

ОСОБЛИВОСТІ ВИБОРУ ІЗОТЕРМІЧНИХ РЕЗЕРВУАРІВ ДЛЯ ЗБЕРІГАННЯ СКРАПЛЕНИХ ПРИРОДНИХ ГАЗІВ

О.Т. Чернова

к.т.н., доцент кафедри «Транспортування та зберігання енергоносіїв»,
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
Івано-Франківськ, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-6424-7569

Анотація

Вступ. У наш час природний скраплений газ користується величезною популярністю у всіх сферах життя – опалення, приготування їжі, транспорт та багатьох інших. І причин для цього немало – екологічна чистота, зручність використання, низька вартість тощо. Родовища природного газу є не у всіх куточках Землі, тому виникла проблема його транспорту. Як відомо, газ при нормальних умовах перебуває у газоподібній фазі і займає значні об'єми. Скраплений природний газ, або скорочено СПГ, як прийнято називати його в енергетичній галузі (англ. Liquefied Natural Gas, скор. LNG) являє собою звичайний природний газ, охолоджений до температури -162°C (так звана температура скраплення) для зберігання і транспортування в рідкому вигляді. **Мета.** Дана стаття розширює аналіз особливостей вибору резервуарів для зберігання скраплених газів. Оскільки зберігається скраплений газ в ізотермічних резервуарах за температури кипіння, яка підтримується внаслідок випаровування СПГ, вибір ємностей для зберігання СПГ відіграє важливе значення у ланцюгу «транспортування – доставка газу». Отже, важливо безпечно та ефективно вибрати метод зберігання СПГ. **Результати.** У праці наведено дослідження науковців з проблем проектування й експлуатації сховищ для СПГ, статистичні параметри досліджень, динаміку розвитку газового ринку та структуру змін світових потужностей для експорту LNG. Охарактеризовано питання вибору способу зберігання значних обсягів скраплених природних газів та практики будівництва комплексів, класифікацію ємностей. Аналіз резервуарів, які на даний час використовуються у реалізованих міжнародних проєктах, показав, що серед великогабаритних резервуарів найбільш поширені конструкції повної герметизації, проте ізотермічні резервуари одинарної герметизації в низці випадків є не менш конкурентоспроможними, що забезпечує необхідний рівень безпеки зберігання за меншої вартості. **Висновки.** У даній статті показано, що вибір типу резервуару необхідно закладати на стадії проектування, враховуючи питання охорони праці та ідентифікації небезпек. Водночас ідентифікація небезпек ізотермічного зберігання СПГ вимагає аналізу досвіду експлуатації та конструктивних особливостей.

Ключові слова: скраплення, ізотермічний резервуар, випаровування, газ, зберігання, транспортування.

FEATURES OF CHOOSING ISOTHERMAL TANKS
FOR STORAGE OF LIQUEFIED NATURAL GASES

O.T. Chernova

Ph.D., Associate Professor at the “Transportation and Storage of Energy Carriers” Department,
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-6424-7569

Summary

Introduction. Nowadays, natural liquefied gas is very popular in all spheres of life – heating, cooking, transport and many others. And there are many reasons for this – environmental cleanliness, ease of use, low cost, and others. Natural gas deposits are not found in all corners of the Earth, so the problem of its transportation has arisen. As you know, gas under normal conditions is in the gaseous phase and occupies significant volumes. Liquefied natural gas or abbreviated LNG, as it is commonly called in the energy industry (Liquefied Natural Gas, abbreviated LNG) is ordinary natural gas cooled to a temperature of -162°C (the so-called liquefaction temperature) for storage and transportation in liquid form in the form. **Goal.** This article expands the analysis of the features of the selection of tanks for the storage of liquefied gases. Since liquefied gas is stored in isothermal tanks at the boiling temperature, which is maintained due to the evaporation of LNG, the choice of containers for LNG storage plays an important role in the transportation chain – gas delivery. Therefore, it is important to choose a safe and efficient LNG storage method. **The results.** The work presents the research of scientists on the problems of designing and operating storage facilities for LNG, statistical parameters of research, the dynamics of gas market development and the structure of changes in global capacity for LNG export, the issue of choosing a method of storing significant volumes of liquefied natural gases and the practice of building complexes, the classification of containers is characterized. The analysis of the tanks that are currently used in the implemented international projects showed that among the large-sized tanks, the most common designs are full sealing, but isothermal tanks with single sealing are in some cases no less competitive, providing the necessary level of storage security at a lower cost. **Conclusions.** This article shows that the choice of tank type must be made at the design stage, taking into account the issues of occupational safety and hazard identification. At the same time, identifying the dangers of isothermal storage of LNG requires an analysis of operating experience and design features.

Key words: liquefaction, isothermal tank, evaporation, gas, storage, transportation.

Вступ. Скраплювати природний газ люди навчилися на початку дев'ятнадцятого століття, коли Майкл Фарадей (відомий вчений у галузі електромагнетизму та електрохімії, чис ім'я увічнено в таких поняттях, як клітина Фарадея та одиниця вимірювання ємності СІ, Фарад) експериментував із різними типами газів. У 1820 році Фарадею вдалося перевести природний газ із газоподібного стану у рідкий, охолодивши його до температури 113 Кельвінів (-160°C).

Постановка проблеми. Нині скраплений природний газ (СПГ) відіграє все більш помітну роль на світовому ринку вуглеводнів. Зростання споживання СПГ зумовлене не тільки відсутністю або дефіцитом власних енергетичних ресурсів

в окремих країнах і регіонах, а й значними перевагами СПГ над іншими енергоносіями. По-перше, для здійснення поставки скрапленого природного газу немає необхідності будувати й обслуговувати систему газопроводів, в тому числі у важкодоступних районах. 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 та диверсифікувати імпорту російського газу. По-друге, скраплений природний газ характеризується більш високою якістю порівняно з трубопровідним. Це зумовлено тим, що в процесі скраплення відбувається очищення газу від шкідливих домішок і сірчистих сполук, тому у результаті виходить практично чистий газ із високим вмістом метану. По-третє, СПГ є найбільш екологічно чистим з вуглеводневих джерел електроенергії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сьогодні світовий ринок скрапленого природного газу розвивається дуже швидко. З'являються нові експортери та імпортери, удосконалюються технології скраплення газу, застосовуються найсучасніші інноваційні рішення та розробки в галузі транспортування і зберігання СПГ, нарощуються виробничі та регазифікаційні потужності, модернізується флот танкерів-газовозів.

Науковими дослідженнями з проблем проектування й експлуатації сховищ СПГ займалися такі вчені, як Б.С. Рачевський, В.С. Сафонов, О.М. Іванцов, А.Д. Двоїрис, Є.І. Яковлев, Г.Е. Одішарія, Б.В. Поповський, А.З. Майлер, Ю.І. Дешевих, А. Гермелес, Д. Мідер, Д. Хістенд, Дж. Ши, К. Бедус, Д. Моріссон, С. Бейтс та ін.. Але більшість робіт було виконано в 70–80-ті роки минулого століття, у них відсутній комплексний аналіз термодинамічних режимів резервуарів для СПГ.

У 70-ті роки ХХ-го століття радянські вчені вели роботу зі створення науково-технічної та нормативної бази для об'єктів зберігання і транспорту СПГ, але в подальшому з об'єктивних причин ці роботи припинилися.

Формулювання цілей статті. Зміна складу та температури СПГ у кожному шарі при зберіганні можна оцінити завдяки застосуванню матеріального та енергетичного балансу до окремих шарів [6]. Модель дає гнучкість у виборі будь-якої кількості видів до максимум 10. Передбачається, що в шарі плівки не накопичується маса, а СПГ в ділянці плівки знаходиться в термодинамічній рівновазі з еволюційними парами.

Матеріальний баланс:

Нижній шар –

$$\frac{d}{dt} [c_l \delta_l x_l(i)] = \frac{M_l}{A \cdot x_l(i) - k(x_l(i) - x_u(i))}, \quad (1)$$

Верхній шар –

$$\frac{d}{dt} [c_u \delta_u x_u(i)] = \frac{M_u}{A \cdot x_u(i) - M_v y(i) - k(x_u(i) - x_l(i))}. \quad (2)$$

У вищезгаданому рівнянні (1) для нижнього шару швидкість зміни складу виду оцінюється шляхом розгляду молярної швидкості потоку вантажу в нижній шар резервуара. Матеріальний баланс для верхнього шару записується аналогічним чином для нижнього шару (2) з єдиним додатковим терміном для молярної

швидкості випаровування від верхнього шару до парового простору. Коефіцієнт молярного випаровування з верхньої поверхні полягає в тому, що

$$M_v = \left[\frac{M_R(\bar{H}_B - \bar{H}_S) + f_Q \left(\frac{Q}{A} \right)}{(\bar{H}_V - \bar{H}_B)} \right], \quad (3)$$

де f_Q – частка загального теплового потоку, що передається в паровий простір, який повертається у рідину. Припускається, що він становить 95% [1; 5].

$$Q = q_l + q_v \pi D \delta_{vs}. \quad (4)$$

Ентальпія рідини та парової фази корелює з точки зору температури, з якої можна оцінити питому теплоту. Кореляції для ентальпії рідини та парової фази отримані з підручника з природного газу Medici [2].

За своєю теплотвірною здатністю 1 л СПГ еквівалентний 0,67 л бензину або 1,13 л дизельного палива. У даний час частка СПГ в балансі енергоносіїв невелика, але темпи зростання його споживання досить високі (близько 7% в рік, що удвічі вище, ніж для природного газу, і втричі, ніж для нафти) [3].

Виклад основного матеріалу. Під час проектування комплексів з підготовки та використання скрапленого природного газу неминує постає питання про вибір способу зберігання значних обсягів СПГ. Практика будівництва комплексів показує, що на частку резервуарів для зберігання СПГ припадає до 50% загальних капіталовкладень [4], тому аналіз та характеристика даного питання має важливе наукове та економічне значення.

Резервуари, які призначені для зберігання скраплених природних газів, фахівці класифікують за декількома ознаками:

- за конструктивним виконанням стінок резервуару – одностінні, двостінні, з внутрішньою мембраною;
- за конструктивним виконанням внутрішньої покрівлі – самонесучі та підвісні;
- за типом ізоляції – екранні, пористі, засипні, жорсткі;
- за вживаним матеріалом – металеві, залізобетонні, комбіновані.

Залежно від розташування резервуарів відносно поверхні материкового ґрунту сховища СПГ можуть бути підземні та надземні [8].

Аналіз показує, що в міжнародній практиці найбільшого поширення набули надземні вертикальні ізотермічні резервуари (ІР). Класифікація ІР для скрапленого природного газу за конструктивним виконанням наведена на рисунку 1.

Ізотермічні резервуари одинарної герметизації складаються з внутрішньої металевої ємності, непроникної для рідини, і зовнішньої ємності, непроникної для пари, що захищає теплову ізоляцію від атмосферних впливів [7]. Ізотермічні резервуари подвійної герметизації також складаються з внутрішньої металевої ємності, непроникної для рідини, і зовнішньої ємності. Зовнішня ємність відкрита зверху і, відповідно, не може перешкоджати витоку парів продукту. Міжстінний простір може накриватися «дошовим щитом» для захисту від опадів. У мембранних резервуарах внутрішня ємність являє собою виготовлену з аустенітної сталі оболонку товщиною не менше 1,2 мм, гофровану в двох взаємно перпендикулярних напрямках. Система гофрування допускає розширення і стиснення при теплових навантаженнях. Внутрішня поверхня не є повністю несучою, а спирається на

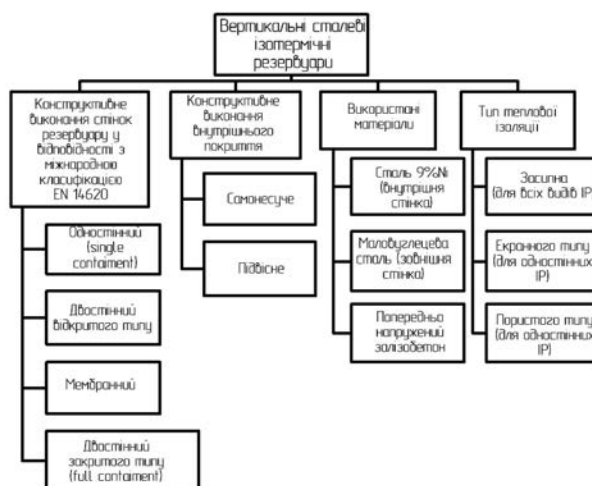


Рис. 1. Класифікація ізотермічних резервуарів для СПГ за конструктивним виконанням

тверду теплову ізоляцію, щільно прилягає до зовнішньої стінки. Зовнішня ємність складається із залізобетонної фундаментної плити, стінки з попередньо напруженого бетону і залізобетонного даху куполоподібної форми. Несуча здатність ємності забезпечується спільною роботою трьох таких шарів: внутрішньої стінки, теплоізоляції та зовнішньої стінки.

Резервуари закритого типу (або повної герметизації) складаються з непроникної для рідини внутрішньої ємності і зовнішньої ємності, непроникної для рідини і пари. Внутрішня поверхня може бути відкритою зверху або мати підвісне покриття. Зовнішня ємність являє собою сталевий або залізобетонний резервуар, оснащений купольною покрівлею, що розрахована на комбіноване виконання таких функцій [8]:

- в режимі штатної експлуатації служити як первинна парова герметизація резервуара (у випадку внутрішньої ємності з відкритою покрівлею) і містити в собі теплоізоляцію внутрішньої ємності;

- в разі розгерметизації внутрішньої ємності локалізувати розлиття СПГ і зберегти паронепроникність конструкції. Допускається викид парів в атмосферу за умови його контролю системою захисту від надлишкового тиску. Для сприйняття тиску рідини при розгерметизації внутрішньої ємності зовнішня залізобетонна стіна виконується з попереднім напруженням.

Напруження залізобетонної стінки здійснюється за допомогою пучків високоміцних сталевих канатів, прокладених у спеціальних внутрішніх жолобах і замоноличених розчином після натягу. Зовнішня ємність, виготовлена з попередньо напруженого залізобетону, повинна мати сталеве облицювання на внутрішній поверхні для забезпечення газонепроникності.

Для захисту від зовнішнього теплопритоку, що сприяє випаровуванню СПГ, застосовують теплоізоляцію. У конструкціях повної герметизації міжстінний простір заповнюється тепловою ізоляцією зі спученого перлітового піску. Для

часткової компенсації температурних деформацій внутрішньої ємності додатково влаштовується шар теплоізоляції з еластичного мінерального войлоку в обкладанні з металевої сітки на всій зовнішній поверхні ємності. У конструкціях ІР одинарної герметизації застосовують теплоізоляцію екранного або пористого типу.

Для захисту від атмосферних впливів ізоляцію обшивають тонкостінними алюмінієвими листами [9].

Вищеописані конструкції резервуарів наведені на рисунку 2.

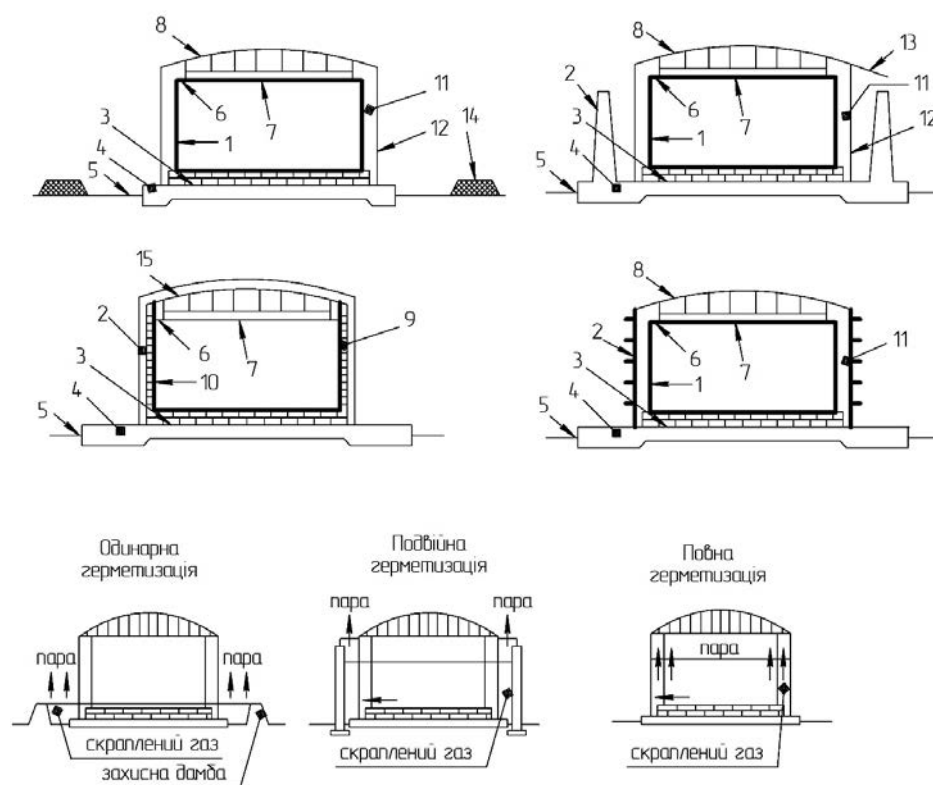


Рис. 2. Конструктивне виконання ізотермічних резервуарів
а) одинарна герметизація; б) подвійна герметизація; в) мембранний резервуар;
г) повна герметизація; д) схема герметизації ІР при витіканні продукту;
1 – первинний контейнер (сталевий); 2 – вторинний контейнер, розрахований на утримання від розлиття продукту; 3 – ізоляція дна;
4 – фундамент; 5 – система обігріву фундаменту; 6 – гнучке ізоляційне ущільнення; 7 – підвісне перекриття (ізольоване); 8 – стаціонарне накриття;
9 – несуча теплоізоляція; 10 – мембрана; 11 – засипна теплова ізоляція;
12 – зовнішня сталева оболонка, не здатна утримувати рідину; 13 – покриття «дощовий щит»; 14 – захисна дамба; 15 – залізобетонне покриття

Незалежно від типу герметизації резервуара покриття складається з зовнішньої купольної покрівлі, що спирається на корпус зовнішньої ємності, і внутрішнього підвісного перекриття, яке становить плоску конструкцію, підвішену до зовнішньої покрівлі над внутрішньою ємністю і несучою теплоізоляцією. Підвісна

покрівля кріпиться до крокв стаціонарної зовнішньої покрівлі за допомогою підвісок. В IP повної герметизації з підвісною покрівлею пари продукту вільно проникають в міжстінний простір, внаслідок чого надлишковий тиск газу приймає також і зовнішня ємність.

Конструкція зовнішньої покрівлі залежить від матеріалу зовнішнього корпусу [10]. При металевому корпусі в системах одинарної і повної герметизації купольна покрівля виконується з вуглецевої сталі з розрахунковою температурою експлуатації, що дорівнює мінімальній середній температурі найхолоднішого дня.

Якщо зовнішня ємність виготовлена з перенапруженого залізобетону, то купольна покрівля також виконується із залізобетону, монолітно сполученого з корпусом. Внутрішня поверхня всієї купольної покрівлі повинна бути облицьована вуглецевою сталлю для забезпечення герметичності і запобігання витоків пари СПГ. Каркас сталевих облицювань повинен мати достатню несучу здатність, щоб утримувати навантаження від ваги м'якого бетону в процесі його укладання та твердіння.

Фундаменти ізотермічних резервуарів мають два конструктивних рішення: фундамент на сваях, що складається зі свайового поля та монолітного фундаменту, який має нижню та верхню залізобетонні плити, з'єднані між собою колонами. Фундаменти передбачають наявність провітрюваного простору між плитами і ґрунтом. У разі використання залізобетонної зовнішньої ємності фундаментна плита є інтегрованою частиною ємності і жорстко пов'язана із зовнішньою стінкою [11].

Для запобігання підйому країв дна внутрішньої ємності під дією надлишкового тиску по периметру нижнього пояса внутрішньої ємності встановлюються анкерні кріплення.

Для здійснення всіх необхідних технологічних операцій при експлуатації IP обладнується відповідними патрубками. У сучасних закордонних конструкціях IP врізки і патрубки в дні і стінці резервуара (як зовнішніх ємностей, так і внутрішньої ємності) не дозволяються.

Під час проведення технологічних операцій зливу, наливу продукту, а також у процесі зберігання СПГ надлишковий тиск газу може відхилитися від проектної величини в бік вакууму або ж, навпаки, в бік підвищення. З цією метою конструкція IP передбачає запобіжні клапани тиску і вакууму. Запобіжні клапани повинні розташовуватися на віддаленій відстані від майданчиків обслуговування основного обладнання та насосів для безпеки в разі виникнення пожежі на клапані в момент його спрацювання [9].

Крім конструктивного виконання ізотермічних резервуарів, важливим аспектом безпечного зберігання СПГ є вибір резервуарних сталей. Необхідність зберігання СПГ при від'ємних температурах висуває підвищені вимоги до механічних характеристик резервуарних сталей. Для зменшення ймовірності крихкого руйнування при від'ємних температурах сталь повинна мати достатню ударну в'язкість, за якою судять про її морозостійкість.

Для виготовлення резервуарів з температурою зберігання продуктів до мінус 104°C застосовується сталь, що містить 6% нікелю, нижче -104 °C – сталь, що містить 9% нікелю (наприклад, сталь ASTM A553 тип I або аналогічна російська

сталь 0Н9), а також аустенітна нержавіюча сталь. Для виготовлення зовнішньої металевої ємності або металевого герметизуючого зварного облицювання залізобетонної стінки застосовується вуглецева сталь. Мінімальна розрахункова температура металу зовнішньої ємності і облицювання приймається залежно від кліматичних умов [10].

Типи сталей, що застосовуються для конструкцій ізотермічних резервуарів для скраплених природних і вуглеводневих газів залежно від температури продукту, наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Типи сталей, що застосовуються для конструкцій ізотермічних резервуарів

Продукт	Температура ізотермічного зберігання, °С	Тип сталі
Пропан	-42,1	Різні групи вуглеводневої сталі
Пропілен	-47,7	
Ацетилен	-84	3,5% Ni
Етан	-88,4	
Етилен	-103,8	5% Ni
Метан (СПГ)	-163	9% Ni

Нижче в таблиці 2 наведено список найбільш значущих міжнародних проєктів ізотермічних резервуарів для зберігання СПГ, реалізованих компаніями TGE Gas Engineering (Німеччина), CB&I (США) и KOGAS (Південна Корея) в період з 2004 до 2014 р.

Таблиця 2

Реалізовані міжнародні проєкти ізотермічних резервуарів СПГ

Тип, кількість і місткість (м ³) резервуарів	Рік вводу в експлуатацію	Розташування об'єкту	Власник
Повна герметизація, 9x200000	2014	Самчок, Південна Корея,	Korea Gas Corp., Korea
Повна герметизація, 2x180000	2013	Джуронг-Айленд, Сінгапур	Singapore LNG Pte. Ltd.
Повна герметизація, 3x160000	2012	Нінбо, Чжецзян, Китай	CNOOC Ningbo LNG Co., Ltd
Повна герметизація, 150000	2012	Сінш, Португалія	REN Atlbntico
Одиарна герметизація, 30,000	2012	Мунай, Китай	Xinjiang Ji Munai Guanghui LNG Development Ltd. Co.
Повна герметизація, 2x20000	2012	порт усть-луга, росія	Sibur Portenegro
Одиарна герметизація, 30000	2011	Іу, Чжецзян, Китай	Xinjiang Guanghui New Energy Co. Ltd.
Повна герметизація, 9x200000	2014	Самчок, Південна Корея,	Korea Gas Corp., Korea
Повна герметизація, 2x180000	2013	Джуронг-Айленд, Сінгапур	Singapore LNG Pte. Ltd.
Повна герметизація, 3x160000	2012	Нінбо, Чжецзян, Китай	CNOOC Ningbo LNG Co., Ltd

Продовження таблиці 2

Тип, кількість і місткість (м ³) резервуарів	Рік вводу в експлуатацію	Розташування об'єкту	Власник
Повна герметизація, 150000	2012	Сініш, Португалія	REN Atlvntico
Одинарна герметизація, 30,000	2012	Мунай, Китай	Xinjiang Ji Munai Guanghui LNG Development Ltd. Co.
Повна герметизація, 2×20000	2012	порт усть-луга, росія	Sibur Portenegro
Одинарна герметизація, 30000	2011	Іу, Чжецзян, Китай	Xinjiang Guanghui New Energy Co. Ltd.
Повна герметизація, 2×160000	2008	Фуцзянь, Китай	CNOOC Gas & Power Group's
Одинарна герметизація, 70500	2008	Канада	Terasen Gas (піковий термінал)
Повна герметизація, 2×150,000	2007	Мургадос, Ла-Корунья, Іспанія	Reganosa
Одинарна герметизація, 2×130 000	2007	Перу	Peru LNG
Повна герметизація, 2×125000 СПГ	2006	Хаммерфест, Норвегія	Statoil ASA, Norway
Повна герметизація, 2×160000	2006	Порт Лавака, Техас, США	Calhoun LNG, LP
Повна герметизація, 3×160000	2005	Кітімат, Канада	Kitimat LNG Inc., Canada
Подвійна герметизація, 1×160000	2004	Домінікана	AES Corporation (імпорт СПГ)
Тип, кількість і місткість (м ³) резервуарів	Рік вводу в експлуатацію	Розташування об'єкта	Власник
Одинарна герметизація, 2×140000	2004	США	Trunkline (імпорт СПГ)
Повна герметизація, 1×60000	2004	Уотербері, Коннектикут	Yankee Gas Service Company

Висновки. Аналіз даних реалізованих міжнародних проєктів показав, що серед великогабаритних резервуарів найбільш поширені конструкції повної герметизації, проте IP одинарної герметизації, що забезпечують необхідний рівень безпеки зберігання за нижчої вартості, у деяких випадках є не менш конкурентоспроможними.

Конструктивні рішення на стадії проєктування приймаються з огляду на джерела небезпеки ізотермічного зберігання і сценаріїв реалізації аварійних ситуацій, тобто на підставі ідентифікації небезпек.

Ідентифікація небезпек ізотермічного зберігання СПГ вимагає аналізу досвіду експлуатації, основних і допоміжних технологічних процесів на об'єкті, компонувальних рішень і конструктивних особливостей обладнання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Heestand J., Shipman C.W., Meader J.W. A predictive model for rollover in stratified LNG tanks. *AIChEJ.* 29 March 1983. P. 199–207. doi.org/10.1002/aic.690290205.
2. Klosek J., McKinley C. Densities of liquefied natural gas and of low molecular weight hydrocarbons. *First International Conference on LNG.* Institute of Gas Technology. Chicago, 1977. 15 p.
3. Дзьоба О.Г. Основні тенденції формування світового ринку скрапленого природного газу. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.* 2009. № 3 (21). С. 117–125.
4. Janisch J., Raabe G., Köhler J. Vapor-liquid equilibria and saturated liquid densities in binary mixtures of nitrogen, methane, and ethane and their correlation using the VTPR and PSRK GCEOS. 2007. P. 1897–1903. doi.org/10.1021/jc700210n.
5. Мала гірнича енциклопедія : у 3 т. /за ред. В.С. Білецького. Донецьк : Донбас, Т. 1 : А–К. 2004. 640 с. ISBN 966-7804-14-3.
6. Хімія і фізика горючих копалин / В.І. Саранчук, М.О. Ільяшов, В.В. Ошовський, В.С. Білецький. Донецьк : Східний видавничий дім. 2008. 600 с. ISBN 978-966-317-024-4.
7. Українська нафтогазова енциклопедія / за заг. ред. В.С. Іванишина. Львів : Сполом. 2016. 603 с. ISBN 978-9669-191-403.
8. ДСТУ 4312:2012 Протипожежна техніка. Системи газового пожежогасіння. Модулі ізотермічні. Загальні технічні умови. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=54571.
9. Чернова О.Т., Кривенко Г.М. Аналіз небезпек під час зберігання скраплених вуглеводневих газів. *Екологічні науки.* 2023. № 2 (47). С. 112–116. doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.2-47.18ф.
10. Чернова О.Т., Кривенко Г.М. Аналіз небезпек під час розриву автоцистерни. *Розвиток транспорту.* 2021. № 4 (11). 2021. С. 112–116. doi.org/10.33082/td.2021.4-11.12. Ст. 129–136
11. R. Lentner, M. Richter, R. Kleinrahm, R. Span. Density measurements of liquefied natural gas (LNG) over the temperature range from (105 to 135) K at pressures up to 8.9 MPa. 2017. P. 68–76. doi.org/10.1016/j.jct.2017.04.002.

REFERENCES

1. J. Heestand, C.W. Shipman, J.W. Meader. (March 1983). A predictive model for rollover in stratified LNG tanks, *AIChEJ* 29. P. 199–207. doi.org/10.1002/aic.690290205.
2. J. Klosek, C. McKinley. (1977). Densities of liquefied natural gas and of low molecular weight hydrocarbons. In: *First International Conference on LNG.* Institute of Gas Technology. Chicago. 15 p.
3. Dzhoba O.G. (2009). The main trends in the formation of the world market of liquefied natural gas [Osnovni tendentsii formuvannia svitovoho

- rynku skraplenoho pryrodnoho hazu]. IFNTUNG scientific bulletin. No. 3(21). P. 117–125. [in Ukrainian].
4. J. Janisch, G. Raabe, J. Köhler. (2007). Vapor-liquid equilibria and saturated liquid densities in binary mixtures of nitrogen, methane, and ethane and their correlation using the VTPR and PSRK GCEOS. P. 1897–1903. doi.org/10.1021/je700210n.
 5. Small mining encyclopedia: in 3 volumes [Mala hirnycha entsyklopediia: u 3 t.] /ed. V. S. Biletskyi. (2004). D.: Donbas, Volume 1: A–K. 640 p. ISBN 966-7804-14-3. [in Ukrainian].
 6. V.I. Saranchuk, M.O. Ilyashov, V.V. Oshovskyi, V.S. Biletskyi. (2008). Chemistry and Physics of Combustible Fossils [Khimiiia i fizyka horiuchykh kopalyn]. Donetsk: Eastern Publishing House. 600 p. ISBN 978-966-317-024-4. [in Ukrainian].
 7. Ukrainian oil and gas encyclopedia [Ukrainska naftohazova entsyklopediia]/ edited by V. S. Ivanyshin (2016). Lviv: Spolom. 603 p. ISBN 978-9669-191-403. [in Ukrainian]
 8. DSTU 4312:2012 (2012). Fire-fighting equipment. Gas fire extinguishing systems. The modules are isothermal. General technical conditions [Protypozhezhna tekhnika. Systemy hazovoho pozhezhohasinnia. Moduli izotermichni. Zahalni tekhnichni umovy]. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=54571. (effective date 1.03.2012). [in Ukrainian].
 9. Chernova O.T., Kryvenko H.M. (2023). Analysis of hazards during storage of liquefied hydrocarbon gases [Analiz nebezpek pid chas rozryvu avtotsystemny]. Scientific and practical magazine “Ecological Sciences”. №2 (47). 2023. P. 112–116. doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.2-47.18. [in Ukrainian].
 10. Chernova O.T., Kryvenko H.M. (2021). Analysis of hazards during the rupture of a tank truck [Analysis of hazards during the rupture of a tank truck]. Transport development. No. 4(11). P. 112–116. [in Ukrainian].doi.org/10.33082/td.2021.4-11.12 .Ст.129-136.[in Ukrainian].
 11. R. Lentner, M. Richter, R. Kleinrahm, R. Span. (2017). Density measurements of liquefied natural gas (LNG) over the temperature range from (105 to 135) K at pressures up to 8.9 MPa. P. 68–76. doi.org/10.1016/j.jct.2017.04.002.