Пожежна безпека
Fire Safety
ISSN 2078-6662 (print), ISSN 2708-1087 (online)
https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/PB

УДК 614.841
This article is an Open Access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 (CC BY 4.0) License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

DOI https://doi.org/10.32447/20786662.47.2025.09

В.-П. О. Пархоменко, Ю. Т. Судніцин, А. М. Домінік, Р. М. Конанець, Р. В. Пархоменко, Ю. В. Доманський
Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна

ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7431-4801 – В.-П. О. Пархоменко
https://orcid.org/0009-0002-4218-8446 – Ю. Т. Судніцин
https://orcid.org/0000-0003-0139-2002 – А. М. Домінік,
https://orcid.org/0000-0003-2360-4002 – Р. М. Конанець
https://orcid.org/0009-0008-2954-6767 – Р. В. Пархоменко
https://orcid.org/0009-0009-0330-6420 – Ю. В. Доманський
pvpo2018@gmail.com

АНАЛІЗ ВИРОБНИЦТВА СКРАПЛЕНОГО ПРИРОДНОГО ГАЗУ ТА ОСНОВНИХ НЕБЕЗПЕК ДЛЯ ПОЖЕЖНО-РЯТУВАЛЬНИХ ПІДРОЗДІЛІВ

Проблема. Сучасний глобальний ринок скрапленого природного газу **(**СПГ) глобалізується та переживає перехідний період через технологічні інновації, зростання попиту та вплив геополітичних факторів, як-от санкції та російська агресія проти України. В Україні розвиток СПГ посилює економічний потенціал, але збільшує ризики для критичної інфраструктури, включно з низкою небезпек для особового складу пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС України під час ліквідації пожеж і надзвичайних ситуацій (НС) на об'єктах зі зберігання та його виробництва. Також відсутній чіткий алгоритм дій для особового складу пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС України під час ліквідації НС і пожеж на об'єктах зі зберігання та виробництва СПГ, правил безпеки праці для особового складу під час таких оперативних дій та застосування сучасних технологій для проведення оперативних дій на таких об'єктах.

Мета – проаналізувати технологічний процес СПГ, визначити параметри зберігання в різних типах ємностей та їх характеристики, а також основні види небезпек для пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС України на об'єктах виробництва, транспортування та зберігання СПГ.

Методи дослідження. Дослідження проведено аналітичним методом з обробкою наукових публікацій, експериментальних даних, звітів міжнародних організацій щодо глобальних тенденцій ринку СПГ, класифікації технологій зберігання, її характеристик, моделювання визначення типів небезпек на об'єктах з виробництва, транспортування та зберігання СПГ, з якими може стикнутись особовий склад пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС України.

Основні результати дослідження. Відповідно до аналізу звітів міжнародних організацій глобальний ринок СПГ зріс на 2,4 % у 2024 року до 411,24 млн т; експортна потужність Північної Америки подвоїться до 28,7 млрд куб. футів/добу до 2029 р.; інвестиції з 2019 р. по жовтень 2025 р. – становили 380 млрд куб. м/рік. За результатами аналізу методичних матеріалів та інтернет-ресурсів визначено, що виробництво СПГ є багатостадійним процесом (очищення, осушення, охолодження). Зберігання: напівізотермічне (кріогенні резервуари 3–350 м³) та ізотермічне (одинарні, подвійні, мембранні, сферичні, заглиблені). Основні небезпеки технологічного процесу: низька температура зберігання СПГ в резервуарах, до –160 °С та можливе займання СПГ. Основні види небезпек, з якими може стикнутись особовий склад пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС України під час ліквідації пожеж чи надзвичайних ситуацій на цих об'єктах: тепловий вплив від пожежі (1000–1400 °С, > 50 кВт/м²), вибухова хвиля (зони до 1100 м), факельне горіння, розливи, крижаний вибух. Транспортування додає ризики аварій, під час яких можуть виникнути вищеперелічені небезпеки й термічні опіки від низької температури СПГ.

Висновки. Ринок СПГ демонструє стале зростання, здебільшого завдяки розширенню потужностей у Північній Америці, США та Катарі. Однак це супроводжується підвищеними ризиками для критич-

ної інфраструктури, що робить об'єкти СПГ потенційними цілями для атак. Виробництво СПГ – це багатостадійний процес, з поділом об'єктів за тоннажністю. Зберігання здійснюється в кріогенних резервуарах за температури –162...–165 °С.

СПГ, як кріогенна, легкозаймиста речовина, несе ризики пожеж, вибухів, розливів та утворення пароповітряних хмар. Ключові сценарії небезпек включають тепловий вплив (температури 1000–1400 °С, потоки > 50 кВт/м²), вибухові хвилі (зони руйнувань до 1100 м), факельне горіння, горіння розлитого СПГ та «крижані вибухи» з утворенням хвиль стиснення. Транспортування (авто, залізниця, морське) додає ризики аварій, обморожень та взаємодії з водою, що посилює випаровування.

У подальшому для розвитку цієї тематики перспективним було б сформувати детальний алгоритм дій особового складу пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС України для ліквідації НС на об'єктах з переробки, зберігання та транспортування СПГ, надати рекомендації для вибору вогнегасних речовин, безпеки особового складу за можливих повторних обстрілів на об'єктах і застосування сучасного обладнання для розвідки та гасіння пожеж.

Ключові слова: скраплений природній газ, надзвичайна ситуація, гасіння пожеж СПГ.

V.-P. O. Parkhomenko, Yu. T. Sudnitsyn, A. M. Dominik, R. M. Konanets, R. V. Parkhomenko, Yu. V. Domanskyi
Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine

ANALYSIS OF LIQUEFIED NATURAL GAS PRODUCTION AND MAJOR HAZARDS FOR FIRE AND RESCUE UNITS

Introduction. The modern global LNG market is undergoing rapid globalisation and a transitional period driven by technological innovations, rising demand, and geopolitical factors, including sanctions and Russia's full-scale aggression against Ukraine. In Ukraine, the development of LNG significantly strengthens economic potential and energy independence, but it simultaneously increases risks to critical infrastructure, creating a range of hazards for personnel of the State Emergency Service of Ukraine (SESU) during firefighting and emergency response at LNG storage and production facilities. Moreover, there is currently no clear operational algorithm for SESU personnel in managing emergencies and fires at LNG storage and production sites, no specific occupational safety rules for personnel during such operations, and no guidelines for the use of modern technologies in conducting emergency response at these facilities.

Purpose. To analyze the LNG technological process, determine the parameters of storage in different types of containers and their characteristics, as well as the main types of hazards for the fire and rescue units of the State Emergency Service of Ukraine at LNG production, transportation, and storage facilities.

Methods. The research was conducted using analytical methods with the processing of scientific publications, experimental data, reports of international organizations on global trends in the LNG market, classification of storage technologies, their characteristics, modeling of hazard types, at LNG production, transportation, and storage facilities that may be encountered by personnel of the fire and rescue units of the State Emergency Service of Ukraine.

Results. According to the analysis of reports from international organizations, the global LNG market grew by 2.4% in 2024 to 411.24 million tonnes; North America's export capacity is expected to double to 28.7 billion cubic feet per day by 2029; investments from 2019 to October 2025 amount to 380 billion cubic metres per year. An analysis of methodological materials and online resources has shown that LNG production is a multi-stage process (purification, dehydration, cooling). Storage is divided into semi-isothermal (cryogenic tanks of 3–350 m³) and isothermal (single-containment, double-containment, membrane, spherical, and buried tanks). The main technological hazards are the extremely low storage temperature of LNG in tanks (down to –160 °C) and the possibility of ignition. The primary hazards that personnel of the State Emergency Service of Ukraine (SESU) fire and rescue units may face during firefighting or emergency response at these facilities include: thermal radiation from fires (1000–1400 °C, > 50 kW/m²), blast waves (damage zones up to 1100 m), jet fires, spills, and ice explosions. Transportation introduces additional accident risks that can trigger all the above hazards, as well as cryogenic burns from the low temperature of LNG.

Conclusions. The LNG market demonstrates steady growth, primarily driven by the expansion of capacities in North America, the USA, and Qatar. However, this is accompanied by increased risks to critical infrastructure, making LNG facilities potential targets for attacks. LNG production involves a multi-stage process, with facilities classified by tonnage. Storage is carried out in cryogenic tanks at temperatures of –162 to –165 °C.

As a cryogenic and highly flammable substance, LNG poses risks of fires, explosions, spills, and the formation of vapour–air clouds. Key hazard scenarios include thermal radiation (temperatures 1000–1400 °C, heat fluxes > 50 kW/m²), blast waves (damage zones up to 1100 m), jet fires, pool fires from spilled LNG, and "ice explosions" generating compression waves. Transportation (road, rail, maritime) adds risks of

accidents, cryogenic burns, and rapid phase transition upon contact with water, which intensifies vaporisation.

For further development of this topic, it would be promising to formulate a detailed operational algorithm for personnel of the State Emergency Service of Ukraine (SESU) fire and rescue units for responding to emergencies at LNG processing, storage, and transportation facilities; to provide recommendations on the selection of extinguishing agents, personnel safety during possible repeated shelling of facilities, and the use of modern equipment for reconnaissance and fire suppression.

Key words: liquefied natural gas (LNG), emergency situations, fire extinguishing LNG.

Постановка проблеми. Сучасний газовий ринок дедалі більше глобалізується та переживає безперервний перехідний період після тривалого періоду адаптації та десятиліття, повного технологічних інновацій, які вплинули на весь ланцюг постачання, від видобутку до транспортування та розподілу. Тенденція до збільшення попиту на світовому ринку скрапленого природного газу підтверджується аналітичними звітами країн Європейського Союзу (ЄС) [1; 3], де наведено дані щодо експорту та перспектив щорічного виробництва СПГ у світі до 200 тонн на рік.

Однак на його розвиток і динаміку спричиняють вплив глобальні тенденції економічного та геополітичного характеру, дія непрогнозованих факторів, як-от пандемічні обмеження, впровадження санкцій, спричинених повномасштабною російською агресією проти України. Стрімкий розвиток ринку малотоннажного СПГ на території нашої держави є позитивним фактором для збільшення економічного потенціалу України як у мирний період, так і під час воєнного стану в Україні [4–7].

Однак зі значним поширенням використання СПГ збільшується і кількість небезпек, які можуть нести об’єкти зі зберігання та його транспортування. Оскільки ці об’єкти [8; 9] є важливими для критичної інфраструктури України, існує додаткова небезпека ударів з боку країни-агресора. Тому для особового складу пожежно-рятувальних підрозділів Державної служби України з надзвичайних ситуацій (ДСНС України) вивчення аналізу небезпеки об’єктів зі зберігання та транспортування СПГ має цінну практичну складову.

Аналіз останніх досліджень і публікації. Вивченням стану пожежної небезпеки об’єктів зберігання та транспортування СПГ присвячено ряд наукових праць. Так, у роботі [10] висвітлено дослідження небезпеки вибуху сферичних резервуарів підприємств нафтогазопереробної промисловості, де автори виділяють типи можливих аварій під час розгерметизації таких резервуарів та обґрунтовують зони дії надлишкового тиску вибуху у сферичному резервуарі з бутадієном, зокрема, зона повних руйнувань і смертельного ураження персоналу становить 90 м, зона отримання травм різного ступеня важкості – до 230 м, а безпечна відстань – понад 250 м.

Дослідження проблематики небезпеки на газонаповнювальних пунктах розглянуто в роботі

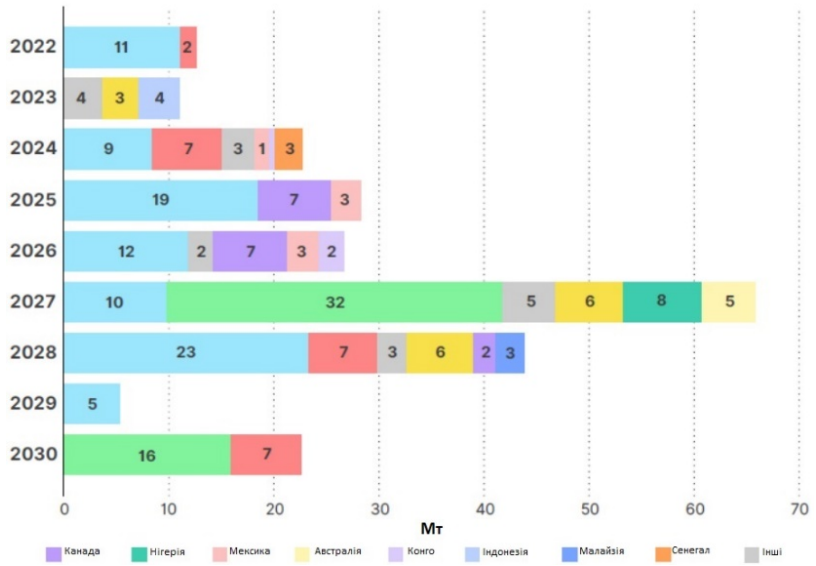

Рис. 1. Динаміка розвитку СПГ у світі до 2030 року

[11], де автори проводять аналіз енергетичного потенціалу й рівня небезпеки об'єктів газонаповнювальних пунктів, призначених для приймання СПГ із залізничних цистерн і автоцистерн, зберігання і його відвантаження. У роботі проведено розрахунок показників вибухонебезпеки (вибуху пароповітряної суміші) залізничної цистерни із СПГ місткістю 60 м^3, а саме енергетичний і відносний енергетичний потенціал вибухонебезпеки, загальну приведену масу горючої пари та тротиловий еквівалент. Ці результати слугують основою для вирішення питань безпечної експлуатації об'єктів, пов'язаних із СПГ.

У роботі [12] проаналізовано технологічні аспекти видобутку та зрідження природного газу в морських прибережних акваторіях за допомогою автономних плавучих заводів, підкреслено їх переваги над традиційними береговими установками, як-от зменшення витрат на інфраструктуру й уникнення довгих підводних трубопроводів. Основні результати вказують на доцільність модульного підходу до будівництва цих заводів, де основні роботи виконуються на верфях, а збірка модулів відбувається безпосередньо на платформах, що скорочує час проєктування та підвищує ефективність, при цьому акцент робиться на мінімізації розмірів обладнання для обмеженого простору суден.

У роботі [13] представлено оцінку безпеку процесів змішаного каскадного зрідження (ЗКЗ) у чотирьох фазах для СПГ за допомогою комплексного індексу вродженої безпеки та моделювання їх наслідків. Згідно з результатами, двоцикловий процес ЗКЗ-2 виявився найбезпечнішим варіантом, тоді як трицикловий ЗКЗ-4, що вважається сучасною технологією, посів друге місце. Основними вразливими елементами в усіх процесах визнані багатопотокові теплообмінники та компресори, а моделювання потенційних аварій показало, що струменева пожежа в ЗКЗ-4 може створити зону ураження радіусом 21,8 м у разі втрати герметичності. Результати корисні для розробників технологій та інженерів підприємств зі зберігання СПГ, оскільки підкреслюють необхідність посилення шарів захисту для зменшення ризиків.

Мета статті – провести аналіз технологічного процесу циклів СПГ; визначити параметри зберігання СПГ у різних типах ємностей, їх особливості та характеристики; визначити основні види небезпек для особового складу пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС України, які можуть бути на об'єктах із виробництва, транспортування та зберігання СПГ.

Виклад основного матеріалу. Згідно з даними Міжнародного газового союзу [14], глобальна торгівля скрапленим природним газом зросла на 2,4 % у 2024 році, досягнувши 411,24 млн тонн, що свідчить про стале збільшення виробництва й експорту, попри обмежену нову потужність. Це зростання обумовлене розширенням зріджувальних потужностей, зокрема в Північній Америці, де експортна потужність очікується подвоїтися з 11,4 млрд куб. футів на добу на початку 2024 року до 28,7 млрд куб. футів на добу до 2029 року [1]. З 2019 р. по жовтень 2025 р. було ухвалено рішення про інвестиції майже в 380 млрд куб. м/рік нової експортної потужності, що становить середньорічний приріст близько 55 млрд куб. м, переважно за реалізації проєктів у США та Катарі [2].

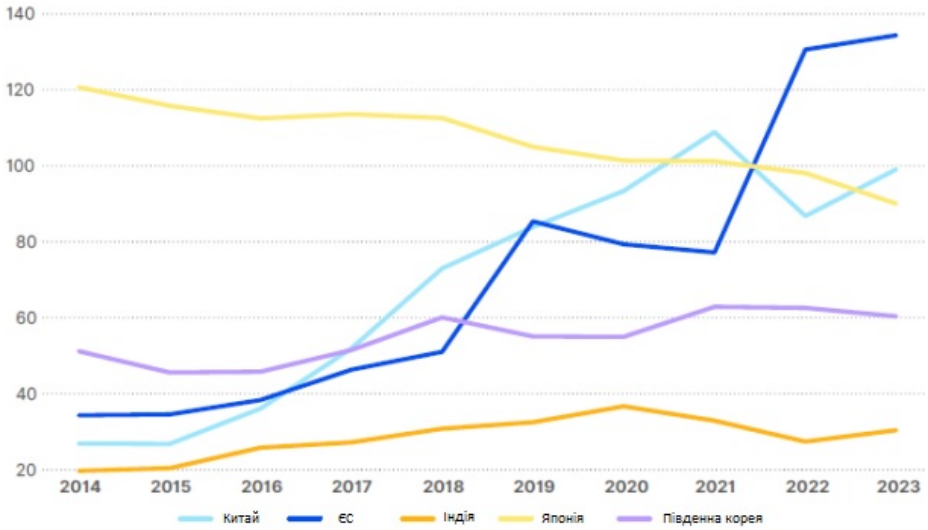

Рис. 2. Графік розподілу експорту СПГ найбільшими експортерами світу

Об’єкти зберігання та переробки СПГ являють собою високоспеціалізовані промислові комплекси, призначені для здійснення операцій з імпорту / експорту, зберігання, регазифікації (конверсії СПГ у газоподібну фазу) та подальшого розподілу природного газу. Ці комплекси охоплюють різноманітні типи терміналів, зокрема для пікового регулювання навантаження, термінали для забезпечення паливом транспортних засобів, резервуари для зберігання СПГ та ряд інших будівель і споруд, що забезпечують роботу цих об’єктів. Зазвичай такі споруди розміщуються в безпосередній близькості від портових зон або ключових транспортних вузлів з метою оптимізації логістики постачання СПГ. Вони забезпечують надійне зберігання СПГ за умов кріогенних температур у спеціально ізольованих резервуарах, а також реалізують процеси переробки для інтеграції газу в існуючі трубопровідні мережі [15].

Об’єкти зберігання та переробки СПГ належать до пожежовибухонебезпечних об’єктів, де навіть незначні інциденти можуть призвести до аварійних ситуацій з подальшими вибухами пароповітряних хмар, викидами парової та рідкої фаз, розливами та горінням СПГ.

Виробництво СПГ базується на виробничо-збутовому циклі, що передбачає виробництво, зберігання, транспортування, регазифікацію та споживання, яке поділяється на кілька технологічних операцій (рис. 4).

Виробництво скрапленого природного газу являє собою складний багатостадійний процес, що передбачає очищення, осушення й охолодження природного газу.

Перша технологічна операція в комплексі зі скраплення природного газу складається з очищення сировинного газу шляхом видалення домішок, наприклад води,

Рис. 3. Загальний вигляд об’єкту зберігання та переробки СПГ на прикладі підприємства Tokyo GAS Negishi LNG в м. Йокохама, Японія

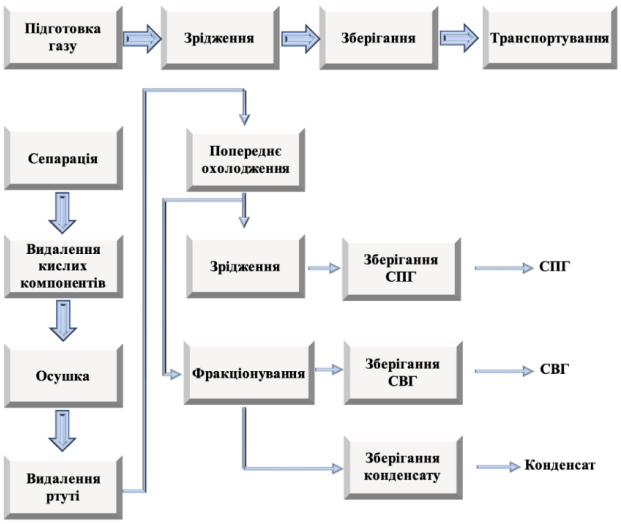

Рис. 4. Схема технологічного процесу виробництва СПГ

кислих газів (вуглекислого газу та сірчистого газу) і ртуті.

Друга технологічна операція – це видалення важких вуглеводнів або легкого конденсату в газофракційній установці.

В останній технологічній операції газ, який тепер являє собою переважно метан, надходить в основний потік газу через кріогенні теплообмінники, де він скраплюється шляхом охолодження приблизно до мінус 160 °С [16; 17].

Після скраплення СПГ поставляється в промислове сховище СПГ, з якого здійснюється відвантаження газу. Зі сховища СПГ газ відвантажується в кріоцистерни або танк-контейнери для відвантаження споживачеві.

Залежно від продуктивності установок скраплення і специфіки споживачів об'єкти СПГ умовно поділяються на великотоннажні, середньотоннажні й малотоннажні. Масштаб виробництва багато в чому визначає призначення, розміщення та розміри виробничих установок, технологічні процеси підготовки і скраплення газу, засоби транспортування СПГ, розміщення й розмір установок регазифікації.

Однією з відмінних рис об'єктів малотоннажного виробництва від об'єктів великотоннажного є наявність безпосередньо на об'єкті пунктів реалізації виробленої продукції. До складу об'єкта можуть входити як майданчики зливу-наливу СПГ з резервуарів у кріогенні пересувні автогазозаправники, так і кріогенний паливозаправний пункт для заправки транспортних засобів СПГ.

Існують різні конструктивно-технологічні схеми зберігання – напівізотермічне й ізотермічне зберігання. Загальною характеристикою резервуарів для зберігання СПГ є здатність зберігати газ за температури на рівні мінус 165–162 °С.

До кріогенних належать резервуари, призначені для накопичення, зберігання під надлишковим тиском, транспортування та видачі споживачеві кріогенної рідини (напівізотермічне зберігання).

До ізотермічних належать резервуари для зберігання великих обсягів СПГ за температури кипіння ив тиску, близькому до атмосферного, що складаються з концентрично розташованих внутрішнього і зовнішнього сталевих корпусів, класифікація яких представлена на рис. 5.

Усі види резервуарів для зберігання СПГ являють собою подвійні контейнери, де внутрішня частина перебуває в контакті з СПГ і виконується з холодостійкої сталі, зовнішня оболонка може виконуватися з вуглецевої сталі. Простір між оболонками заповнюється ізоляційними матеріалами.

Розмір стаціонарних ємностей для зберігання СПГ, що пропонуються на ринку, сильно диференційований залежно від сфери застосування.

Стаціонарні резервуари СПГ експлуатуються у складі систем:

– зрідження природного газу;

– сховищ СПГ;

– резервуарів зберігання та видачі СПГ у складі АЗС СПГ;

– систем автономного й резервного теплоенергозабезпечення з використанням СПГ.

Напівізотермічне зберігання здійснюється у двошарових резервуарах СПГ і резервуарах СПГ в кожусі, які мають істотну відмінність за конструктивним виконанням, а саме:

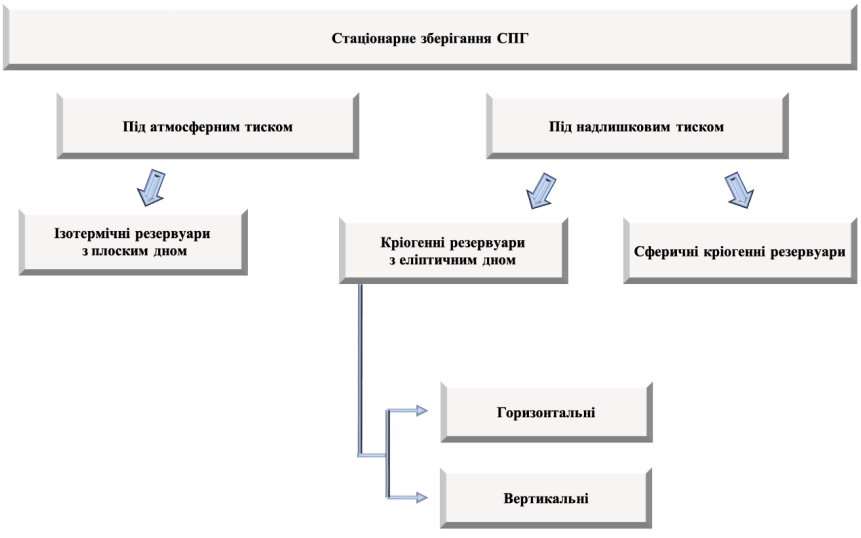

Рис. 5. Класифікація стаціонарних сховищ для зберігання СПГ

– двошаровий резервуар для зберігання СПГ обладнаний термоізоляційним кожухом, призначений для забезпечення вакуумної ізоляції і забезпечує в разі розгерметизації робочої (внутрішньої) посудини утримання в міжстінному просторі рідкої фази СПГ і контрольоване скидання парів СПГ в атмосферу із зазначеного простору через скидну трубу (труби) технологічної системи АЗС.

Кріогенні резервуари можуть бути встановлені в технологічній лінії зі скраплення газу, в системах АЗС СПГ або в системах резервного енергозабезпечення. Кріогенні резервуари можуть мати як горизонтальне, так і вертикальне виконання (рис. 6).

Конструкції виконуються двостінними з екранно-вакуумною або порошково-вакуумною ізоляцією. Об'єм таких резервуарів становить від 3 до 350 м^3, робочий тиск – 0,2–3,7 МПа.

Ізотермічні резервуари для зберігання скраплених газів за температури кипіння та тиску, близькому до атмосферного, класифікують за обсягом продукту, що зберігається, за кількістю контурів утримання аварійного розливу продукту, що зберігається (перешкод для вільного розливу рідкого продукту) і за конструктивним виконанням даху внутрішнього корпусу.

За обсягом (місткістю) продукту, що зберігається, ізотермічні резервуари поділяють на три основні типи:

– малотоннажні – об'єм продукту менше ніж 5000 м^3;

– середньотоннажні – об'єм продукту від 5000 м^3, але менше за 60 000 м^3;

– великотоннажні – від 60 000 м^3 і вище.

За кількістю контурів стримування можливого аварійного розливу продукту ізотермічні резервуари поділяють на три основні типи:

1) «одинарного утримання», містить:

– внутрішній силовий корпус, розрахований на стримування гідростатичного тиску рідини;

– зовнішній герметичний корпус, розрахований на стримування надлишкового тиску газу над рідиною, але не розрахований на аварійний розлив продукту;

2) «подвійного утримання», містить:

– силовий корпус;

– відкриту захисну огороджувальну стінку (або закриту навісом від попадання атмосферних опадів), розраховану на стримування аварійного розливу продукту по території підприємства;

3) – «повного стримування», містить два силові корпуси, концентрично розташовані один в одному, кожен з яких призначений для стримування гідростатичного тиску рідини:

– зовнішній корпус герметичний і розрахований на стримування тиску газу;

– внутрішній корпус може бути як герметичним, тобто мати власний герметичний стаціонарний дах, так і негерметичним і виготовлятися з паропроникним підвісним дахом, закріпленим на підвісках до даху зовнішнього корпусу ізотермічного резервуара.

Ізотермічні резервуари за конструктивним виконанням даху внутрішнього корпусу поділяють на два основні типи:

– з купольним самонесучим герметичним дахом внутрішнього корпусу;

– з підвісним паропроникним дахом внутрішнього корпусу.

Низькотемпературне зберігання СПГ здійснюють у підземних, заглиблених і надземних ізотермічних резервуарах, конструкції яких принципово відрізняються від конструкцій широко

а б

Рис. 6. Резервуари для зберігання невеликих обсягів СПГ у (а) вертикальному і (б) горизонтальному виконанні

застосовуваних резервуарів для зберігання нафти та нафтопродуктів із використанням холодостійких матеріалів і наявністю теплоізоляції.

Усі типи ізотермічних резервуарів для зберігання СПГ можуть мати два види конструкцій дахів:

– самонесучий (купольний) дах,

– підвісний плоский дах.

Підвісний дах кріпиться до крокв стаціонарного зовнішнього даху за допомогою підвісок.

Згідно з вищевказаними характеристиками ізотермічні резервуари для зберігання СПГ класифікуються таким чином:

– одинарні ізотермічні резервуари,

– подвійні ізотермічні резервуари,

– двошарові ізотермічні резервуари,

– мембранні ізотермічні резервуари.

Одинарний резервуар складається лише з одного (первинного) контейнера, який являє собою стійкий циліндричний резервуар із холодостійкої сталі та призначений для зберігання рідкого продукту (рис. 7). Зовнішня оболонка одинарного резервуара не здатна утримувати продукт, а призначена тільки для захисту ізоляції від атмосферних впливів [18].

Оскільки тільки внутрішня оболонка одинарного резервуара може витримати гідростатичний тиск СПГ, то в разі її пошкодження продукт витече назовні. Для утримання можливих розливів СПГ одинарний резервуар оточується захисною дамбою.

Двостінний резервуар складається з непроникного для рідини і парів первинного контейнера, що являє собою одинарний сталевий або бетонний резервуар, укладений всередині відкритого зверху, але непроникного для рідини вторинного контейнера. Вторинний контейнер проєктується таким чином, щоб повністю утримувати рідкий вміст первинного контейнера в разі його протікання.

Вторинний контейнер відкритий зверху, а отже, не здатний утримувати пари продукту. Простір між первинним і вторинним контейнерами може накриватися «дощовим щитом» для запобігання потрапляння дощової води, снігу, бруду тощо.

Двошаровий резервуар закритого типу складається з первинного (внутрішнього) і вторинного (зовнішнього) контейнерів, які разом утворюють єдиний резервуар-сховище.

Внутрішня ємність може бути відкритою зверху або мати підвісний дах для утримання парів продукту.

Зовнішня ємність може бути виконана як вільностоячий сталевий або залізобетонний резервуар, оснащений купольним дахом і розрахований на комбіноване виконання таких функцій.

За стандартної експлуатації резервуара – утримувати в собі термоізоляцію первинного контейнера і в разі первинного контейнера з відкритим верхом слугувати в ролі первинної парової герметизації резервуара.

У разі розгерметизації первинного контейнера вторинний повинен повністю утримувати продукт і зберігати паронепроникність конструкції.

Допускається контрольований викид парів в атмосферу системою скидання тиску. Міжстінний простір між первинним і вторинним контейнерами не повинен перевищувати 2,0 м.

Мембранний резервуар складається з тонколистового сталевого первинного контейнера (мембрани) з термоізоляцією і залізобетонного резервуара, що утворюють разом єдину складову конструкцію, яка забезпечує зберігання рідини.

Первинний контейнер (мембрана), що контактує з СПГ, являє собою оболонку, що складається з гофрованих у двох взаємно перпендикулярних

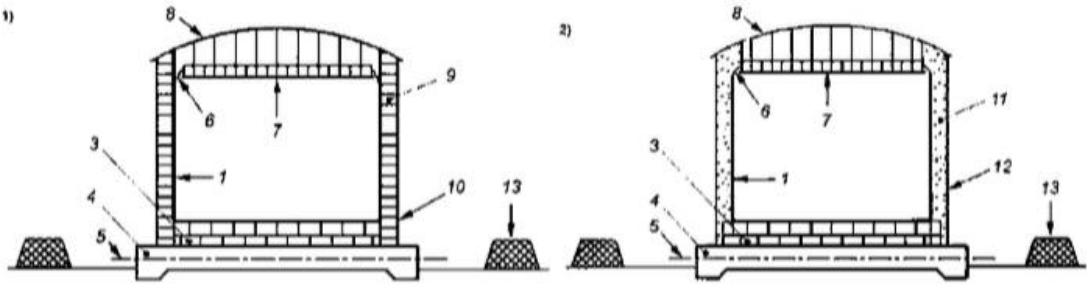

Рис. 7. Приклади резервуарів з одинарною оболонкою: 1 – первинний контейнер (сталевий), 3 – ізоляція дна, 4 – фундамент, 5 – система обігріву фундаменту, 6 – гнучке ізоляційне ущільнення, 7 – підвісне перекриття (ізольоване), 8 – дах (сталевий), 9 – зовнішня ізоляція оболонки, 10 – зовнішня водо- та пароізоляція, 11 – засипна ізоляція, 12 – зовнішня сталева оболонка (нездатна утримувати рідину), 13 – захисна дамба

напрямках листів нержавіючої сталі товщиною не менше ніж 1,2 мм. Ортогональні гофри компенсують температурні деформації, що робить мембрану нечутливою до теплових навантажень. Мембранна оболонка кріпиться на внутрішню сторону зовнішньої залізобетонної оболонки через шар ізоляції. Усі гідростатичні навантаження з мембрани передаються через ізоляцію на залізобетонний резервуар.

Пари утримуються дахом резервуара, який може мати таку ж складову конструкцію або являти собою газонепроникний купольний дах з ізоляцією на висячому даху.

Одним із видів наземних резервуарів є сферичні резервуари. Їхня куляста форма сприяє рівномірному розподілу напружень у стінках, мінімізує площу поверхні для зменшення теплового обміну з навколишнім середовищем та забезпечує компактність розміщення, що робить їх ефективними для промислових об'єктів з обмеженою територією. Серед основних характеристик – висока стійкість до слошингу (коливанню рідини) за часткового заповнення, завдяки чому можлива експлуатація в умовах морських платформ, а також об'єм від 500 до 3000 м³ для подвійних конструкцій, що забезпечує безпеку та надійність. Будова типового сферичного резервуара складається з алюмінієвої або сталевої оболонки, підтримуваної циліндричною опорою через перехідний з'єднувальний елемент, з ізоляцією на зовнішній поверхні для зменшення тепловтрат; у подвійних варіантах внутрішній резервуар (товщиною 20 мм) розміщується всередині зовнішнього (товщиною 12 мм), з міжшаровим простором, заповненим перлітовим піском та азотом для термоізоляції, а також спільною опорною колоною, розділеною на секції для мінімізації теплопередачі. Додаткові елементи структури охоплюють рельєфні клапани, системи пожежогасіння, процесні з'єднання, внутрішні опори для ізоляції та фундамент на бетонній основі для стабільності [19].

Різновидом наземних ізотермічних резервуарів є металеві вертикальні циліндричні резервуари, заглиблені частково або повністю в ґрунт. Конструктивно такі резервуари принципово не відрізняються від наземних мембранних резервуарів (рис. 9).

Дахи заглиблених і підземних резервуарів можуть бути двох типів:

– підвісна платформа (рис. 9, а);

– купольний дах з внутрішньою ізоляцією (рис. 9, б).

Аналогічно наземним мембранним ізотермічних резервуарів гофрована мембрана заглибленого резервуара забезпечує зберігання продукту й компенсацію температурних напружень, а ізоляція із жорсткого пінополіуретану обмежує проникнення тепла ззовні та передає внутрішні напруження з мембрани на зовнішню залізобетонну плиту.

Корпус підземних резервуарів піддається зовнішньому впливу ґрунту та води, тому залізобетон, що має високу межу міцності на стиск, є ідеальним матеріалом.

Для обмеження промерзання ґрунту навколо цього резервуара вбудовується контур із гарячою водою. Підземне розташування резервуара скорочує інтенсивність теплопритоків з атмосфери. Усі типи заглиблених і підземних резервуарів мають високий рівень безпеки. Підземні резервуари більш стійкі до сейсмічних коливань, що робить їх більш безпечними в районах, схильних до землетрусів. У разі аварійної розгерметизації резервуара весь СПГ залишиться нижче рівня землі [20].

Рис. 8. Приклад кулястого резервуару для зберігання СПГ

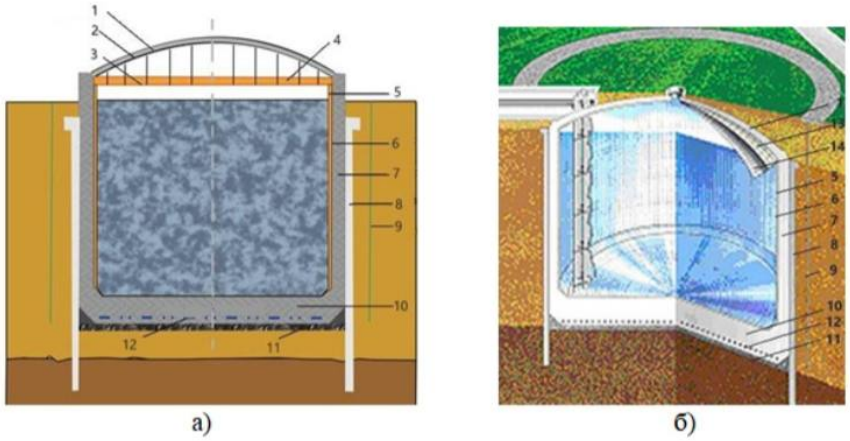

Рис. 9. Приклади заглибленого (а) і підземного (б) резервуарів:
1 – залізобетонний дах, 2 – сталевий дах, 3 – підвісна платформа, 4 – теплоізоляція зі скловати, 5 – тверда поліуретанова ізоляція, 6 – мембрана з нержавіючої сталі, 7 – залізобетонна стінка, 8 – залізобетонна шпунтова стінка, 9 – бічний підігрівач, 10 – залізобетонне дно, 11 – основа з гравію, 12 – підігрівач основи, 13 – ізоляція даху, 14 – мембрана даху

Потенційна небезпека під час поводження з СПГ переважно обумовлена трьома його важливими властивостями:

– СПГ – кріогенна рідина. За атмосферного тиску залежно від складу СПГ кипить за температури приблизно мінус 160 °С. За цієї температури пари СПГ мають більшу щільність, ніж навколишнє повітря;

– невеликі обсяги рідини перетворюються на великі обсяги газу. З одного об'єму СПГ утворюється 600 об'ємів газу;

– природний газ, як і інші газоподібні вуглеводні, є легкозаймистою речовиною. В умовах навколишнього середовища концентраційні межі займання суміші парів СПГ з повітрям становлять приблизно від 5 до 15 % за об'ємом газу. У разі накопичення газу в замкнутому просторі займання може призвести до детонації та ударної хвилі внаслідок надлишкового тиску.

Під час розгляду фізико-хімічних властивостей і показників вибухонебезпечності СПГ слід враховувати, що на практиці зазвичай доводиться мати справу з двофазною системою «рідина – газ (пара)».

Транспортування СПГ є також однією з важливих ланок виробництва, що відграє значну роль, оскільки більшість надзвичайних ситуацій виникають у процесі саме транспортування. Транспортування може здійснюватися різними методами. Найбільш використовуваним є транспортування за допомогою наземного транспорту та водного транспорту.

Розглядаючи наземний транспорт. можна відокремити два найбільш використовувані види: залізничний та автомобільний. Основні небезпеки під час перевезення цим транспортом утворюються через властивості зрідженого газу, а саме високу займистість, можливість вибухового розширення

Рис. 10. Схематичне зображення життєвого циклу СПГ від підприємства до споживача

газу. Також важливим аспектом виникнення надзвичайної ситуації є можливість потрапляння транспорту в аварії, які будуть призводити до займання та вибухів. У цьому випадку надзвичайні ситуації супроводжуватимуться як людськими жертвами, так і необхідністю залучення великої кількості техніки та особового складу [21–23].

Інша річ, коли йдеться про морські судна, як і в разі застосування наземного транспорту, зріджений газ несе небезпеку можливого займання та вибуху. Однак виникають додаткові небезпеки, наприклад кріогенна. Зріджений газ перевозиться за надзвичайно низьких температур, під час витоку можливе обмороження людей, а також конструктивних елементів судна, що призведе до крихкості матеріалів та подальшого їх руйнування. Також виникає проблема із взаємодією газу та води. Під час взаємодії вода прискорює випаровування газу, що може призвести до вибуху. Отже, в оперативно-рятувальної служби виникатимуть проблеми із залученням техніки, організацією ліквідації витоку, високим тепловим випромінюванням, викидом токсичних речовин продуктів згорання. Керівнику гасіння потрібно проводити постійний моніторинг території розливу газу та площі пожежі [24–27].

У разі розгерметизації обладнання та виходу СПГ в атмосферу внаслідок високої швидкості випаровування можуть утворюватися пароповітряні хмари великих розмірів, що залежать від кількості газу, який миттєво вийшов, або швидкості витікання, а також кліматичних умов (атмосферного тиску, швидкості вітру, температури та вологості повітря).

Найбільш імовірною причиною аварійного витоку продукту є порушення герметичності обладнання через недотримання технологічного процесу та несправності протиаварійних систем і пристроїв. Займання відбувається зазвичай від стороннього джерела запалювання, оскільки максимальна температура продукту нижча за температуру самозаймання.

Пожежі на об’єктах зберігання та переробки СПГ характеризуються можливістю прояву в різному поєднанні таких небезпечних сценаріїв:

- теплового впливу пожежі;
- впливу вибухової хвилі;
- факельного горіння палаючого газу;
- горіння розлитого СПГ;
- крижаного вибуху.

Тепловий вплив пожежі. Пожежі скрапленого природного газу створюють інтенсивне теплове випромінювання від великого, яскравого полум’я, що становить небезпеку для людей й споруд здалеку. Орієнтовний температурний режим становить 1000–1400 °С, але на деяких ділянках можливі й більші температури. Пожежі СПГ створюють здебільшого локальні теплові потоки, що на певних відстанях можуть становити та навіть перевищувати значення від 4 до 10–кВт/м^2 – усе залежатиме від відстані, площі пожежі та вітру [27]. Стандартний захисний одяг пожежного-рятувальника в середньому захищає від дії температури в межах від –40 до –185 °С та теплових потоків до 50 кВт/м^2 за умови нетривалого перебування.

Основними загрозами під час високих теплових потоків для рятувальників ДСНС є термічні

Рис. 11. Зображення пожежних-рятувальників під час ліквідації займання СПГ та їх захисту від теплового пливу

опіки. Отже, керівнику гасіння пожежі слід забезпечити безпечну відстань для гасіння пожежі від осередку полум'я або використовувати спеціалізований захисний одяг від підвищених теплових впливів, на кшталт тепловідбивного костюму, який за своїми характеристиками витримує температури до 1000 °С та теплові потоки понад 50 кВт/м^2 [28].

Вплив вибухової хвилі. Вибухова хвиля від скрапленого природного газу може спричинити значні руйнування будівель і конструкцій, а також призвести до значних жертв. Вона може виникнути в разі витоку легкозаймистої речовини, утворюючи хмару та пароповітряну суміш, яка, зі свого боку, взаємодіє з джерелом запалення. Для особового складу пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС України основними небезпеками можуть бути:

- високий тиск на органи та тканини тіла;
- уламки, які виникають під час вибуху;
- термічні опіки в разі виникнення вогняних куль і близького перебування до місця її виникнення.

Керівнику гасіння пожежі потрібно постійно контролювати процес гасіння, чи не виникає витоку газів, а також своєчасно приймати рішення щодо негайної евакуації особового складу із зони можливого ураження від вибуху [29].

Факельне горіння палаючого газу. Під час пожеж скрапленого природного газу на трубопроводах, запірній арматурі тощо можливе виникнення факельного горіння. Основною небезпекою факельного горіння газу є висока температура. Найефективнішим методом гасіння буде контрольоване самовигорання, якщо відсутня небезпека займання сусідніх будівель і споруд. Факел генерує інтенсивне теплове випромінювання, що може призвести до термічних опіків. Також існує загроза вибуху у випадку різкого викиду газу, що створює загазованість і пароповітряну суміш, яка має властивість вибухати в разі контакту з джерелом займання. Під час гасіння керівник має організовувати охолодження резервуарів, запірних арматур тощо. Також можливе наближення рятувальників за використання розпилювальних струменів водяних стволів високої витрати, що створюють водяну завісу, захисний екран. Наблизившись впритул, рятувальники мають можливість провести необхідні дії для швидкої ліквідації події, наприклад перекрити витік водню, збити полум'я з використанням порошкового вогнегасника тощо [30; 31].

Рис. 12. Зображення наслідків аварії на підприємстві зі зберігання СПГ після вибухової хвилі та займання

Рис. 13. Зображення факельного горіння СПГ

Рис. 14. Зображення пожежних-рятувальників під час ліквідації займання розлитого СПГ

Горіння розлитого СПГ. Горіння розлитого газу поширює пожежу на велику площу, відбувається викид великого теплового потоку, а також токсичних продуктів згорання [25; 32]. Ці загрози створюють для рятувальників значні труднощі під час ліквідації пожежі. Керівнику гасіння пожежі потрібно правильно побудувати тактику гасіння пожежі, врахувавши необхідну кількість засобів для гасіння; забезпечити особовий склад тепловідбивним костюмами, оскільки цей тип пожежі супроводжуватиметься високими температурними режимами та тепловими потоками, а також передбачити можливі сценарії погіршення процесу гасіння, наприклад вибух, факельне горіння газу тощо.

Крижаний вибух. У разі витоку рідкого метану в атмосферу він закипає і поступово переходить у газоподібний стан. Унаслідок конденсації утворюється добре видимий білий туман. СПГ спочатку поширюється по землі, оскільки за температури нижче мінус 135 °С він важчий за повітря. Поступово СПГ нагрівається, що призводить до зменшення його щільності. У разі загоряння таких хмар може відбуватися їх швидке згоряння без вибуху у вигляді спалаху або згоряння з вибухом з утворенням хвилі стиснення (рис. 15).

Спалювання з вибухом з утворенням хвилі стиснення може відбутися, коли пароповітряною хмарою охоплені захаращені ділянки території (напівзамкнуті обсяги, технологічне обладнання з високою щільністю розміщення, лісові масиви), а також унаслідок попадання в хмару відкритих довгих труб, порожнин, каверн.

У разі розгерметизації технологічного обладнання, у якому скраплений газ перебуває під тиском, утворюються пароповітряні струмені, загоряння яких призводить до утворення віялових струменевих факелів, а також струменевих

Рис. 15. Зображення пожежних-рятувальників під час ліквідації крижаного вибуху

Рис. 16. Зображення поширення хмари СПГ по місту в Північній Кореї та її займання

факелів, близьких до осиметричних. Вплив таких факелів, що мають часто велику довжину, на обладнання призводить до його пошкодження і залучення до горіння все більшої кількості газу.

За теплового впливу струменевого факела або палаючого проливу на резервуари зі скрапленим природним газом можливе їх руйнування з утворенням вогняних куль із великими радіусами смертельного ураження людей тепловим випромінюванням. У момент вибуху може виникнути реактивна поведінка самого резервуара, тобто переміщення резервуара на значну відстань із високою швидкістю. Реалізація цього сценарію можлива в разі відмови дихальної арматури резервуара [33].

Висновки. Ринок СПГ демонструє стале зростання (збільшення торгівлі на 2,4 % у 2024 році до 411,24 млн тонн), здебільшого завдяки розширенню потужностей у Північній Америці, США та Катарі. В Україні розвиток малотоннажного СПГ сприяє посиленню економічного потенціалу й енергетичної незалежності, особливо в умовах геополітичних викликів, як-от російська агресія та санкції. Однак це супроводжується підвищеними ризиками для критичної інфраструктури, що робить об'єкти СПГ потенційними цілями для атак.

Виробництво СПГ є багатостадійним процесом (очищення, осушення, охолодження до –160 °С), з поділом об'єктів на великотоннажні, середньотоннажні та малотоннажні. Зберігання здійснюється в напівізотермічних (кріогенних) та ізотермічних резервуарах різної конструкції (одинарних, подвійних, мембранних, сферичних, заглиблених), що забезпечують підтримку низьких температур (–162...–165 °С) і тиску. Ці системи мінімізують теплові втрати, але вимагають суворого дотримання норм безпеки для запобігання розгерметизації.

СПГ, як кріогенна, легкозаймиста речовина (межі займання 5–15 % у повітрі) несе ризики пожеж, вибухів, розливів та утворення пароповітряних хмар. Ключові сценарії передбачають тепловий вплив (температура 1000–1400 °С, потоки > 50 кВт/м²), вибухові хвилі (зони руйнувань до 1100 м), факельне горіння, горіння розлитого СПГ та «крижані вибухи» з утворенням хвиль стиснення. Транспортування (авто, залізниця, морське) додає ризики аварій, обморожень і взаємодії з водою, що посилює випаровування. Аналіз літератури показує значний енергетичний потенціал вибухів (наприклад, тротиловий еквівалент 7578 кг для цистерни 60 м³).

У подальшому для розвитку цієї тематики перспективним було б сформувати детальний алгоритм дій особового складу пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС України для ліквідації НС на об'єктах із переробки, зберігання та транспортування СПГ, адже чинна нормативна база не є повною та не забезпечує необхідною інформацією, на яку керівник гасіння пожежі чи НС повинен опиратись. Також потрібно надати рекомендації щодо вибору вогнегасних речовин, безпеки особового складу за можливих повторних обстрілів на об'єктах і застосування сучасного обладнання для розвідки та гасіння пожеж.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Analysis of the European LNG market developments. 2024 Market Monitoring Repor. *ACER*. European Union Agency for the Cooperation of Energy Regulators. 2025. 50 p. URL: https://www.acer.europa.eu/monitoring/MMR/LNG_market_developments_2024.
2. Overview of the Global LNG market: Supply & Demand Dynamics. *LNG Protocol.* 2025. 12 p. URL: https://www.eurogas.org/wp-content/uploads/2025/04/LNG-Protocol-Brochure-12-pages.pdf.
3. Keliauskaitė U., McWilliams B., Sgaravatti G., Zachmann G. European natural gas imports. *Bruegel*. 2025. URL: https://www.bruegel.org/dataset/european-natural-gas-imports.
4. Бабічев А. В., Рахматіллаєва К. Б. Динаміка та перспективи розвитку світового ринку природ-

ного газу. *Проблеми економіки : зб. наук. праць*. Харків : НДЦІПР НАН України. 2025. № 1 (63). С .12–18. https://doi.org/10.32983/2222-0712-2025-1-12-18.

5. Скидан О., Кільніцька О., Яремова М., Старунська А. Регулювання цін на паливно-енергетичні ресурси як напрям зміцнення соціально-економічної та енергетичної безпеки Екраїни. *Сталий розвиток економіки : зб. наук. праць.* Хмельницький : УЕіП. 2023. № 2 (47). С. 216–225. https://doi.org/10.32782/2308-1988/2023-47-31.

6. Морозова І. Особливості сучасного світового ринку скрапленого природного газу. *Економіка та суспільство : зб. наук. праць*. Одеса : ВД «Гельветика». 2025. № 76. С. 1–10. https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-76-24.

7. Ярошевич М. А. Суспільно-географічні аспекти формування Східноєвропейського газового хабу : автореф. дисертації на здобуття наукового ступеня канд. географ. Наук : 11.00.02. Львів, 2020. 23 с. URL: https://lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2020/11/dis_yaroshevych.pdf.

8. Про критичну інфраструктуру : Закон України від 16.11.2021 № 1882-IX. *Відомості Верховної Ради України.* 2023. № 5, с. 31, стаття 13. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1882-20#Text.

9. Zaniewicz M., Moiseienko D. Ukraine's energy sector is a key battleground in the war with Russia. *Brooking.* 2025. URL: https://www.brookings.edu/articles/ukraines-energy-sector-is-a-key-battleground--in-the-war-with-russia/.

10. Ференц Н. О., Вовк С. Я., Лин А. С., Харишин Д. В. Дослідження небезпеки вибуху сферичних резервуарів підприємств нафтогазопереробної промисловості. *Пожежна безпека : зб. наук. праць*. Львів : ЛДУ БЖД, 2019. № 34. С. 91–95. https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.34.2019.15.

11. Чернова О. Т., Кривенко Г. М. Аналіз небезпек на газонаповнювальних пунктах. *Екологічні науки : зб. наук. праць.* Київ : ДЗ «ДЕАПОтаУ», АЕН України, 2020. № 4 (31). С. 120–124. https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.4-31.19.

12. Заблоцький Ю. В., Будашко В. В., Сагін А. С. Забезпечення технологічних операцій зі зрідженим природним газом під час його видобутку в морських прибережних акваторіях. *Автоматизація суднових технічних засобів : зб. наук. праць*. Одеса : НУ ОМА, 2024. № 29. С. 54–65. https://doi.org/10.31653/1819-3293-2024-1-29-54-65.

13. Narimani M., Baradaran S., Sobati M. Inherent safety assessment and consequence analysis of the Liquefied Natural Gas (LNG) Mixed Fluid Cascade (MFC) processes. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering.* 2024. Vol. 10. 100943. https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100943.

14. World LNG Report. *International Gas Union (IGU)*. London. UK. 2025. 167 p. URL: https://www.datocms-assets.com/146580/1751026179-igu-world-lng-report-2025-hr_dp_c.pdf.

15. Technical Evidence and Safety and Risk Assessment. The European Union's TEN-T programe LNG Masterplan for Rhine-Main-Danube. *LNG Masterplan Consortium.* 2015. 140 p. URL: https://www.danubecommission.org/uploads/doc/Presentations/2015/TWMG%2004-2015/04%20-%20Seitz%20-%202015-04-10_LNG.pdf.

16. Дьяченко Т. В. Транспортування та зберігання зрідженого природного газу : навчальний посібник. Одеса : Освіта України, 2017. 106 с. URL: http://ntit.ontu.edu.ua/wp-content/uploads/sites/56/2018/05/Dyachenko-T.V.-Transporturavannya-ta-zberezhennya-zhridzhenogo-prirodnogo-gazu.pdf.

17. LNG Bunkering: Technical and Operational Advisory. *ABS*. 68 p. URL: https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/advisories-and-debriefs/ABS_LNG_Bunkering_Advisory.pdf.

18. Sarmiento E. C. Diseño de Tanques de Almacenamiento de Gas Natural Licuado (GNL). Dep. de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla. Sevilla, Spain, 2018. 98 p. URL: https://ereding.etsi.us.es/bibing/proyectos/abreproy/91735/fichero/TFG-1735-COBO.pdf.

19. LNG Spherical Storage Tank Model. Oil & Gas Maintenance Training Aid. *DAC Worldwide*. US. 2021. URL: https://dacworldwide.com/product/lng-spherical-storage-tank-training-aid/.

20. Hydrogen, LNG Storage Tanks (Underground) Hydrogen, LNG Power Plant & Terminal. *Lloyds Engineering.* US. 2022. URL: https://www.lloydseng.com/lng-storage-underground.

21. Frittelli John, Parfomak Paul W. Rail Transportation of Liquefied Natural Gas: Safety and Regulation. *Congressional Research Service*. 2020. 25 p. URL: https://www.congress.gov/crs-product/R46414.

22. Emergency Response Guidebook. US Department of Transportation. 2024. 392 p. URL: https://www.phmsa.dot.gov/sites/phmsa.dot.gov/files/2024-04/ERG2024-Eng-Web-a.pdf.

23. NFPA 58 Liquefield ed Petroleum Gas Code. 2020. https://misafecanna.com/wp-content/uploads/2021/09/NFPA-58-20-LPG.pdf.

24. Pagonis D. N., Livanos G., Theotokatos G., et al. Open-type ferry safety system design for using LNG fuel. *J. Marine*. Sci. Appl. 15, 2016. P. 405–425. URL: https://doi.org/10.1007/s11804-016-1386-2.

25. Iannaccone T., Scarponi G., Jeong B., Cozzani V. Assessment of LNG Fire Scenarios on Board of LNG-Fuelled Ships. *Chemical Engineering Transactions (CET)*. 2021. Vol. 86. 6 p. URL: https://doi.org/10.3303/CET2186065.

26. Galieriková A., Kalina T., Sosedová J. Threats and risks during transportation of LNG on European inland waterways. *Transport Problems*. 2017. Vol. 12 (1). P. 73–81. https://doi.org/10.20858/tp.2017.12.1.7.

27. Dalaklis D. LNG Bunkering Accident Response. *GLBE 2021: The Global LNG Bunkering*

Experience. 2021. 45 p. URL: https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12419.22564.

28. Hang Yi, Sam Wang Evaluation of LPG Pool Fire Heat Flux – A Literature Review. *Fire Protection Research Foundation*. US. 2017. 44 p. URL: https://www.nfpa.org/education-and-research/research/fire-protection-research-foundation/projects-and-reports/evaluation-of-lpg-pool-fire-heat-flux.

29. Bohacikova V. Key lessons from LNG incidents for safer operations. *GEXCO*N. URL: https://www.gexcon.com/resources/blog/key-lessons-from-lng-incidents-for-safer-operations/.

30. Berrouane M. T., Louni Z. Safety assessment of flare systems by fault tree analysis. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2016. Vol. 51 (2). P. 12–17. URL: https://www.researchgate.net/publication/295092114_Safety_assessment_of_flare_systems_by_fault_tree_analysis.

31. Лазаренко О. В., Пархоменко В.-П. О., Сукач Р. Ю., Білоножко Б. В., Кусковець А. С. Конструктивні особливості та небезпека автомобілів на водневому паливі. *Пожежна безпека : зб. наук. праць*. Львів : ЛДУ БЖД. 2020. № 37. С. 52–57. URL: https://doi.org/10.32447/20786662.37.2020.08.

32. Pérez J., Correa S., Vicario J., Mayo C. Final Report on Training on Firefighting & LNG. Document № MONALISA 2.0_D4.6.6. 24 p. URL: https://stm-stmvalidation.s3.eu-west-1.amazonaws.com/uploads/20160420153049/ML2-D4.6.6-Training-LNG-Firefighting.pdf.

33. Dalaklis D. Best Fire-fighting Practices for LNG Bunkering Operations. Maritime Safety, *Health and Environment 2016 Conference*. Nyborg, Denmark. 2016. 45 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/307906918_Best_Fire-fighting_Practices_for_LNG_Bunkering_Operations.

REFERENCES

1. ACER. (2025). European Union Agency for the Cooperation of Energy Regulators. Analysis of the European LNG market developments. 2024 Market Monitoring Repor. 50. Retrieved from: https://www.acer.europa.eu/monitoring/MMR/LNG_market_developments_2024.

2. LNG Protocol. (2025). Overview of the Global LNG market: Supply & Demand Dynamics. 12. Retrieved from: https://www.eurogas.org/wp-content/uploads/2025/04/LNG-Protocol-Brochure-12-pages.pdf.

3. Keliauskaitė, B., Sgaravatti G., Zachmann G. (2025). European natural gas imports. Bruegel. Retrieved from: https://www.bruegel.org/dataset/european-natural-gas-imports.

4. Babichev, A. V., Rakhmatillaieva, K. B. (2025). Dynamika ta perspektyvy rozvytku svitovoho rynku pryrodnoho hazu [Dynamics and Prospects of the Development of the Global Natural Gas Market]. *Problemy ekonomiky: zb. nauk. prats. Kharkiv: NDTsIPR NAN Ukrainy*, 1 (63), 12–18. https://doi.org/10.32983/2222-0712-2025-1-12-18. [in Ukrainian].

5. Skydan, O., Kilnitska, O., Yaremova, M., Starunska, A. (2023). Rehuliuvannia tsin na palyvno-enerhetychni resursy yak napriam zmitsnennia sotsialno-ekonomichnoi ta enerhetychnoi bezpeky Ukrainy [Regulation of prices for fuel and energy resources as a direction of strengthening socio-economic and energy security of Ukraine]. *Stalyi rozvytok ekonomiky*. Khmelnytskyi. UEiP. 2 (47), 216–225. https://doi.org/10.32782/2308-1988/2023-47-31. [in Ukrainian].

6. Morozova, I. (2025). Osoblyvosti suchasnoho svitovoho rynku skraplenoho pryrodnoho hazu [Features of the modern global liquefied natural gas market] . Ekonomika ta suspilstvo. Odesa: VD “Helvetyka”. 76, 1–10. https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-76-24. [in Ukrainian].

7. Yaroshevych, M. A. (2020). Social and geographical aspects of the Eastern European Gas Hub formation. *Doctor's thesis*. Lviv. Retrieved from: https://lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2020/11/dis_yaroshevych.pdf. [in Ukrainian].

8. Verkhovna Rada of Ukraine (2021). Pro krytychnu infrastrukturu: Zakon Ukrainy vid 16.11.2021 № 1882-IX. [About critical infrastructure. Law of Ukraine from November 16, 2021 No. 1882-IX]. (2023) *Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy*, 5, 31. Art. 13. Retrieved from: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1882-20#Text. [in Ukrainian].

9. Zaniewicz, M., Moiseienko, D. (2025). Ukraine's energy sector is a key battleground in the war with Russia. Brooking. Retrieved from: https://www.brookings.edu/articles/ukraines-energy-sector-is-a-key-battleground-in-the-war-with-russia/.

10. Ferents, N. O., Vovk, S. Ya., Lyn, A. S., Kharyshyn, D. V. (2019). Doslidzhennia nebezpeky vybukhu sferychnykh rezervuariv pidpryiemstv naftohazopererobnoi promyslovosti [Explosive hazard of spherical tanks of oil and gas refining enterprises]. *Pozhezhna bezpeka*. Lviv. LDU BZhD. 34, 91–95. https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.34.2019.15. [in Ukrainian].

11. Chernova, G. M. (2020). Analiz nebezpek na hazonapovniuvalnykh punktakh [Danger analysis at gas filling stations]. *Ekolohichni nauky*. Kyiv. DZ “DEAPOtaU”. AEN Ukrainy. 4 (31), 120–124. https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.4-31.19. [in Ukrainian].

12. Zablotskyi, Y. V., Budashko, V. V., Sagin, A. S. (2024). Zabezpechennia tekhnolohichnykh operatsii zi zridzhenym pryrodnym hazom pid chas yoho vydobutku v morskykh pryberezhnykh akvatoriiakh [Ensuring technological operations with liquefied natural gas during its production in coastal sea water areas]. *Avtomatyzatsiia sudnovykh tekhnichnykh zasobiv*. Odesa. NU OMA. 29, 54–65. https://doi.org/10.31653/1819-3293-2024-1-29-54-65. [in Ukrainian].

13. Narimani, M., Baradaran, S., Sobati, M. (2024). Inherent safety assessment and consequence analysis of the Liquefied Natural Gas (LNG) Mixed Fluid Cascade (MFC) processes. *Case Studies in Chemical and*

Environmental Engineering, 10, 100943. https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100943.

14. World LNG Report. International Gas Union (IGU). (2025). London. UK. 167. Retrieved from: https://www.datocms-assets.com/146580/1751026179-igu-world-lng-report-2025-hr_dp_c.pdf.

15. Technical Evidence and Safety and Risk Assessment (2015). The European Union's TEN-T programe LNG Masterplan for Rhine-Main-Danube. *LNG Masterplan Consortium,* 140. Retrieved from: https://www.danubecommission.org/uploads/doc/Presentations/2015/TWMG%2004-2015/04%20-%20Seitz%20-%202015-04-10_LNG.pdf.

16. Dyachenko, T. V. (2017). Transportuvannia ta zberezhennia zridzhenoho pryrodnoho hazu [Transportation and storage of liquefied natural gas]. Odesa: Osvita Ukrainy. 106. Retrieved from: http://ntit.ontu.edu.ua/wp-content/uploads/sites/56/2018/05/Dyachenko-T.V.-Transporturavannya-ta-zberezhennya-zhridzhenogo-prirodnogo-gazu.pdf. [in Ukrainian].

17. ABS. (2021). LNG Bunkering: Technical and Operational Advisory. 68. Retrieved from: https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/advisories-and-debriefs/ABS_LNG_Bunkering_Advisory.pdf.

18. Sarmiento, E. C. (2018). Diseño de Tanques de Almacenamiento de Gas Natural Licuado (GNL). Dep. de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla. Sevilla, Spain. 98. Retrieved from: https://ereding.etsi.us.es/bibing/proyectos/abreproy/91735/fichero/TFG-1735-COBO.pdf.

19. LNG Spherical Storage Tank Model. Oil & Gas Maintenance Training Aid. DAC Worldwide. US. Retrieved from: https://dacworldwide.com/product/lng-spherical-storage-tank-training-aid/.

20. Hydrogen, LNG Storage Tanks (Underground) Hydrogen, LNG Power Plant & Terminal. Lloyds Engineering. US. Retrieved from: https://www.lloydseng.com/lng-storage-underground.

21. Frittelli John, Parfomak Paul. (2020). Rail Transportation of Liquefied Natural Gas: Safety and Regulation. Congressional Research Service. 25. Retrieved from: https://www.congress.gov/crs-product/R46414.

22. US Department of Transportation. (2024). Emergency Response Guidebook. 392. Retrieved from: https://www.phmsa.dot.gov/sites/phmsa.dot.gov/files/2024-04/ERG2024-Eng-Web-a.pdf.

23. NFPA 58. (2020). Liquefield ed Petroleum Gas Code. p. Retrieved from: https://misafecanna.com/wp-content/uploads/2021/09/NFPA-58-20-LPG.pdf.

24. Pagonis, D., Livanos, G., Theotokatos, G., et al. (2016). Open-type ferry safety system design for using LNG fuel. *J. Marine. Sci*. Appl. 15. 405–425. https://doi.org/10.1007/s11804-016-1386-2.

25. Iannaccone, T., Scarponi, G., Jeong, B., Cozzani, V. (2021). Assessment of LNG Fire Scenarios on Board of LNG-Fuelled Ships. Chemical Engineering Transactions (CET). Vol. 86. 6. https://doi.org/10.3303/CET2186065.

26. Galieriková, A., Kalina T., Sosedová J. (2017). Threats and risks during transportation of LNG on European inland waterways. *Transport Problems*, 12 (1), 73–81. https://doi.org/10.20858/tp.2017.12.1.7.

27. Dalaklis, D. (2021). LNG Bunkering Accident Response. GLBE 2021: The Global LNG Bunkering Experience. 45. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12419.22564.

28. Hang, Yi, Sam, Wang. (2017). Evaluation of LPG Pool Fire Heat Flux – A Literature Review. Fire Protection Research Foundation. US. 44. Retrieved from: https://www.nfpa.org/education-and-research/research/fire-protection-research-foundation/projects-and-reports/evaluation-of-lpg-pool-fire-heat-flux.

29. Bohacikova, V. Key lessons from LNG incidents for safer operations. GEXCON. Retrieved from: https://www.gexcon.com/resources/blog/key-lessons-from-lng-incidents-for-safer-operations/.

30. Berrouane, M., Louni, Z. (2016). Safety assessment of flare systems by fault tree analysis. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 51 (2), 12–17. Retrieved from: https://www.researchgate.net/publication/295092114_Safety_assessment_of_flare_systems_by_fault_tree_analysis.

31. Lazarenko, O. V., Parkhomenko, V-P. O., Sukach, R. Yu., Bilonozhko, B. V., Kuskovets, A. S. (2020). Konstruktyvni osoblyvosti ta nebezpeka avtomobiliv na vodnevomu palyvi [Design features and hazards of hydrogen fuel cell cars]. *Pozhezhna bezpeka*. Lviv. LDU BZhD. 37, 52–57 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.32447/20786662.37.2020.08.

32. Pérez, J., Correa, S., Vicario, J., Mayo, C. Final Report on Training on Firefighting & LNG. Document № MONALISA 2.0_D4.6.6. 24 p. Retrieved from: https://stm-stmvalidation.s3.eu-west-1.amazonaws.com/uploads/20160420153049/ML2-D4.6.6-Training-LNG-Firefighting.pdf.

33. Dalaklis, D. (2016). Best Fire-fighting Practices for LNG Bunkering Operations. Maritime Safety, *Health and Environment 2016 Conference*. Nyborg, Denmark. 45. Retrieved from: https://www.researchgate.net/publication/307906918_Best_Fire-fighting_Practices_for_LNG_Bunkering_Operations.

© В.-П. О. Пархоменко, Ю. Т. Судніцин, А. М. Домінік, Р. М. Конанець, Р. В. Пархоменко, Ю. В. Доманський

Оглядова стаття.

Стаття надійшла до редакції 10.09.2025

Стаття прийнята 05.10.2025

Статтю опубліковано 23.12.2025