

УДК 621.1:621.565:629.5

РОЗРАХУНКОВО-АНАЛІТИЧНА ОЦІНКА ЗМЕНШЕННЯ УТВОРЕННЯ ВИПАРНОГО ГАЗУ НА ПЛАВУЧИХ УСТАНОВКАХ ЗБЕРІГАННЯ Й РЕГАЗИФІКАЦІЇ

С. В. Нікончукserhii.nikonchuk@nuos.edu.ua

ORCID: 0009-0005-2690-1581

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, 54007, Україна, м. Миколаїв, пр. Героїв України, 9

У статті розглянуто проблему утворення випарного газу під час зберігання зрідженого природного газу на плавучих установках зберігання й регазифікації. Актуальність дослідження зумовлена зростанням ролі LNG-інфраструктури у світовій енергетиці, необхідністю підвищення енергоефективності криогенних систем і зменшення навантаження на допоміжне обладнання. Метою роботи є розрахунково-аналітична оцінка впливу зменшення теплоприпливу на інтенсивність утворення випарного газу і пов'язані з цим експлуатаційні й екологічні показники. У роботі застосовано термодинамічний аналіз, параметричне порівняння розрахункових режимів й оцінку метан-еквівалентного показника. Встановлено залежність між тепловим навантаженням на резервуар, кількістю утвореного випарного газу й навантаженням на системи його оброблення. Отримані результати можуть бути використані для подальшого моделювання теплових процесів, удосконалення систем зберігання зрідженого природного газу й обґрунтування технічних рішень для плавучих регазифікаційних комплексів.

Ключові слова: зріджений природний газ, випарний газ, плавуча установка зберігання й регазифікації, тепло приплив, теплоізоляція, енергоефективність.

Вступ

Зріджений природний газ посідає важливе місце в сучасній системі міжнародної торгівлі енергоресурсами, оскільки існує можливість його транспортування морем незалежно від наявності прямих трубопровідних сполучень між постачальником і споживачем. Розвиток інфраструктури зрідженого природного газу сприяє диверсифікації джерел і маршрутів постачання, підвищенню гнучкості газових ринків і розширенню можливостей оперативного реагування на зміну попиту [1].

Зі зміною геополітичної обстановки у світі й переорієнтацією енергетичних потоків особливого значення набувають технології, що дозволяють у відносно короткі строки створювати або нарощувати потужності для приймання, зберігання й регазифікації зрідженого природного газу. Одним із таких технологічних рішень є плавучі установки зберігання й регазифікації, які поєднують функції приймання вантажу, його криогенного зберігання, регазифікації та подальшої передачі природного газу до берегової інфраструктури.

Порівняно з наземними терміналами плавучі установки зберігання й регазифікації характеризуються більшою гнучкістю розміщення, можливістю поетапного розвитку інфраструктури і скороченням обсягу берегових будівельних робіт. Водночас ефективність їх експлуатації значною мірою залежить від досконалості криогенних систем зберігання, параметрів теплоізоляції, інтенсивності теплоприпливу до резервуарів і режимів поводження з випарним газом [2]. Як відомо, зріджений природний газ зберігається за температури близько мінус 162 °С, унаслідок чого між навколишнім і криогенним середовищем виникає значна температурна різниця. Навіть за використання сучасних теплоізоляційних матеріалів повністю усунути надходження теплоти до резервуара неможливо. Частина цієї теплоти витрачається на фазовий перехід, що супроводжується утворенням випарного газу. Інтенсивність цього процесу залежить від конструкції резервуара, характеристик теплоізоляційної системи, температури навколишнього середовища, рівня заповнення танків і режиму експлуатації установки.

Утворений випарний газ може використовуватися як паливо, спрямовуватися на компримування, реконденсацію або повторне зрідження. Однак збільшення його кількості призводить до підвищення навантаження на компресорне, теплообмінне й допоміжне обладнання, ускладнює керування тиском у резервуарах і впливає на загальний енергетичний баланс установки. Тому зменшення теплоприпливу до зрідженого природного газу слід розглядати не лише як завдання вдосконалення теплоізоляції, а як складову підвищення ефективності всієї енергетичної системи плавучої установки.

Статтю ліцензовано на умовах Ліцензії Creative Commons «Attribution» («Атрибуція») 4.0 Міжнародна.
© С. В. Нікончук, 2026

Крім того, у складі випарного газу високий вміст метану, що з точки зору екологів створює проблеми. Метан характеризується значним потенціалом глобального потепління, тому обсяг його утворення, спосіб подальшого використання й можливі втрати мають враховуватися під час оцінювання екологічних показників інфраструктури зрідженого природного газу [3, 4]. Зменшення кількості випарного газу на стадії зберігання може одночасно сприяти скороченню енергетичних втрат, зниженню навантаження на системи його оброблення і зменшенню потенційного метан-еквівалентного впливу.

У зв'язку з цим актуальним є формування розрахунково-аналітичного підходу, який дозволяє встановити залежність між теплоприпливом, тривалістю операційного циклу, інтенсивністю утворення випарного газу й пов'язаними експлуатаційними показниками. Отримані залежності можуть бути використані як основа для подальшої деталізації теплового балансу резервуарів, оцінювання ефективності теплоізоляційних систем і моделювання процесів утворення випарного газу із застосуванням спеціалізованого програмного забезпечення.

Потенційна роль FSRU в розвитку LNG-інфраструктури України

Для України розвиток інфраструктури зрідженого природного газу може мати важливе значення у контексті диверсифікації джерел постачання природного газу, підвищення гнучкості газотранспортної системи й розширення можливостей інтеграції з європейським енергетичним ринком. Наявність розвиненої газотранспортної інфраструктури і великих підземних сховищ створює передумови для використання додаткових маршрутів надходження природного газу, зокрема, через регазифікаційні потужності в країнах Європи й потенційно через власні морські об'єкти.

Плавучі установки зберігання й регазифікації можуть розглядатися як один із варіантів поетапного розвитку національного напрямку зрідженого природного газу. Їх застосування дозволяє поєднати функції приймання, зберігання й регазифікації в межах одного плавучого об'єкта, а також зменшити обсяг початкового берегового будівництва порівняно з класичним наземним терміналом. Для України це може бути особливо важливо в разі реалізації проєктів, орієнтованих на поетапне нарощування потужностей і подальшу інтеграцію з газотранспортною системою.

Розміщення такої установки не повинно обмежуватися одним наперед визначеним майданчиком. Вибір конкретної прибережної локації має ґрунтуватися на сукупності технічних та економічних критеріїв, серед яких достатні морські глибини, можливість швартування великотоннажних газозовів, близькість до газотранспортної інфраструктури, наявність портів комунікацій, доступність електропостачання та можливість подальшого розширення комплексу. Важливим є також узгодження режимів роботи плавучої установки з пропускнуою спроможністю берегових мереж і прогнозованими обсягами споживання природного газу.

Попередні ініціативи щодо створення інфраструктури зрідженого природного газу в Україні підтверджують наявність інтересу до цього напрямку. Водночас реалізація повномасштабного плавучого або наземного терміналу потребує участі великих компаній, які мають досвід у сфері транспортування, зберігання й регазифікації зрідженого природного газу. Такі проєкти пов'язані з високою капіталомісткістю, необхідністю координації морської, портової та газотранспортної інфраструктури, а також із залученням спеціалізованого технологічного обладнання.

У разі практичного розвитку цього напрямку ефективність зберігання зрідженого природного газу на плавучих установках набуватиме самостійного технічного значення. Величина теплоприпливу, характеристики теплоізоляційних систем, інтенсивність утворення випарного газу й навантаження на допоміжне обладнання безпосередньо впливатимуть на експлуатаційні витрати і загальну енергоефективність комплексу. Тому оцінювання теплових процесів у резервуарах має бути складовою техніко-економічного обґрунтування майбутніх проєктів.

Стосовно нашої країни зауважимо, що в українських реаліях слід враховувати сезонні зміни температури повітря і морської води, інтенсивність сонячного випромінювання, режими приймання вантажів і графік регазифікації. Саме ці чинники визначатимуть фактичний тепловий баланс плавучої установки й інтенсивність утворення випарного газу. Відповідно, результати розрахунково-аналітичної оцінки можуть бути використані під час вибору конфігурації резервуарів, параметрів теплоізоляції, продуктивності систем поводження з випарним газом і режимів роботи допоміжного обладнання.

Таким чином, потенційне використання плавучих установок зберігання й регазифікації в Україні доцільно розглядати не лише як логістичний або інфраструктурний проєкт, а й як комплексне

завдання енергетичного машинобудування. Його вирішення потребує глибокого аналізу теплових процесів, кріогенного обладнання, систем регазифікації, енергопостачання й інтеграції з береговою газотранспортною мережею.

Проблема утворення випарного газу під час зберігання LNG

Зберігання зрідженого природного газу відбувається за кріогенних температур, близьких до температури його насичення. За таких умов навіть невелике надходження теплоти до резервуара спричиняє випаровування частини рідкої фази й утворення випарного газу. Інтенсивність цього процесу визначається величиною зовнішнього теплоприпливу, термодинамічними властивостями зрідженого природного газу, конструкцією резервуара, характеристиками теплоізоляції та режимом експлуатації установки.

Теплове навантаження на резервуар формується внаслідок теплопровідності через корпус і теплоізоляційні шари, конвективного теплообміну із зовнішнім середовищем, сонячного випромінювання, а також теплових містків у місцях проходження трубопроводів, опор, арматури та інших конструктивних елементів. Для плавучих установок, як уже про це йшлося, додаткового значення набувають температура морської води, добові й сезонні зміни температури повітря, швидкість вітру, положення судна відносно сонячного випромінювання і змінний рівень заповнення танків.

У спрощеному вигляді тепловий потік, що надходить до резервуара, може бути визначений за співвідношенням

$$Q = \frac{\Delta T}{R_{\Sigma}},$$

де Q – тепловий потік, Вт; ΔT – різниця температур між навколишнім середовищем і зрідженим природним газом, К; R_{Σ} – сумарний термічний опір конструкції резервуара і теплоізоляційної системи, К/Вт.

Для поверхні з відомими площею і приведеним коефіцієнтом теплопередачі залежність може бути записана у вигляді

$$Q = k \cdot A \cdot \Delta T,$$

де k – загальний коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·К); A – площа поверхні теплообміну, м².

Наведені залежності показують, що інтенсивність теплоприпливу визначається не лише температурною різницею, а й структурою теплоізоляційного контуру. Збільшення сумарного термічного опору або зменшення локальних теплових містків безпосередньо знижує кількість теплоти, що надходить до кріогенного середовища.

Частина отриманої теплоти витрачається на нагрівання рідкої фази, а частина – на фазовий перехід із утворенням випарного газу. За умов, близьких до квазістаціонарного режиму, масу утвореного випарного газу можна оцінити за співвідношенням

$$m_{\text{BOG}} = \frac{Q \cdot \tau}{h_v},$$

де m_{BOG} – маса випарного газу, кг; τ – тривалість розрахункового періоду, с; h_v – питома теплота пароутворення зрідженого природного газу, Дж/кг.

Із цієї залежності випливає, що за незмінних термодинамічних властивостей продукту кількість випарного газу прямо пропорційна теплоприпливу й тривалості зберігання. Саме тому під час порівняння різних режимів необхідно одночасно враховувати як добовий коефіцієнт утворення випарного газу, так і фактичну тривалість операційного циклу.

Для практичних оцінок часто використовують добовий коефіцієнт утворення випарного газу, який характеризує частку зрідженого природного газу, що переходить у газову фазу протягом доби. Його значення залежить від типу резервуара, технічного стану теплоізоляції, температурних умов, рівня заповнення й режиму експлуатації. Для сучасних систем зберігання типовими є нижчі значення цього показника порівняно з установками попередніх поколінь, що пов'язано з удосконаленням теплоізоляційних матеріалів і конструкції танків [5, 6].

Утворення випарного газу впливає на тиск у газовому просторі резервуара. За недостатнього відбору газу його накопичення призводить до підвищення тиску, що потребує роботи систем компримування, подачі газу до паливної системи, реконденсації або повторного зрідження. Відповідно, величина теплоприпливу опосередковано визначає навантаження на компресори, теплообмінники, трубопроводи, арматуру і системи автоматичного керування.

На плавучих установках зберігання й регазифікації режим утворення випарного газу додатково пов'язаний із продуктивністю регазифікації. За високої інтенсивності відбору зрідженого природного газу частина теплового і масового балансу компенсується постійним зменшенням кількості продукту в резервуарах. У періоди зниженого відбору або тимчасового зменшення подачі газу до берегової мережі випарний газ може накопичуватися швидше, що підвищує вимоги до систем його оброблення.

Таким чином, кількість випарного газу є інтегральним показником теплової ефективності системи зберігання. Його зменшення може бути досягнуте шляхом удосконалення теплоізоляції, зниження локальних теплоприпливів, оптимізації режимів експлуатації та узгодження роботи резервуарів із системами регазифікації й використання випарного газу.

Сучасні теплоізоляційні рішення й методи оцінювання теплоприпливу й утворення випарного газу

Ефективність зберігання зрідженого природного газу значною мірою визначається конструкцією теплоізоляційної системи резервуарів. Її основним завданням є зменшення теплового потоку від навколишнього середовища до криогенного продукту, підтримання допустимого температурного поля в елементах конструкції та обмеження інтенсивності утворення випарного газу.

У сучасних системах зберігання застосовують багатошарові теплоізоляційні конструкції, до складу яких можуть входити пінополіуретанові, перлітові, скловолоконні, композитні та інші матеріали з низькою теплопровідністю. Вибір теплоізоляції залежить від типу резервуара, його геометрії, способу кріплення, допустимої маси конструкції, стійкості до циклічних теплових навантажень і вимог до довговічності.

Так, для мембранних танків теплоізоляційна система одночасно виконує функції теплового захисту, передавання навантаження на корпус судна й підтримання герметичності вантажного контуру. У таких конструкціях особливу увагу приділяють стикам теплоізоляційних панелей, місцям кріплення мембрани й ділянкам проходження трубопроводів. Саме ці зони можуть формувати локальні теплові мости й підвищувати нерівномірність температурного поля.

У самонесучих резервуарах теплоізоляція розташовується навколо зовнішньої поверхні танка, при цьому мають враховуватися його температурні деформації. Для сферичних і призматичних резервуарів важливі рівномірність товщини теплоізоляції, герметичність пароізоляційного шару й мінімізація теплоприпливу через опорні елементи. Навіть за високої ефективності основного теплоізоляційного масиву значна частка теплового навантаження може надходити через конструктивні вузли, арматуру, трубопроводи й опори.

Окремим напрямом удосконалення є використання вакуумних і багатошарових теплоізоляційних систем. Вони забезпечують низькі значення ефективної теплопровідності, однак потребують стабільного вакууму, надійної герметизації та складнішого контролю технічного стану. Для великогабаритних судових і плавучих резервуарів застосування таких систем обмежується конструктивною складністю, вартістю і вимогами до ремонтпридатності.

Оцінювання теплоприпливу може виконуватися за різними рівнями деталізації. На початковому етапі застосовують одновимірні стаціонарні моделі, у яких тепловий потік визначається через сумарний термічний опір шарів теплоізоляції. Він дозволяє оцінити середній теплоприплив і порівняти кілька варіантів теплоізоляційної конструкції.

Для багатошарової системи сумарний термічний опір може бути визначений як

$$R_{\Sigma} = \frac{1}{\alpha_{\text{зовн}} \cdot A} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i \cdot A} + \frac{1}{\alpha_{\text{вн}} \cdot A},$$

де $\alpha_{\text{зовн}}$ – коефіцієнт тепловіддачі від зовнішнього середовища, Вт/(м²·К); $\alpha_{\text{вн}}$ – коефіцієнт тепловіддачі з внутрішнього боку резервуара, Вт/(м²·К); δ_i – товщина окремого шару, м; λ_i – коефіцієнт теплопровідності відповідного матеріалу, Вт/(м·К); A – площа теплообміну, м².

За відомого сумарного термічного опору тепловий потік визначається як

$$Q = \frac{T_{\text{зовн}} - T_{\text{LNG}}}{R_{\Sigma}}.$$

Таке подання зручне для попереднього інженерного розрахунку, однак при цьому не беруться до уваги просторова нерівномірність температурного поля, локальні теплові містки, зміни сонячного навантаження й динаміка рівня зрідженого природного газу.

Для детальнішого аналізу застосовують дво- і тривимірні моделі теплопровідності. Вони дозволяють дослідити температурний розподіл у конструкції, визначити ділянки підвищеного теплоприпливу й оцінити вплив стиків, опор і трубопровідних проходів. Такі моделі можуть реалізовуватися методом скінченних елементів або скінченних об'ємів.

Нестаціонарне моделювання необхідне у випадках, коли зовнішні умови й режими експлуатації змінюються з часом. До таких факторів належать добові коливання температури повітря, зміна сонячного випромінювання, коливання температури морської води, зміна рівня заповнення резервуара і нерівномірний режим регазифікації. У цьому випадку тепловий баланс має враховувати теплоємність конструктивних шарів і самого зрідженого природного газу.

Для моделювання процесів зберігання, випаровування, компримування й регазифікації можуть застосовуватися спеціалізовані програмні комплекси процесного моделювання. Так, Aspen HYSYS дозволяє формувати термодинамічні моделі потоків зрідженого природного газу, оцінювати фазову рівновагу, роботу компресорів, теплообмінників і систем повторного зрідження. Його доцільно використовувати для дослідження взаємозв'язку між теплоприпливом, утворенням випарного газу й роботою допоміжного обладнання.

Водночас Aspen HYSYS не замінює детального просторового розрахунку теплоізоляційної конструкції. Тому найбільш повний підхід передбачає поєднання моделі теплопередачі в оболонці резервуара з процесною моделлю руху й оброблення випарного газу. Результати теплового розрахунку можуть використовуватися як вихідне теплове навантаження для моделі резервуара у процесному середовищі.

У сучасних дослідженнях також значна увага приділяється системам поводження з уже утвореним випарним газом. До основних рішень належать його використання як палива, компримування і подача до газової мережі, реконденсация та повторне зрідження. Вибір конкретного способу залежить від кількості випарного газу, режиму роботи установки, наявності споживачів газового палива й енергетичних витрат на його оброблення [7–10].

Системи повторного зрідження дозволяють повертати випарний газ до рідкої фази, однак потребують значних витрат електричної енергії на компримування й охолодження. Ефективність таких систем визначається схемою холодильного циклу, температурою і тиском випарного газу, складом природного газу і продуктивністю обладнання [7, 9, 10].

Використання випарного газу як палива зменшує потребу в його повторному зрідженні, однак пов'язує баланс газу з навантаженням суднової енергетичної установки. За низької потреби в паливі надлишок випарного газу все одно потребує компримування, реконденсация або іншого способу утилізації.

Реконденсация, у свою чергу, ефективна за наявності достатнього потоку переохолодженого зрідженого природного газу. У цьому випадку випарний газ після компримування змішується з рідкою фазою й конденсується за рахунок її холодового потенціалу. Для плавучих установок зберігання й регазифікації доцільність такого рішення залежить від режиму відбору зрідженого природного газу і продуктивності регазифікації.

Окремим напрямом виступає використання холодового потенціалу зрідженого природного газу й випарного газу в інтегрованих енергетичних системах. Холодова енергія може застосовуватися для попереднього охолодження робочих середовищ, підтримання низькотемпературних процесів або зменшення енергоспоживання допоміжного обладнання [11].

Аналіз сучасних підходів показує, що ефективне керування випарним газом має поєднувати два взаємодоповнюючі напрями: зменшення його утворення шляхом удосконалення теплоізоляції та теплового режиму резервуарів, а також енергоефективне оброблення вже утвореного газу. Подальше дослідження доцільно спрямувати на кількісне оцінювання теплоприпливу, визначення впливу властивостей теплоізоляційних матеріалів і формування інтегрованої моделі резервуара й системи поводження з випарним газом.

Мета, завдання та методика дослідження

Метою дослідження є розрахунково-аналітична оцінка впливу зменшення теплоприпливу на утворення випарного газу під час зберігання зрідженого природного газу на плавучих установках зберігання й регазифікації.

Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання:

- проаналізувати взаємозв'язок між теплоприпливом до криогенного резервуара й інтенсивністю утворення випарного газу;
- оцінити вплив добового коефіцієнта утворення випарного газу на його накопичення протягом операційного циклу;
- визначити зміну об'єму й маси випарного газу за різних рівнів теплового навантаження;
- оцінити вплив зменшення утворення випарного газу на навантаження систем компримування, реконденсації, повторного зрідження й паливопідготовки;
- визначити потенційну зміну метан-еквівалентного показника;
- сформулювати вихідні положення для подальшого математичного й програмного моделювання теплових процесів у резервуарах зрідженого природного газу.

Методика дослідження базується на поєднанні термодинамічного аналізу, параметричної розрахункової оцінки й порівняння експлуатаційних режимів. Основним вихідним параметром є добовий коефіцієнт утворення випарного газу, який характеризує частку об'єму зрідженого природного газу, що переходить у газову фазу протягом однієї доби.

Для розрахунку прийнято модельну конфігурацію плавучої установки зберігання й регазифікації з сумарною місткістю резервуарів 178 000 м³. Така місткість відповідає сучасному великотоннажному класу газозовів і дозволяє оцінити порядок величин для промислової системи зберігання зрідженого природного газу.

Тривалість базового операційного циклу прийнято рівною восьми добам. Такий період використано як орієнтовний інтервал між послідовними постачаннями зрідженого природного газу для терміналу із заданою річною продуктивністю. Для оцінювання масштабованого ефекту результати одного циклу можуть бути агреговані для місячного або річного періоду без припущення про безперервне зберігання однієї партії вантажу протягом тривалого часу.

У розрахунках розглядаються добові коефіцієнти утворення випарного газу 0,02; 0,05 та 0,10 %/добу. Перші два значення характеризують сучасний рівень теплоізоляційної ефективності, тоді як значення 0,10 %/добу використовується як порівняльний режим для систем із вищим теплоприпливом.

Об'єм випарного газу в еквіваленті рідкої фази протягом одного операційного циклу визначається за співвідношенням

$$V_{\text{BOG}} = V_0 \cdot r_{\text{BOG}} \cdot \tau,$$

де V_{BOG} – об'єм зрідженого природного газу, що перейшов у випарний газ, м³; V_0 – початковий об'єм зрідженого природного газу в резервуарах, м³; r_{BOG} – добовий коефіцієнт утворення випарного газу, частка за добу; τ – тривалість операційного циклу, діб.

Масовий еквівалент утвореного випарного газу визначається за формулою

$$m_{\text{BOG}} = V_{\text{BOG}} \cdot \rho_{\text{LNG}},$$

де m_{BOG} – маса зрідженого природного газу, що перейшла у випарний газ, кг; ρ_{LNG} – густина зрідженого природного газу, кг/м³.

Для попередньої оцінки прийнято густину зрідженого природного газу 450 кг/м³. Значення густини може змінюватися залежно від компонентного складу, температури й тиску, однак прийняте значення є достатнім для порівняльної розрахункової оцінки.

Вплив зменшення теплоприпливу оцінюється через відносну зміну кількості утвореного випарного газу. За припущенням про прямо пропорційний зв'язок між тепловим навантаженням і пароутворенням скорочення теплоприпливу на задану величину приводить до відповідного зменшення об'єму випарного газу

$$V_{\text{BOG}}^{\text{3M}} = V_{\text{BOG}} (1 - \delta Q),$$

де $V_{\text{BOG}}^{\text{3M}}$ – об'єм випарного газу після зменшення теплоприпливу, м³; δQ – відносне зменшення теплоприпливу.

Для оцінювання чутливості розглядаються рівні зменшення теплоприпливу на 5 і 10%. Таке порівняння дозволяє визначити зміну об'єму й маси випарного газу без прив'язки до конкретної конструкції теплоізоляційної системи.

Метан-еквівалентний показник визначається як потенційний екологічний індикатор, що характеризує зміну кількості метану, пов'язану зі зменшенням утворення випарного газу. Для його оцінки використовується 100-річний потенціал глобального потепління метану відповідно до рекомендацій Міжурядової групи експертів зі зміни клімату [3].

Наступний етап дослідження передбачає деталізацію теплового балансу резервуарів з урахуванням конструкції теплоізоляційних шарів, зовнішніх кліматичних навантажень, рівня заповнення танків і режиму регазифікації. Моделювання теплових і масообмінних процесів планується виконувати із застосуванням Aspen HYSYS або аналогічного програмного середовища з подальшим порівнянням результатів для різних варіантів теплоізоляції та експлуатаційних режимів.

Розрахунково-аналітична оцінка утворення випарного газу

Для кількісної оцінки прийнято модельну конфігурацію плавучої установки зберігання й регазифікації з сумарною місткістю резервуарів 178 000 м³. Розрахунок виконано для одного восьмидобового операційного циклу, який розглядається (і про це вже йшлося) як орієнтовний інтервал між послідовними постачаннями зрідженого природного газу.

Добовий обсяг зрідженого природного газу, що переходить у випарний газ, визначається за формулою

$$V_{\text{BOG}}^{\text{доб}} = V_0 \cdot r_{\text{BOG}},$$

де $V_{\text{BOG}}^{\text{доб}}$ – добовий обсяг зрідженого природного газу, що перейшов у випарний газ, м³/добу; V_0 – початковий об'єм зрідженого природного газу, м³; r_{BOG} – добовий коефіцієнт утворення випарного газу.

Для добового коефіцієнта 0,02% – $V_{\text{BOG}}^{\text{доб}} = 178000 \cdot 0,0002 = 35,6$ м³/добу. За вісім діб – $V_{\text{BOG}}^8 = 35,6 \cdot 8 = 284,8$ м³.

Для добового коефіцієнта 0,05% – $V_{\text{BOG}}^{\text{доб}} = 178000 \cdot 0,0005 = 89,0$ м³/добу; $V_{\text{BOG}}^8 = 89,0 \cdot 8 = 712,0$ м³.

Для добового коефіцієнта 0,10% – $V_{\text{BOG}}^{\text{доб}} = 178000 \cdot 0,001 = 178,0$ м³/добу; $V_{\text{BOG}}^8 = 178,0 \cdot 8 = 1424,0$ м³.

Масовий еквівалент визначено за густини зрідженого природного газу 450 кг/м³. Результати розрахунку наведено в табл. 1.

Отримані значення демонструють суттєву залежність абсолютної кількості випарного газу від ефективності теплоізоляційної системи. За добового коефіцієнта 0,02% протягом одного операційного

циклу у випарний газ переходить 284,8 м³ зрідженого природного газу, тоді як за коефіцієнта 0,10% цей показник збільшується до 1424 м³. Таким чином, п'ятикратне збільшення добового коефіцієнта зумовлює відповідне п'ятикратне збільшення навантаження на системи поводження з випарним газом.

Для оцінювання впливу зниження теплоприпливу розглянуто два рівні його скорочення – 5 та 10%. За прийнятого пропорційного зв'язку між тепловим навантаженням і кількістю утвореного випарного газу розрахункове зменшення визначається за формулою

$$\Delta V_{\text{BOG}} = V_{\text{BOG}} \cdot \delta Q,$$

де ΔV_{BOG} – зменшення об'єму випарного газу, м³; δQ – відносне зменшення теплоприпливу.

Таблиця 1. Утворення випарного газу протягом восьмидобового операційного циклу

Добовий коефіцієнт утворення випарного газу, %/добу	Утворення випарного газу, м ³ LNG-екв./добу	Утворення випарного газу, м ³ LNG-екв./цикл	Масовий еквівалент, т/цикл
0,02	35,6	284,8	128,16
0,05	89,0	712,0	320,40
0,10	178,0	1424,0	640,80

Примітка: об'єм випарного газу наведено в еквіваленті рідкої фази, тобто як об'єм зрідженого природного газу, що перейшов у газоподібний стан

Таблиця 2. Вплив зменшення теплоприпливу на утворення випарного газу протягом восьмидобового циклу

Добовий коефіцієнт, %/добу	Зменшення теплоприпливу, %	Утворення випарного газу після зменшення теплоприпливу, м ³ LNG-екв./цикл	Зменшення випарного газу, м ³ LNG-екв./цикл	Масовий еквівалент зменшення, т/цикл
0,02	5	270,56	14,24	6,41
0,02	10	256,32	28,48	12,82
0,05	5	676,40	35,60	16,02
0,05	10	640,80	71,20	32,04
0,10	5	1352,80	71,20	32,04
0,10	10	1281,60	142,40	64,08

Результати наведено в табл. 2.

Із табл. 2 видно, що абсолютний ефект зменшення теплоприпливу залежить від початкового рівня утворення випарного газу. За найбільш ефективної теплоізоляційної системи з добовим коефіцієнтом 0,02% скорочення теплоприпливу на 10% забезпечує зменшення випарного газу на 28,48 м³ за цикл. За початкового коефіцієнта 0,10% аналогічне відносне зменшення теплоприпливу відповідає скороченню на 142,4 м³ за цикл. Для наочного порівняння впливу зменшення теплоприпливу на утворення випарного газу результати розрахунку подано на рис. 1. Графік показує зміну абсолютного скорочення обсягу випарного газу для трьох прийнятих добових коефіцієнтів та двох рівнів зменшення теплоприпливу.

Графічне порівняння підтверджує, що абсолютне зменшення утворення випарного газу зростає пропорційно початковому добовому коефіцієнту й рівню зменшення теплоприпливу. Для режиму 0,05%/добу скорочення теплоприпливу на 5–10% відповідає зменшенню утворення випарного газу на 35,6–71,2 м³ LNG-еквівалента за один операційний цикл.

Для сучасної системи з добовим коефіцієнтом 0,05% скорочення теплоприпливу на 5–10% дозволяє зменшити утворення випарного газу на 35,6–71,2 м³ за один операційний цикл, що відповідає 16,02–32,04 т зрідженого природного газу. Такий результат характеризує не лише збереження продукту, а й можливе зниження навантаження на компресори, теплообмінники, системи реконденсації та повторного зрідження.

Для оцінювання довгострокового масштабу результати одного циклу можуть бути агреговані за кількістю послідовних операційних циклів. При цьому не передбачається безперервне зберігання однієї партії зрідженого природного газу протягом місяця або року. Масштабування відображає сумарний ефект повторюваних циклів приймання, зберігання й регазифікації.

За орієнтовної кількості 44 операційних цикли на рік для режиму з добовим коефіцієнтом 0,05% і зменшенням теплоприпливу на 10% річне скорочення утворення випарного газу дорівнюватиме

$$\Delta V_{\text{BOG}}^{\text{рік}} = 71,2 \cdot 44 = 3132,8 \text{ м}^3 \text{ LNG-екв./рік.}$$

Масовий еквівалент такого зменшення становить

$$\Delta m_{\text{BOG}}^{\text{рік}} = 32,04 \cdot 44 = 1409,76 \text{ т/рік.}$$

Наведене масштабування показує, що навіть відносно невелике зменшення теплоприпливу в межах одного операційного циклу може давати помітний сукупний ефект за тривалої експлуатації плавучої установки.

Оцінка метан-еквівалентного показника

Випарний газ утворюється переважно з легких компонентів зрідженого природного газу, серед яких домінує метан. Тому зменшення кількості випарного газу може впливати не лише на енергетичний баланс установки, а й на її потенційні екологічні показники. Водночас кількість утвореного випарного газу не варто ототожнювати безпосередньо з фактичними викидами метану, оскільки в умовах експлуатації газ може використовуватися як паливо, спрямовуватися на реконденсацію, повторне зрідження або подаватися до берегової газової системи.

У межах дослідження метан-еквівалентний показник використано як порівняльний індикатор потенційного екологічного ефекту від зменшення утворення випарного газу. Його визначення базується на масовому еквіваленті зменшеного випарного газу й потенціалі глобального потепління метану.

Загальний вираз для оцінювання може бути поданий у вигляді

$$E_{\text{CO}_2\text{-eq}} = \Delta m_{\text{BOG}} \cdot x_{\text{CH}_4} \cdot f_{\text{rel}} \cdot GWP_{\text{CH}_4},$$

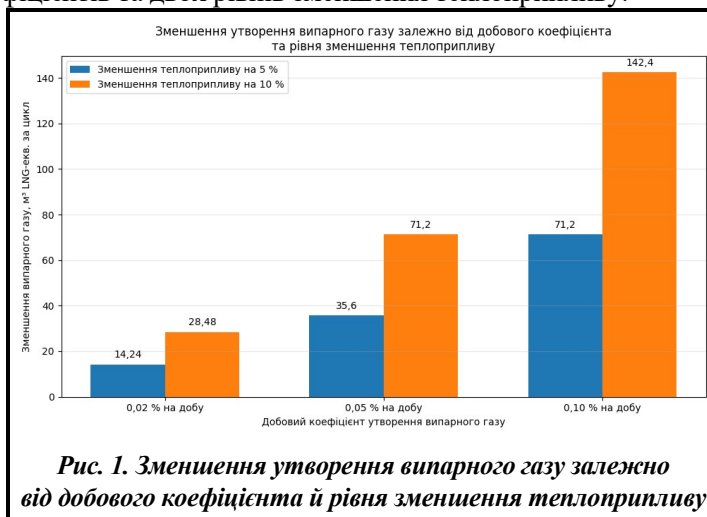


Рис. 1. Зменшення утворення випарного газу залежно від добового коефіцієнта й рівня зменшення теплоприпливу

де $E_{\text{CO}_2\text{-eq}}$ – метан-еквівалентний показник, т $\text{CO}_2\text{-екв.}$; Δm_{BOG} – масовий еквівалент зменшеного випарного газу, т; x_{CH_4} – масова частка метану у випарному газі; f_{rel} – частка газу, яка потенційно може бути втрачена в навколишнє середовище; GWP_{CH_4} – потенціал глобального потепління метану.

Відповідно до даних Міжурядової групи експертів зі зміни клімату 100-річний потенціал глобального потепління метану викопного походження становить 29,8 відносно вуглекислого газу [3].

Для порівняння розрахункових режимів прийнято граничний метан-еквівалентний показник, за якого $x_{\text{CH}_4}=1$ та $f_{\text{rel}}=1$. Такий підхід не характеризує фактичних викидів конкретної плавучої установи, а показує максимальний потенційний кліматичний еквівалент відповідної маси метану. У реальних умовах значення показника має бути скориговане з урахуванням компонентного складу випарного газу й фактичної частки його втрат.

Для режиму з добовим коефіцієнтом утворення випарного газу 0,05% зменшення теплоприпливу на 5% забезпечує скорочення масового еквівалента випарного газу на 16,02 т за один восьмидобовий цикл. Граничний метан-еквівалентний показник становитиме

$$E_{\text{CO}_2\text{-eq}}^5 = 16,02 \cdot 29,8 = 477,40 \text{ т } \text{CO}_2\text{-екв./цикл.}$$

За зменшення теплоприпливу на 10% масовий еквівалент скорочення випарного газу дорівнює 32,04 т за цикл

$$E_{\text{CO}_2\text{-eq}}^{10} = 32,04 \cdot 29,8 = 954,79 \text{ т } \text{CO}_2\text{-екв./цикл.}$$

Результати для розглянутих добових коефіцієнтів наведено у табл. 3.

Дані табл. 3 показують, що метан-еквівалентний ефект безпосередньо залежить від початкової інтенсивності утворення випарного газу й відносного зменшення теплоприпливу. За нижчого добового

коефіцієнта абсолютний ефект є меншим, однак зберігається пряма залежність між тепловим навантаженням, масою випарного газу й граничним метан-еквівалентним показником.

Для оцінювання фактичного екологічного ефекту необхідно враховувати реальний склад випарного газу, частку метану, що використовується як паливо, ефективність його спалювання, наявність незгорілого метану у вихлопних газах, роботу систем реконденсації та повторного зрідження. Тому наведені значення слід застосовувати насамперед для порівняння розрахункових режимів і визначення потенційного напрямку зміни екологічних показників.

Таблиця 3. Граничний метан-еквівалентний показник зменшення утворення випарного газу за восьмидобовий цикл

Добовий коефіцієнт утворення випарного газу, %/добу	Зменшення теплоприпливу, %	Масовий еквівалент зменшеного випарного газу, т/цикл	Граничний метан-еквівалентний показник, т $\text{CO}_2\text{-екв./цикл}$
0,02	5	6,41	191,02
0,02	10	12,82	382,04
0,05	5	16,02	477,40
0,05	10	32,04	954,79
0,10	5	32,04	954,79
0,10	10	64,08	1909,58

Примітка. Значення розраховано як граничний порівняльний показник за припущення, що весь масовий еквівалент зменшеного випарного газу відповідає метану. Показники не є оцінкою фактичних викидів конкретної установки

Обговорення результатів

Результати розрахунково-аналітичної оцінки показують, що величина утворення випарного газу визначається одночасною дією двох основних факторів, а саме: початкового добового коефіцієнта утворення випарного газу і тривалості операційного циклу. За однакової місткості резервуарів навіть відносно невелика зміна добового коефіцієнта істотно впливає на абсолютний обсяг зрідженого природного газу, що переходить у газову фазу.

Для модельної установки місткістю 178 000 м³ за восьмидобовий цикл утворення випарного газу становить від 284,8 до 1424,0 м³ LNG-еквівалента залежно від прийнятого добового коефіцієнта. Такий діапазон показує, що характеристики теплоізоляційної системи безпосередньо впливають не лише на кількість випарного газу, а й на продуктивність обладнання, необхідного для його подальшого оброблення.

Зменшення теплоприпливу на 5–10% забезпечує пропорційне скорочення утворення випарного газу. Для режиму з добовим коефіцієнтом 0,05% на добу, який може використовуватися як базовий варіант для сучасної системи зберігання, зменшення теплоприпливу відповідає скороченню випарно-

го газу на 35,6–71,2 м³ LNG-еквівалента за один восьмидобовий цикл. У масовому вираженні це становить 16,02–32,04 т зрідженого природного газу.

Наведені значення характеризують не лише кількість збереженого продукту. Скорочення обсягу випарного газу може знижувати навантаження на компресори, теплообмінники, системи реконденсації та повторного зрідження. Відповідно, зменшення теплоприпливу може впливати на допоміжне енергоспоживання, тривалість роботи обладнання й загальний енергетичний баланс плавучої установки.

Найбільший абсолютний ефект спостерігається для режимів із вищим початковим добовим коефіцієнтом утворення випарного газу. Водночас це не означає, що системи з нижчим коефіцієнтом мають менший інженерний інтерес. За сучасного рівня теплоізоляції подальше зменшення теплоприпливу може бути важливим для забезпечення більш стабільного теплового режиму, зниження циклічності роботи допоміжного обладнання й підвищення експлуатаційної гнучкості.

Застосування восьмидобового операційного циклу дає змогу розрахунок пов'язати із режимом регулярного приймання і регазифікації зрідженого природного газу. Масштабування результатів на місячний або річний період виконується шляхом агрегування послідовних циклів, а не через припущення про тривале безперервне зберігання однієї партії продукту. Такий підхід більш коректно відображає роботу термінала з повторюваним графіком постачання.

Метан-еквівалентний показник, визначений у роботі, слід використовувати як порівняльний індикатор. Його величина характеризує потенційний екологічний ефект від зменшення маси випарного газу, але не є оцінкою фактичних викидів конкретної установки. Для переходу до фактичної оцінки необхідно врахувати склад випарного газу, частку його використання як палива, ефективність спалювання, наявність незгорілого метану у вихлопних газах і роботу систем повторного зрідження.

Отримані залежності також обґрунтовують доцільність подальшого переходу від параметричної оцінки до деталізованого моделювання теплового балансу резервуарів. Для цього необхідно брати до уваги геометрію танків, властивості теплоізоляційних матеріалів, локальні теплові мости, температуру навколишнього середовища, сонячне навантаження, рівень заповнення резервуарів і змінну продуктивність регазифікації.

Подальше моделювання доцільно виконувати у два етапи. На першому етапі необхідно визначити просторовий розподіл температур і теплових потоків у конструкції резервуара. На другому отримані значення теплоприпливу можуть бути використані у процесній моделі Aspen HYSYS або аналогічному програмному середовищі для оцінювання утворення випарного газу, роботи компресорів, теплообмінників і систем його подальшого використання.

Таким чином, зменшення теплоприпливу до резервуарів доцільно розглядати як складову комплексної оптимізації плавучої установки зберігання й регазифікації. Ефект такого зменшення проявляється у скороченні втрат зрідженого природного газу, зниженні навантаження на допоміжне обладнання й потенційному поліпшенні екологічних показників.

Обмеження дослідження та напрями подальших робіт

Подальший розвиток дослідження передбачає уточнення теплового балансу резервуарів зрідженого природного газу й кількісну оцінку впливу теплоприпливу на утворення випарного газу.

Особливу увагу доцільно приділити аналізу характеристик теплоізоляційних систем і їхнього впливу на добовий коефіцієнт утворення випарного газу. Рівень деталізації такого аналізу визначатиметься доступністю технічних даних щодо конструкції резервуарів і теплоізоляційних матеріалів.

Окремим напрямом виступає моделювання теплових і масообмінних процесів із застосуванням Aspen HYSYS або аналогічного програмного забезпечення. Таке моделювання може бути використане для оцінювання взаємозв'язку між теплоприпливом, утворенням випарного газу, режимом роботи резервуарів і навантаженням на допоміжне обладнання.

Доцільно також вивчити змінні експлуатаційні режими, зокрема, різних тривалості операційного циклу, рівня заповнення резервуарів, продуктивності регазифікації та температурних умов навколишнього середовища.

Подальше уточнення екологічної оцінки має передбачати врахування компонентного складу випарного газу, частки його використання як палива, ефективності спалювання й режимів роботи систем повторного зрідження.

Отримані результати можуть бути використані для подальшого вдосконалення методики оцінювання теплових втрат, вибору напрямів підвищення енергоефективності й обґрунтування технічних рішень для плавучих установок зберігання й регазифікації.

Висновки

1. Установлено, що інтенсивність утворення випарного газу під час зберігання зрідженого природного газу визначається величиною теплоприпливу, добовим коефіцієнтом випаровування і тривалістю операційного циклу.
2. Для модельної плавучої установки зберігання й регазифікації місткістю 178 000 м³ за восьмидобовий цикл утворення випарного газу становить 284,8–1424,0 м³ у перерахунку на об'єм рідкої фази залежно від прийнятого добового коефіцієнта 0,02–0,10% на добу.
3. Для режиму з добовим коефіцієнтом утворення випарного газу 0,05% на добу зменшення теплоприпливу на 5–10% відповідає скороченню утворення випарного газу на 35,6–71,2 м³ за один восьмидобовий цикл. Масовий еквівалент такого скорочення становить 16,02–32,04 т зрідженого природного газу.
4. Зменшення утворення випарного газу може сприяти зниженню навантаження на компресорне, теплообмінне та інше допоміжне обладнання, а також зменшенню енергетичних витрат на компримування, реконденсацію або повторне зрідження.
5. Метан-еквівалентний показник доцільно використовувати як порівняльний індикатор потенційного екологічного ефекту. Для визначення фактичних викидів необхідно додатково враховувати склад випарного газу, спосіб його використання, ефективність спалювання й роботу систем повторного зрідження.
6. Застосування восьмидобового операційного циклу дозволяє пов'язати розрахунок із повторюваними процесами приймання, зберігання й регазифікації зрідженого природного газу. Оцінювання місячного або річного ефекту доцільно виконувати шляхом агрегування послідовних операційних циклів.
7. Подальші дослідження доречно спрямувати на уточнення теплового балансу резервуарів, аналіз впливу характеристик теплоізоляційних систем і моделювання взаємозв'язку між теплоприпливом, утворенням випарного газу і роботою допоміжного обладнання із застосуванням Aspen HYSYS або аналогічного програмного забезпечення.

Література

1. 2025 World LNG: Report. International Gas Union: official web-site. 2025. <https://www.igu.org/igu-reports/2025-world-lng-report>.
2. Naveiro M., Romero Gómez M., Arias-Fernández I., Baaliña Insua Á. Energy efficiency and environmental measures for Floating Storage Regasification Units. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2021. Vol. 96. Article 104271. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.104271>.
3. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2021 – The physical science basis: Working group I contribution to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2023. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>.
4. Fourth IMO Greenhouse Gas Study 2020. International Maritime Organization: official web-site. London: IMO, 2021. <https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/fourth-imo-greenhouse-gas-study-2020.aspx>.
5. GIIGNL. LNG Custody Transfer Handbook. 6th ed. International Group of Liquefied Natural Gas Importers, 2021. <https://www.giignl.org/resources/custody-transfer-handbook-6th-edition-2021>.
6. Faruque Hasan M. M., Zheng A. M., Karimi I. A. Minimizing boil-off losses in liquefied natural gas transportation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2009. Vol. 48. Iss. 21. P. 9571–9580. <https://doi.org/10.1021/ie801975q>.
7. Kim D., Hwang C., Gundersen T., Lim Y. Process design and economic optimization of boil-off-gas re-liquefaction systems for LNG carriers. *Energy*. 2019. Vol. 173. P. 1119–1129. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.098>.
8. Khan M. S., Wood D. A., Qyyum M. A., Ansari K. B., Ali W., Wazwaz A., Dutta A. Graphical approach for estimating and minimizing boil-off gas and compression energy consumption in LNG regasification terminals. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2022. Vol. 101. Article 104539. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2022.104539>.
9. Son H., Kim J.-K. Energy-efficient process design and optimization of dual-expansion systems for BOG re-liquefaction process in LNG-fueled ship. *Energy*. 2020. Vol. 203. Article 117823. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117823>.
10. Kim J.-S., Kim D.-J. Energy, exergy, and economic (3E) analysis of boil-off gas re-liquefaction systems for LNG-fueled ships. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. Vol. 11. Iss. 3. Article 587. <https://doi.org/10.3390/jmse11030587>.
11. Naveiro M., Romero Gómez M., Arias Fernández I., Romero Gómez J. Exploitation of liquefied natural gas cold energy in floating storage regasification units. *Brodogradnja*. 2021. Vol. 72. No. 4. P. 47–69. <https://doi.org/10.21278/brod72404>.

Надійшла до редакції 04.05.2026