обслуговуючий персонал та забезпеченням охорони навколишнього середовища. *Ключові слова:* скраплений природний газ, резервуар, пожежна та вибухова небезпека, пробіт-функції, ймовірність ураження.

Danger factors during storage of liquefied natural gases in tanks, Chernova O., Kryvenko G.

Technological operations conducted on storage and transportation facilities for liquefied natural gas through main pipelines under certain conditions can pose fire and explosion hazards. Non-compliance with safety requirements may lead to explosions and fires, causing environmental pollution, injuries, and fatalities. Thus, the preservation of the health and lives of operating personnel is particularly pertinent. This study aims to analyze the danger factors during the storage of liquefied natural gas in aboveground storage tanks. To achieve this goal, the following research tasks were formulated: analysis of hazards during the storage of liquefied natural gas; assessment of potential adverse health consequences for operating personnel. The research object is aboveground tanks designed for storing liquefied natural gas. The subject of the study is factors influencing the occurrence of emergencies. A comprehensive analysis of hazards during the storage of liquefied natural gas was conducted. The primary risk of tank accidents is explosion and fire, which may occur due to operating personnel's violation of fire safety rules and the realization of external hazard factors. The explosion overpressure resulting from tank emergency depressurization was calculated. A quantitative assessment of the conditional probability of varying degrees of human injury under the influence of overpressure was provided. The probability of rupture of drum membranes and the likelihood of fatal outcomes for humans caused by the explosion wave were determined. Probit functions in thermal human injuries and the probability of burns were given. The results of scientific research outlined in this article can be utilized for analyzing safety issues in the operation of facilities associated with liquefied natural gases, minimizing their negative impact on the environment and service personnel, and ensuring environmental protection. *Key words:* liquefied natural gas, tank, fire and explosion hazard, probit functions, damage probability.

Постановка проблеми. Сьогодні скраплений природний газ (СПГ) відіграє все більш помітну роль на світовому ринку вуглеводнів. Зростання споживання СПГ обумовлене не лише відсутністю або дефіцитом власних енергетичних ресурсів у окремих країнах і регіонах, а й перш за все, значними перевагами СПГ перед іншими енергоносіями. Основною перевагою СПГ є можливість транспортувати його на великі відстані морем, здійснювати трансокеанські поставки і реалізовувати на ринках з найбільш привабливими цінами. Це особливо актуально для України, яка прагне зміцнити енергетичну безпеку.

Актуальність дослідження та зв'язок авторського доробку з важливими науково-практичними завданнями. Технологічні операції, що проводяться на об'єктах зберігання та транспортування СПГ магістральними газопроводами за певних умов можуть створювати пожежну та вибухову небезпеку. Адже зберігання та транспортування скраплених природних газів є небезпечними. Недотримання вимог безпечної експлуатації може призвести до виникнення вибухів та пожеж, які є причиною забруднення навколишнього середовища, травм та загибелі людей. Тому особливо актуальним є питання збереження здоров'я та життя обслуговуючого персоналу.

Для цього необхідно провести детальний аналіз чинників, що впливають на виникнення пожеж, вибухів, пов'язаних з технологічним середовищем – скрапленням природним газом, у випадку виникнення аварійних ситуацій. Це дасть змогу провести необхідні заходи та зменшити ймовірність виникнення небезпечних ситуацій. У цьому полягає практичне значення авторського доробку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Серед наукових робіт, присвячених проблемі гарантування безпеки під час експлуатації об'єктів підвищеної небезпеки, слід відмітити дослідження, наведені у [1, 2, 3]. Зокрема, у роботах [4, 5, 6] висвітлено проблеми екологічної безпеки у паливно-енергетичному комплексі України. Аналіз небезпек під час аварії зі скрапленням газом наведено у роботі [2]. У працях [7, 8] показано, що при відмові потенційно небезпечних об'єктів ударна хвиля є одним з чинників, що уражають, але не достатньо оцінюються й аналізуються небезпеки, пов'язані зі специфікою технологічних операцій зі скрапленими природними газами. Тому потрібно проаналізувати вплив чинників на виникнення ударної хвилі у випадку аварій, що може призвести до значних збитків, а головне створювати небезпеку для життя та здоров'я людей. З аналізу літературних джерел випливає, що техногенні чи антропогенні чинники можуть впливати на виникнення аварій, які супроводжуються загоранням СПГ, що призводить до негативних наслідків на довкілля. Адже небезпеки об'єкта дослідження зумовлені тим, що усередині резервуара знаходиться СПГ у рідкому та газоподібному стані.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. У літературних джерелах недостатньо висвітлені чинники, що впливають на виникнення аварійних ситуацій, які призводять до негативного впливу на довкілля, при зберіганні СПГ у наземних ізотермічних резервуарах.

Метою даної роботи є аналіз чинників небезпеки під час зберігання скраплених природних газів у наземних резервуарах. Для досягнення поставленої мети були сформульовані наступні завдання досліджень: аналіз небезпек під час зберігання СПГ; оцінка ймовірних негативних наслідків для здоров'я обслуговуючого персоналу. Об'єктом дослідження є наземні резервуари, призначені для зберігання СПГ. Предмет дослідження – чинники, що впливають на виникнення аварійних ситуацій.

Новизна та загальнонаукове значення. Новизна полягає у комплексному дослідженні чинників, що впливають на виникнення аварійних ситуацій під час зберігання СПГ у наземних резервуарах. Аналіз небезпек під час зберігання скраплених природних газів у комплексі з іншими дослідженнями дадуть змогу визначити потенційні загрози для обслуговуючого персоналу у разі вибухів та пожеж, що дасть можливість розробити заходи по запобіганню виникнення шкідливих впливів.

Викладення основного матеріалу. Сьогодні світовий ринок скрапленого природного газу розвивається дуже швидкими темпами. З'являються нові експортери та імпортери, удосконалюються технології скраплення газу, застосовуються найсучасніші інноваційні рішення та розробки у галузі транспортування і зберігання СПГ, нарощуються виробничі і регазифікаційні потужності, модернізується флот танкерів-газовозів. Перелік найбільших експортерів скрапленого газу у світі наведено на рис. 1 [9].

Слід відзначити, що проблеми безпеки під час транспортування і зберігання СПГ займають провідне місце в енергетичній безпеці, особливо в аспекті виробничої безпеки. Виробнича безпека гарантує захист від аварій, які супроводжуються пожежами та вибухами. Для гарантування безпеки на виробництві виникає необхідність проведення детального аналізу небезпек під час зберігання СПГ. Аналіз ризику виникнення аварій розглядається як складова комплексного підходу прийняття рішень для попередження та мінімізації небезпек для життя людини та погіршення якості довкілля.



Рис. 1. Найбільші експортери скрапленого газу у світі

Проведемо аналіз небезпек під час зберігання СПГ. Вихідною подією виникнення і розвитку аварій є розгерметизація обладнання, що спричиняє викидання парів СПГ з подальшим займанням. Виходячи з особливостей конструкції резервуара, можна розділити всі ризики на дві групи: ризики, пов'язані з впливом на зовнішній корпус; ризики, пов'язані з впливом на внутрішній корпус [10]. До зовнішніх чинників безпеки, здатних вплинути на характеристики міцності зовнішнього корпусу, слід віднести наступні: сейсмічна дія; гідродинамічний вплив; аеродинамічний вплив; зовнішній протиправний вплив; дія терористичного характеру; термічний вплив. Розглядаючи внутрішні чинники безпеки, здатні вплинути на характеристики міцності зовнішнього бетонного корпусу, слід зазначити тільки термічні. Це пов'язане з тривалим контактом зовнішнього корпусу з криогенною температурою у разі розгерметизації внутрішнього корпусу. Виходячи з особливостей внутрішнього резервуара, до основних небезпечних чинників, здатних впли-

нути на характеристики міцності внутрішнього корпусу, слід віднести: зовнішню сейсмічну дію; зовнішній баричний вплив; зовнішній термічний вплив в результаті пожежі на даху; внутрішній баричний вплив. У контексті даної небезпеки слід розуміти як зменшення, так і збільшення тиску у внутрішньому резервуарі. Однією з серйозних проблем, яка може вплинути на підвищення тиску у резервуарі, є проблема стратифікації СПГ, що виникає, як правило, при тривалому зберіганні СПГ у сховищі без перемішування або при закачуванні у резервуар СПГ з характеристиками (компонентний склад, густина, температура і ін.), відмінними від характеристик вже наявної у ньому рідини. У результаті розшарування відбувається поступове прогрівання щільнішого шару і подальше мимовільне змішування шарів з інтенсивним пароутворенням, що сприяє значному збільшенню тиску. Зменшення тиску у внутрішньому резервуарі можливе у результаті відкачування зі сховища СПГ у обсягах, що перевищують проектні значення. Окрім чинників, наведених вище, слід звернути увагу, що однією з основних причин порушення герметичності резервуара є механічний або корозійний знос електрохімічної природи, а також помилки обслуговуючого персоналу.

У інженерній практиці прогноз наслідків аварійного вибуху полягає у визначенні розмірів зон можливих втрат, ступеня впливу ударно-імпульсного навантаження на людину і обладнання. Визначимо умовну ймовірність різного ступеня ураження людини вибуховою хвилею. Основними параметрами, що характеризують вибухову хвилю, є надлишковий тиск Δp_ϕ , та імпульс хвилі тиску I .

Надлишковий тиск Δp_ϕ визначимо за методикою, наведеною у [11]:

$$\Delta p_\phi = p_0 \left(\frac{0,8 \cdot m_{np}^{0,33}}{r} + \frac{3 \cdot m_{np}^{0,66}}{r^2} + \frac{5 \cdot m_{np}}{r^3} \right), \quad (1)$$

де p_0 – атмосферний тиск, кПа; r – відстань від геометричного центра хмари газу, м; m_{np} – приведена маса газу, кг.

Приведена маса газу визначається за залежністю:

$$m_{np} = \left(\frac{Q_{zc}}{Q_0} \right) \cdot m_z \cdot Z, \quad (2)$$

де Q_{zc} – питома теплота згоряння метану, Дж/кг; Q_0 – константа, яка дорівнює $4,52 \cdot 10^6$ Дж/кг; Z – коефіцієнт участі газу у вибуху; m_z – маса газу, яка викидається у навколишнє середовище внаслідок аварії, кг.

Оскільки причиною аварій є розгерметизація обладнання, що спричиняє викидання парів СПГ з подальшим займанням, то розглянемо ймовірність виникнення негативних наслідків для людини, яка опинилася у зоні ураження.

Умовна ймовірність P шкідливого впливу негативного чинника на об'єкт залежить від пробіт-функції Pr . Пробіт-функція – це випадкова величина з математичним сподіванням 5 та дисперсією 1. Ймовірність виникнення негативних наслідків вира-

жається функцією, яка описує закон нормального розподілу ймовірностей:

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{Pr} e^{-(t-5)^2/2} dt, \quad (3)$$

де t – інтегральний ступінь впливу.

Визначимо ймовірність травмування людей за допомогою пробіт-функцій. Під час баричної дії вибуху на людину розглядається ураження органів дихання та слуху; ураження через удари об землю або перешкоду та обломками споруд. При ураженні органів слуху пробіт-функція розриву барабаних перетинок:

$$Pr = -12,6 + 1,524 \ln(\Delta p_\phi), \quad (4)$$

де Δp_ϕ – тиск на фронті ударної хвилі, Па.

Пробіт-функція летального наслідку для людини, спричиненого вибуховою хвилею, є такою [12]:

$$Pr = 5 - 0,26 \ln \left[(17500 / \Delta p_\phi)^{8,4} + (290 / I)^{9,3} \right], \quad (5)$$

де I – імпульс фази стиснення, Па·с.

$$I = \int_{\tau_0}^{\tau_0 + \tau} \Delta p dt, \quad (6)$$

де τ_0 , τ – час прибуття фронту хвилі, тривалість фази стиснення, с.

Визначено пробіт-функції під час баричного ураження людей.

Отримано такі значення пробіт-функцій: $Pr_1 = 2,49$, $Pr_2 = -3,87$.

Визначимо ймовірність травмування повітряною хвилею людини, а саме: ймовірність розриву барабаних перетинок у людей, ймовірність летального наслідку для людини, спричиненого вибуховою хвилею. За розрахованими величинами пробіт-функції згідно [12] визначено ймовірність ураження. Ймовірність розриву барабаних перетинок у людей, що знаходяться на віддалі $r = 100$ м від геометричного центру хмари газу, складає 1,7%. Ймовірність летального наслідку для людини, спричиненого вибуховою хвилею, близька до нуля.

Особливу увагу потрібно звернути на загоряння аварійних викидів газу та визначити ймовірність ураження опіками обслуговуючого персоналу. Визначимо пробіт-функції Pr при термічному ураженні людей з опіками I, II і III ступенів за залежністю [13]:

$$Pr = a + b \cdot \ln(\tau \cdot q^{4/3}), \quad (7)$$

де $(\tau \cdot q^{4/3})$ – доза теплової взаємодії, $[q]$ – В/м²; $[\tau]$ – с,

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

Результати розрахунків наведено на рисунку 2.

На рис. 2 наведено значення пробіт-функцій при термічному ураженні людей з опіками I, II і III ступенів (ураження 10 % шкірного покриву).

За розрахованими величинами пробіт-функції згідно [12] визначено ймовірність ураження.

Ймовірність ураження опіками I ступеня складає 10,5 %, II ступеня – 30,1%, III ступеня – 40,6%.

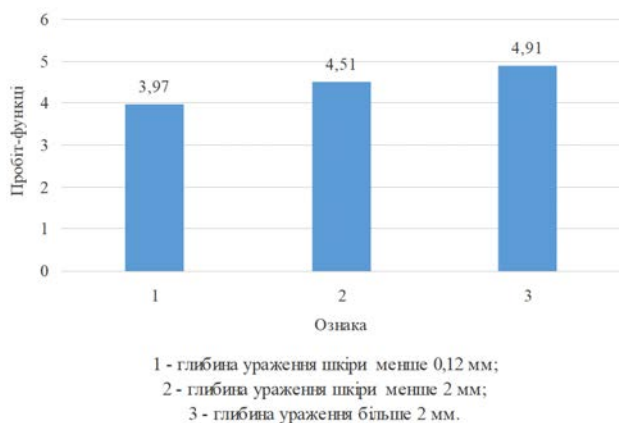


Рис. 2. Пробіт-функції термічного ураження 10% шкірного покриву

Отже, проведення заходів для підвищення безпеки під час зберігання СПГ в наземних ізотермічних резервуарах, дозволить мінімізувати їх негативний вплив на довкілля та обслуговуючий персонал. Гарантування техногенної безпеки недостатнє лише

засобами технічного захисту. Потрібно провести комплексне дослідження чинників, що впливають на виникнення аварійної ситуації на даному об'єкті, при виконанні певної технологічної операції.

Висновки. Проведено комплексний аналіз небезпек під час зберігання скраплених природних газів. Основною небезпекою аварії з резервуаром є вибух і пожежа, які можуть відбутися у разі порушення персоналом правил пожежної безпеки й реалізації небезпек зовнішніх чинників.

Визначено ймовірність ураження людей вибуховою хвилею за значенням пробіт-функції для відстані 100 м від осередку вибуху. У разі виникнення вибухової хвилі ймовірність розриву барабанних перетинків у людей складає 1,7%. Ймовірність летального наслідку для людини, спричиненого вибуховою хвилею, близька до нуля. Визначено пробіт-функції при термічному ураженні людей. Ймовірність ураження опіками III ступеня складає 40,6%.

Перспективи використання результатів дослідження. Проведені дослідження допоможуть гарантувати безпеку обслуговуючому персоналу під час експлуатації об'єктів підвищеної небезпеки. Подальші дослідження передбачають комплексну оцінку небезпек об'єктів у нафтогазовій галузі.

Література

1. 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.
2. Чернова О. Т., Кривенко Г. М. Аналіз небезпек на газонаповнювальних пунктах. *Екологічні науки: науково-практичний журнал*. Випуск 4 (31). 2020. С. 120-124.
3. Ференц Н. О., Павлюк Ю. Е. Пожежна профілактика технологічних процесів. Львів. 2019. 332 с.
4. Енергоекологічна безпека нафтогазових об'єктів / Р. М. Говдяк та ін. Івано-Франківськ: «Лілея НВ». 2007. 556 с.
5. Крижанівський Є. І., Кошляк Г. В. Екологічні проблеми енергетики. *Нафтогазова енергетика*. 2016. № 1 (25). С. 80-90.
6. Білинський Й. Й., Гордієнко О. А., Тітов Т. С., Сахно О. М. Скраплений газ в енергетичному комплексі України. *Вісник ВПІ*. 2018. № 4. С. 54-60.
7. Тарнавський А. Б. Оцінка уражаючих факторів при вибуху кисневого балона. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. 2014. № 9. С. 174-179.
8. Кривенко Г. М., Возняк М. П., Возняк Л. В., Кривенко С. О. Дослідження впливу діаметра трубопроводу на поширення ударної хвилі у аварійних ситуаціях. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 1(36). 2014. С. 110-117.
9. LNG –експансія. Чи зможе Україна виграти від поширення скрапленого газу в світі? Економічна правда. 2.07.2020 <https://www.epravda.com.ua/projects/gazpravda/2020/07/2/662452/>.
10. Snorre Sklet. Safety barriers: Definition, classification, and performance. *Journal of Loss Prevention in the process industries*. 2005. № 19. Р. 494-506.
11. Щиборовська М. Ю., Бабаджанова О. Ф., Пузанова А. В. Фактори небезпеки експлуатації газокompресорної станції. *International scientific journal «Grail of Science»*. 2021. № 10. С. 222-227.
12. Скоб Ю. О. Математичні тривимірні моделі та методи аналізу руху газоповітряних сумішей в задачах промислової аеродинаміки та екології. *Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук*. Харків. 2021. 45 с.
13. Кривенко Г. М., Возняк Л. В. Дослідження наслідків виникнення аварійних ситуацій на промислових трубопроводах. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2018. № 2 (36). С. 41-47.