

ТРАНСПОРТУВАННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ В ГАЗОГІДРАТНОМУ СТАНІ

М.В. Босий¹, В.В. Клименко²

¹викладач кафедри матеріалознавства та ливарного виробництва,
Центральноукраїнський національний технічний університет,
Кропивницький, Україна
ORCID ID: 0000-0002-3090-0427

²д. т. н., професор кафедри електротехнічних систем
та енергетичного менеджменту,
Центральноукраїнський національний технічний університет,
Кропивницький, Україна
ORCID ID: 0000-0001-6840-7307

Анотація

Вступ. Нині споживання природного газу в Україні та у світі постійно зростає. Традиційні технології його транспортування часто виявляються неефективними і не сприяють розробці невеликих родовищ. Транспортування природного газу на тепер здійснюється морем, використовуючи такі технології, як: LNG-технологія, CNG-технологія і особливо заслуговує на увагу NGH-технологія – газ у газогідратній формі. **Метою** роботи є обґрунтування перспективних технологій транспортування газу в газогідратній формі і розробка схемно-технологічного рішення застосування процесу гідратоутворення під час видобутку вуглеводневих газів, їх транспортування і використання для умов малодобітних родовищ та схемно-технологічного рішення регазифікації гідратних пелет у контейнері для їх транспортування. **Результати.** Обґрунтовано перспективи впровадження технології транспортування газу в газогідратній формі. Наведені переваги NGH-технології порівняно з іншими технологіями. Згідно з відомою на тепер NGH-технологією запропоновано формувати газогідрати у вигляді пелетів, покритих тонким шаром льоду. Вибір форми пелетів і послідовність їх виготовлення спрямовані на оптимізацію процесів NGH-технології. **Висновки.** Запропоновані схемно-технологічні рішення: перше – застосування процесу гідратоутворення для видобутку та підготовки до транспортування вуглеводневих газів з малодобітного родовища; друге – регазифікація гідратних пелет у контейнері для їх транспортування. Ця технологія дозволяє з мінімальними енерговитратами отримати газогідратні пелети, а їх транспортування у такій формі дозволить значно знизити вартість транспортного обладнання.

Ключові слова: природний газ, морський транспорт, тиск, температура, гідратоутворення, газогідратні пелети, регазифікація.

TRANSPORTATION OF NATURAL GAS IN THE GAS-HYDRATE STATE

M.V. Bosyi¹, V.V. Klymenko²

¹lecturer at the Department of Materials Science and Foundry,
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-3090-0427

²Ph.D. Professor at the Department of Electrical Systems and Energy Management,
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine
ORCID ID: 0000-0001-6840-7307

Summary

Introduction. Currently, the demand for natural gas consumption in Ukraine and in the world is constantly growing. Traditional technologies for its transportation are often inefficient and do not contribute to the development of small deposits. The transportation of natural gas is currently carried out by sea using such technologies as LNG-technology, CNG-technology and especially noteworthy NGH-technology – gas in hydrated form. **The aim of the work** is to substantiate promising technologies for gas transportation in gas hydrate form and to develop a circuit-technological solution for the application of hydrate formation in hydrocarbon gas production, transportation and use for low-flow fields and circuit-technological solution for regasification of hydrate pellets in a container for their transportation. **Results.** Prospects for the introduction of gas transportation technology in gas hydrate form are substantiated. The advantages of NGH-technology in comparison with other technologies are given. According to the NGH-technology known today, it is proposed to form gas hydrates in the form of pellets covered with a thin layer of ice. The choice of pellet shape and the sequence of their manufacture are aimed at optimizing the processes of NGH-technology. **Conclusions.** Schematic technological solutions are offered: the first – application of hydration formation process for extraction and preparation for transportation of hydrocarbon gases from low-debit field; the second is regasification of hydrate pellets in a container for their transportation. This technology allows to obtain gas hydrate pellets with minimal energy consumption, and them transporting in this form will significantly reduce the cost of transport equipment.

Key words: natural gas, sea transport, pressure, temperature, hydration, gas hydrate pellets, regasification.

Вступ. Нині ефективне транспортування природного газу – важливий чинник енергетичної безпеки України. У процесі морського транспортування газу використовують технології скраплення газу та LNG-танкери (газовози). Проте не тільки LNG-технології розглядаються нині як альтернатива трубопровідному транспорту. Альтернативою для морського транспортування газу є його перевезення у стиснутому стані – CNG-технології [1].

LNG-технологія потребує енерговитратної і високовартісної інфраструктури зі скраплення і регазифікації [1]. Альтернативою для морського транспортування газу, особливо з ізольованих родовищ, є його перевезення у вигляді CNG-технології. Технологія CNG має нижчу вартість виробництва й зберігання порівняно з LNG-технологією, оскільки не потребує дорогого процесу охолодження та криогенних резервуарів [2].

У разі порівняння перевезення газу танкерами LNG-технологією і CNG-технологією відстань, з якої більш ефективно транспортувати газ у вигляді цих технологій, може змінюватися залежно від типу проєкту, розміру родовища, місткості ринку та інших економічних умов. Загалом витрати з перевезення CNG-технологією порівняно з LNG-технологією є нижчими у разі відстані менш ніж 2500 км.

Натепер на різних стадіях розробки і втілення є кілька альтернативних технологій транспортування природного газу NGH-технології – газ у газогідратній формі; GTL-технології – газ у рідкій формі; GTW-технології – газ у електроенергію.

Застосування NGH-технології порівняно як з традиційним трубопровідним транспортом, так і транспортом LNG-технології буде економічно вигідним починаючи з відстані 1000 км [3; 4]. До перспективних напрямів транспортування природного газу та подальших досліджень і впроваджень належать такі як: розробка сучасних енергоощадних технологій отримання метану з газогідратних покладів; розробка процесів та обладнання безтрубопровідного транспортування метану в гідратному стані морським транспортом [4].

Постановка проблеми. Нині посилюється інтерес до газових гідратів у всьому світі, у деяких країнах уже розпочалося їх дослідно-промислове освоєння. Морські газогідрати визнані фахівцями найперспективнішим альтернативним паливом у багатьох країнах, над їх розвідкою й освоєнням активно працюють у США, Японії, Кореї, Франції, Німеччині, Великобританії, Канаді та Індії. Японська держкорпорація нафти, газу і металів (JOGMEC) уперше у світі змогла видобути газ із гідрату метану на дні океану [4]. Значно далі просунулися дослідження в галузі перевезення природного газу у вигляді газових гідратів. У Кореї освоєнням газогідратних покладів займається державна компанія Korea National Oil Corp. Потужність газогідратів на корейському шельфі Японського моря оцінюються в 1 трлн м³ метану. За оцінками американської компанії Mineral Management Service, запаси газогідратного газу в Мексиканській затоці можуть досягати астрономічного значення – 600 трлн м³ метану.

Нині Україна вкрай зацікавлена в розвитку газогідратних технологій. Видобування метану з природних газових гідратів дасть змогу замінити значну частину імпорту природного газу, а в майбутньому – відмовитися від нього взагалі. Транспортування природного газу у вигляді гідратів також є актуальним як альтернатива його перевезенню у зрідженому (скрапленому) стані. У результаті досліджень, здійснених у 1990-х роках Інститутом геологічних наук НАН України, у Чорному морі було виявлено три зони гідратоутворення із запасами, загальні обсяги яких оцінюються в 50–60 трлн м³ метану [6; 7].

Натепер у світі і в Україні на різних стадіях розробки або впровадження існують технології та технологічні рішення, які пов'язані із газогідратним транспортом природного газу [3–10]. Капітальні витрати на втілення газогідратної технології порівняно з LNG-технологією є на 12 % нижчими [8].

Нині наявні проблеми накопичення, транспортування та зберігання природного газу. При цьому традиційні технології його транспортування трубопроводами чи у вигляді скрапленого або стисненого газу часто виявляються менш ефективними.

Це стосується, наприклад, проблеми забезпечення споживачів природним газом у разі відсутності трубопроводів та видобування газу з необлаштованих родовищ. Тому актуальними стають технології транспортування і зберігання газу в гідратному стані, а також розробки низькорентабельних родовищ і дорозробки вже виснажених родовищ за допомогою конверсії газу, що видобувається з гідратів. З цього випливає, що стають важливими питання створення установок з виробництва газових гідратів та транспортування природного газу в газогідратному стані.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Нині цікавою може бути технологія норвезьких дослідників з перетворення природного газу в газогідрат. Ідея технології в тому, що газ перетворюється на заморожений гідрат, змішується з охолодженою нафтою до консистенції рідкої глини і в такому стані перевозиться, наприклад, танкером на берег. Його перевага в тому, що отримана газонафтова суміш, охолоджена до температури мінус 10 або мінус 20 °С, зберігає стабільність за атмосферного тиску [9].

В Японії побудовані дві напівпромислові установки з отримання льодогідратних «пігулок», які можна зберігати і перевозити за низьких температур. У Великобританії створена дослідно-промислова установка для відпрацювання технології отримання газових гідратів на морських платформах з подальшим їх транспортуванням [10].

В галузі досліджень і створення установок з виробництва газогідратів лідером є Японія. Компанія Mitsui Engineering & Shipbuilding Co разом з JOGMEC створила першу технологічну (напівпромислову) установку. На першій стадії утворюється пульпа гідрату методом барботажа. На другій – газогідрати очищаються, після цього їм надається сферична форма (діаметром 5–70 мм). Подальше зберігання газогідратів здійснюється за атмосферного тиску і температури близько мінус 20 °С, тобто за термобаричних умов, коли виявляється ефект самоконсервації. Продуктивність установки – 600–800 кг/доб., але у разі необхідності може бути збільшена до 5–6 т [11].

Натепер Японією розпочато можливість морського транспортування природного газу в газогідратному стані, або NGH (natural gas hydrate). Для зберігання і транспортування газових гідратів потрібна температура, набагато ближча до природної. Тиск у разі мінусових значень температури гідрату можна знизити до атмосферного, тоді й устаткування для його отримання та спеціальні транспортні засоби для перевезення будуть дешевші, наприклад, за транспортування зрідженого метану [10; 11].

Аналіз інформаційних джерел стосовно розробок, пов'язаних із транспортом газу в газогідратній формі, показав, що найбільш досконалим і обґрунтованим є метод виробництва газових гідратів для транспортування і зберігання, який захищений патентом US No. 5536893 [12]. З'являються сучасні технології, що дозволяють забезпечити можливість розробки віддалених газових родовищ і утилізації попутного газу одиночних родовищ нафти, в т. ч. і на шельфі, для яких прокладка газопроводу нерентабельна. В основі цих технологій лежить спосіб створення замороженого гідрату газу, змішаного з льодом. При цьому отримана «газо-буферна» суміш охолоджується до температури, близької до нуля градусів, і зберігає стабільність у разі нормального атмосферного тиску. Очевидно, що така технологія дозволить насамперед вирішити завдання транспортування газу

без використання трубопроводу і безпечного зберігання газогідратної суміші за атмосферного тиску і температури [13].

Технологію транспортування газу у газогідратній формі доцільно порівнювати із технологією транспортування зрідженого газу (рис. 1). Порівняння ефективності вказаних технологій показало, що загальні витрати транспортування природного газу у газогідратному стані виявилися на 12–24 % нижчими [9]. До переваг газогідратних технологій також слід віднести простіші умови транспортування та зберігання.

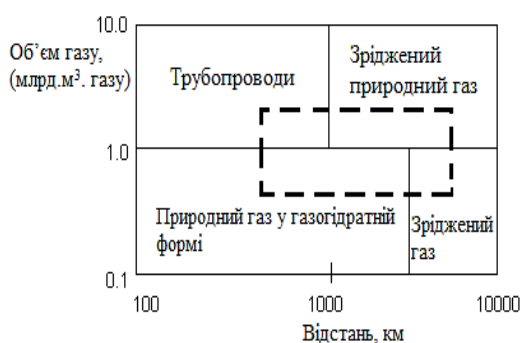


Рис. 1. Ефективність транспортування природного газу до споживачів за різними технологіями [9]

Зріджений природний газ необхідно транспортувати за температури $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ та високого тиску, що небезпечно для довкілля [8]. А природний газ у газогідратній формі може знаходитися під час зберігання чи переміщення за температури мінус $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ [7].

Отже, транспортування газогідрату до місця зберігання здійснюється у замороженому вигляді морським транспортом (із теплоізольованими бункерами для гранульованого газогідрату і льодогазогідратних блоків) [14].

Одним із основних процесів газогідратних технологій, що розробляються у світі, є утворення газогідратних капсул, гранул чи блоків, придатних до транспортування і довгострокового зберігання. Для запобігання втрат під час транспортування і зберігання утворених газогідратів на їх поверхні доцільно утворити льодяну кірку з метою їх примусової консервації [5–12; 14].

Отже, натепер актуальними стають технології транспортування і зберігання газу в гідратному стані, а також розробки низькорентабельних родовищ і дорозробки вже виснажених родовищ за допомогою конверсії газу, що видобувається з гідратів. З цього випливає, що стають важливими питання створення установок з виробництва газових гідратів та транспортування газогідратів у вигляді гранульованого газогідрату, про що свідчать останні досягнення японських фахівців.

Формулювання цілей статті. Метою цієї роботи є обґрунтування перспективних технологій транспортування газу в газогідратній формі і розробка схемно-технологічного рішення застосування процесу гідратоутворення під час видобутку вуглеводневих газів, їх транспортування і використання для умов малодебітних родовищ та схемно-технологічного рішення регазифікації гідратних пелет у контейнері для їх транспортування.

Виклад основного матеріалу. Газогідрати – це кристалічні сполуки води та газу, які є стійкими за низьких температур та підвищеного тиску. Найпоширенішими газогідратами є гідрати метану – сполуки води та метану, поклади яких у донних осадових породах морів та океанів є досить значними в різних частинах світу, які в перспективі можуть стати альтернативним джерелом природного газу (рис. 2) [15–17].

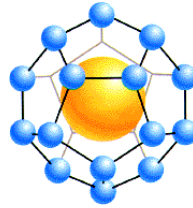


Рис. 2. Загальний вигляд структури газогідрату метану [15–17]

Термобаричні умови процесів утворення, зберігання і плавлення газогідратів є досить «м'якими», що дозволяє їх ефективно використовувати в різних технологічних напрямках, зокрема для виробництва та акумулювання холоду, стиснення газів, розділення газових сумішей, опріснення солоних вод, видобування метану із покладів газогідратів та транспортування природного газу у газогідратній формі (рис. 3) [3–12; 15–17].



Рис. 3. Газогідратні капсули в контейнері [7]

Нині обґрунтовано перспективи впровадження технології транспортування газу в газогідратній формі. Технологія переведення природного газу в гідратний стан розроблена краще, ніж технологія добування метану з природних гідратів. Проведено дослідно-промислові випробування гідратної технології отримання капсул (пелет), що складаються з гідратів метану та води, організовано виробництво гідратних капсул продуктивністю 0,7 т/день (за метаном), здійснено оцінку вартості гідратного способу транспортування природного газу [5]. Згідно з розробленою технологією, природний газ очищують від вуглекислого газу та сірководню і у взаємодії з водою отримують у вигляді гранул гідратів. Гранули гідратів зберігають у бункері і транспортують морем у контейнерах за температури мінус 20 °С. Потім поступово перевантажують у цистерни високого тиску, в яких перевозять до входу газової магістралі. Перед закачуванням до магістралі здійснюють регазифікацію гідратів шляхом дисоціації (розкладання) під впливом зовнішнього нагрівання.

Розглядаються перспективи розвитку гідратних технологій і транспортування газу як гідратів; тривалого зберігання природного газу у гідратному стані; видобутку газу з його гідратних родовищ [6; 7]. З метою вивчення процесів утворення та дисоціації гідратів вуглецевих сполук, що входять до складу природного газу, в Інституті газу НАН України створено гідратний стенд СГ-16: 100. Також на базі гігрометра ТОРОЗ-3-2ВИЗ (власної розробки Інституту газу НАН України) створено експрес-метод визначення термодинамічних та кінетичних параметрів гідратів. Для прискорення процесів гідратування робочу камеру гігрометра було обладнано барботером. Шляхом усереднення даних температури води й газу за заданого тиску в камері барботера фіксують термодинамічні умови утворення гідратів для такої технологічної схеми барботування [6; 7].

У роботах [8; 14] запропоновано та експериментально обґрунтовано основні елементи технології виробництва газогідратних блоків великих розмірів з метою їх транспортування і довгострокового зберігання.

У статті [18] розглянуто спосіб підвищення ефективності видобування газу з виснажених родовищ шляхом застосування газогідратної технології та представлено схемне рішення установки для його реалізації. Проаналізовано технології видобування метану з газогідратних покладів в акваторії Чорного моря та розглянуто напрями досліджень окремих складників газогідратних технологій [19]. Підвищення ефективності газогідратної технології транспортування природного газу наведено в роботі [20].

Нами пропонується схемно-технологічне рішення застосування процесу гідратування для видобутку та підготовки до транспортування вуглеводневих газів з малодобітного родовища – це дасть змогу розвивати сучасні технології транспортування газу в газогідратній формі. За цим схемним рішенням видобуток та підготовка до транспортування вуглеводневих газів з малодобітного родовища здійснюється таким чином (рис. 4).

Роботу запропонованого нами схемно-технологічного рішення розглянемо на наступному прикладі. Природний газ – суміш природного газу з іншими вуглеводнями зі свердловини 1 з тиском $p = 0,1$ МПа і температурою $T = 293$ К подається у сепаратор 2, де відокремлюється від крапель нафти, води і конденсату 3. Очищений газ стискається в компресорі 4 і охолоджується в теплообміннику 5. Стиснутий і охолоджений газ через ежектор 6 та барботажний пристрій 11 поступає в кристалізатор 7, куди також подається вода. В кристалізаторі, де підтримуються $p = 2$ МПа і $T = 293$ К, утворюються газогідрати, а теплота гідратування відводиться пропаном, що кипить у випарнику 8. Тиск води не є критичною величиною для утворення газогідрату і він може бути встановлений на відповідному рівні, більш високому, ніж тиск у кристалізаторі 7. Але тиск води повинен бути відрегульований так, щоб забезпечити достатнє за обсягом введення води в кристалізатор 7. Швидкість утворення газогідрату можна збільшити за допомогою рециркулюючого непрореагованого газу, який можна також подавати в кристалізатор до основного потоку живлення свіжим газом через ежектор 6, досягаючи в такий спосіб ще кращого перемішування газу і води (суспензії).

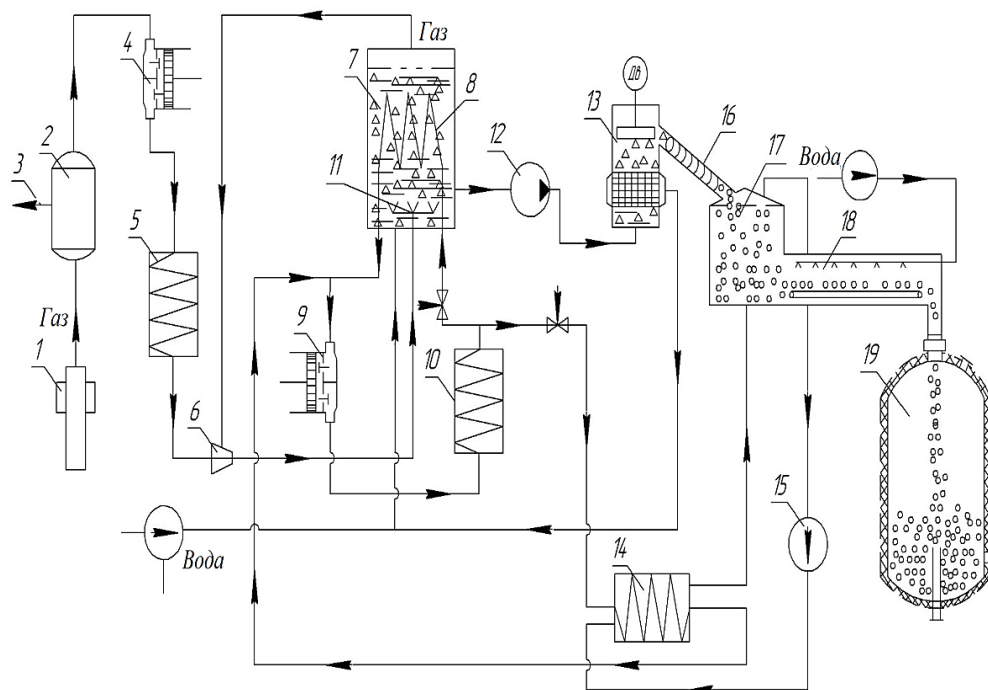


Рис. 4. Схемно-технологічне рішення застосування процесу гідратування для видобутку та підготовки до транспортування вуглеводневих газів з малодобітного родовища:

1 – газ зі свердловини; 2 – сепаратор; 3 – конденсат; 4 – компресор;
5, 14 – теплообмінник; 6 – ежектор; 7 – кристалізатор; 8 – випарник;
9 – компресор холодильної машини; 10 – конденсатор; 11 – барботажний пристрій;
12 – насос; 13 – сепаратор газогідратів; 15 – вентилятор для циркуляції газу;
16 – гвинтовий шнек (екструдер); 17 – ємність для утворення газогідратних пелет;
18 – пристрій консервації газогідратних пелет; 19 – контейнер для зберігання пелет

Джерело: власна розробка авторів

Водогазогідратна суспензія подається насосом 12 у сепаратор газогідратів 13, де частинки гідрату відокремлюються від води, яку змішують з потоком свіжої води і направляють знову в кристалізатор 7. Після сепарації водогідратної суспензії гідрати поступають у пристрій для гранулювання частинок гідрату 16 (екструдер). Воду, яка виділяється у процесі екструдерування, направляють знову в кристалізатор (на рис. 4 не показано), а з газогідратів формують газогідратні пелети, наприклад, у формі кульок діаметром 20 мм. Пелети в грануляторі 17 охолоджуються до температури ≈ -20 °С та частково підморожуються газом, який подається з випарника 14, утворюючи гранули.

Потім такі гранули поступають по транспортеру в пристрій для консервації гідратів 18, де зверху на них розпилюється охолоджена вода і гідрати покриваються тонким шаром льоду, зберігаючи при цьому загальний вміст газу усередині частинок. Діаметр стиснутих частинок гідрату залежить від способу гранулювання і необхідного ступеня стиснення, але типовий діаметр гранульованих

частинок гідрату природного газу перебуває в межах 10–20 мм. Щільність гранульованих частинок гідрату газу становить 850–950 кг/м³. Товщину крижаної оболонки можна змінювати за необхідності, досить, щоб крижана оболонка мала товщину 0,5–1,5 мм. Крижана оболонка льоду має вплив на стабільність частинок гідрату. По-перше, запобігається дифузія газу зсередини в зовнішнє середовище, тому що дифузія газу крізь лід дуже мала і нею можна знехтувати. По-друге, крижана оболонка – це захисне покриття, що втримує підвищений внутрішній тиск у частинці гідрату, достатній для запобігання розкладання типового гідрату природного газу у разі температур, на декілька градусів нижчих 0 °С, і атмосферного тиску.

Отримані таким чином гранульовані, охолоджені і покриті крижаною оболонкою (тонким шаром льоду) частинки гідрату у вигляді пелет надходять у резервуар-контейнер 19 для зберігання. Цей контейнер придатний до транспортування та надалі і для проведення процесу регазифікації.

Як зазначено вище, утворені відповідним чином газогідратні пелети, покриті крижаною плівкою невеликої товщини, можна довгостроково зберігати та транспортувати за атмосферного тиску і температур –10...–20 °С, але навіть за температури –1,5 °С протягом певного часу вони зберігають свою стійкість.

Нескладні розрахунки показують, що у разі витрат природного газу ~52 м³ за годину (1250 м³ за добу) необхідно ~3 год, щоб утворити 1 м³ газогідратів.

Газогідратні пелети, підготовлені до транспортування, можна завантажувати в пластмасові термоізовані ємності-контейнери, наприклад, розміром $d \times h = 0,7 \times 1,2$ м. В одну ємність поміститься ~0,4–0,5 т газогідратів, а таких ємностей з урахуванням часу на регазифікацію досить буде 12 шт.

У разі необхідності накопичення резервної маси газогідратів, наприклад, внаслідок нерівномірного споживання природного газу, доцільно на місці споживання розмістити додаткову стаціонарну ємність (або кілька ємностей) для зберігання газогідратних пелет за атмосферного тиску і невеликих від'ємних температур, в яку можна було б розвантажувати газогідрати з транспортних ємностей.

Регазифікацію газогідратів можна здійснювати безпосередньо в транспортних контейнерах шляхом подачі в них теплої води з температурою 30–40 °С, для нагрівання якої використовується тепловий насос (рис. 5).

Процес регазифікації в транспортній ємності здійснюється таким чином. У патрубок 4 подається тепла вода з теплового насосу 8. У разі контакту теплої води з пелетами вони спочатку підігріваються до температури плавлення, а потім плавляться за тиску $p = 0,15$ МПа. Газ, який виділяється через патрубок 2, направляється до споживача, а холодна вода через патрубок 5 повертається до теплового насосу 8 для підігріву. Тиск газу після регазифікації повинен дорівнювати 0,15 МПа. Тому швидкість плавлення газогідратів і, відповідно, кількість виділеного газу потрібно регулювати, узгоджуючи їх з графіком споживання. В теплий період року регазифікатор доцільно використовувати як охолоджувач для системи кондиціонування повітря.

Розробка способів ефективного транспортування газу є одним з актуальних завдань не тільки газової і нафтогазової галузі, але й енергетичного комплексу загалом. Тому останнім часом з'являються технології, що дозволяють забезпечити

можливість розробки віддалених газових родовищ і утилізації попутного газу одиночних родовищ газу і нафти, в т. ч. і на шельфі, для яких прокладка газопроводу нерентабельна.

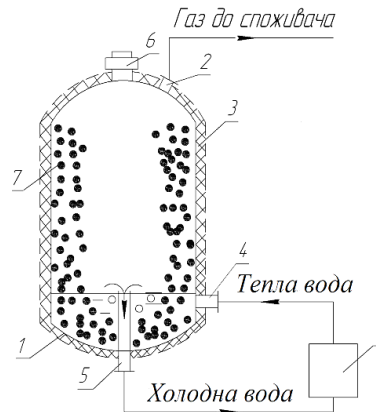


Рис. 5. Схемно-технологічне рішення регазифікації гідратних пелет у контейнері для їх транспортування

- 1 – корпус транспортної ємності; 2 – патрубок подачі газу до споживача;
3 – термоізоляція; 4, 5 – патрубок для підводу теплої води і відводу холодної;
6 – люк для завантаження газогідратних пелет;
7 – газогідратні пелети; 8 – тепловий насос

Джерело: власна розробка авторів

До переваг газогідратних технологій також слід віднести простіші умови транспортування та зберігання. Природний газ у газогідратній формі може знаходитися під час зберігання чи переміщення за температур мінус 20 °С. Слід відзначити, що для транспортування газу у вигляді газових гідратів потрібні спеціальні герметичні ємності. Під час транспортування гідратів потрібно контролювати тиск і температуру всередині ємності, щоб не дозволити розтанути крижаній кірці на поверхні гідратів. Як уже було зазначено, транспортування гідратів можна здійснювати навіть за атмосферному тиску та температури нижче 0 °С.

Для України транспортним засобом для перевезення газогідратів будуть, на нашу думку, в основному автомобільний, річковий, морський і частково залізничний транспорт. Тому транспортування газогідрату до місця зберігання буде здійснюватися в замороженому вигляді гранульованого газогідрату (газогідратних пелет), покритого тонким шаром льоду в теплоізольованих транспортних контейнерах автомобільним і морським транспортом.

Висновки. Проаналізовано стан наукових і практичних досліджень у галузі газогідратних технологій. Розглянуто питання застосування газогідратної технології для транспортування природного газу в газогідратній формі. З'ясовано, що технологія морського транспортування природного газу в газогідратній формі має низку суттєвих переваг над LNG- і CNG-технологіями. Загальні витрати транспортування природного газу у газогідратному стані виявилися на 12–24 % нижчими, ніж традиційні технології. NGH-технологія максимально підходить для вирішення проблеми диверсифікації поставок природного газу в Україну та для розробки

морських родовищ газу і нафти. Запропоновано та описано схемне рішення технологічного застосування процесу гідратуутворення під час видобутку вуглеводневих газів, їх транспортування і використання для умов малодебітних родовищ та схемно-технологічного рішення регазифікації гідратних пелет у контейнері для їх транспортування. Показано, що транспортування природного і попутного газу у газогідратній формі є особливо перспективним у разі розробки відносно малих і віддалених від інфраструктури родовищ, де недоцільно будувати трубопровід чи інфраструктуру LNG-технології.

ЛІТЕРАТУРА

1. Economides M., Sun K., Subero G. Compressed Natural Gas (CNG): An Alternative to Liquefied Natural Gas (LNG). *Journal SPE Production & Operations*. Volume 21, Number 2. SPE 92047. *Society of Petroleum Engineers*. 2006. P. 318–324.
2. Seungyong Chang. Comparing Exploitation and Transportation Technologies for Monetisation of Offshore Stranded Gas. *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*. Indonesia, Jakarta. 2001. 17–19 April.
3. Gudmundsson J. Storing natural gas as frozen hydrate / J. Gudmundsson, M. Parlaktuna, A. Khokhar. *SPE Production and Facilities*. 1994. February. P. 69–73.
4. Kanda H. Economic study on natural gas transportation with natural gas hydrate (NGH) pellets. *23rd World Gas Conference*, Amsterdam. 2006. 11 p.
5. Тарко Я. Б., Педченко Л. О., Педченко М. М. Перспективи газогідратної технології на ринку морських перевезень природного газу. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2012. Випуск 2 (43). С. 49–55.
6. Жук Г. В., Пятничко А. И., Крушневич В. Т., Федоренко Д. С. Метаногидраты: анализ ситуации, исследования свойств, проблемы добычи и транспортирования. *Технические газы*. 2014. № 2. С. 3–10.
7. Жук Г. В., Пятничко А. И., Крушневич В. Т., Федоренко Д. С., Клименко В. В. Метаногидратные технологии в Украине: исследования и перспективы. *Геология. Гірництво. Нафтогазова справа. Енергетика*. 2014. № 1 (3). С. 3–10.
8. Педченко Л. О., Педченко М. М. Транспортування природного газу у газогідратній формі. *Геология. Гірництво. Нафтогазова справа. Енергетика*. 2014. № 1 (3). С. 100–113.
9. Trondheim Gudmundsson J. S. Gas-in-ice: Concept evaluation / J. S. Gudmundsson, M. Parlaktuna. Technical report, Department of Petroleum Engineering and Applied Geophysics. Norwegian University of Science and Technology 1991.
10. Якушев В. С., Герасимов Ю. А., Квон В. Г., Истомина В. А. Современное состояние газогидратных технологий. Обзор информации. Москва : ООО «ИРЦ Газпром». 2008. 88 с.

11. Nakai S. Development of natural gas hydrate (NGH) supply chain. *Proceedings of the 25th worldgas conferences*. Kuala Lumpur, Malaysia, June 4–8. 2012. P. 367–375.
12. Gudmundsson J. S., US Patent No. 5536893. Method for production of gas hydrates for transportation and storage. J. S. Gudmundsson; inventor J. S. Gudmundsson. No. 195748; 07.01.1994; pub. 16.07. 1996. 7 p.
13. Хавкин А. Я. Перспективы создания газогидратной промышленности. *Вестник РАОН*. 2010. Т. 10. № 1. С. 42–45.
14. Білецький В. С., Педченко Л. О., Педченко М. М. Технологія формування газогідратних блоків з метою транспортування та зберігання вуглеводневих газів. *Вісті Донецького гірничого інституту*. 2012. Випуск № 1–2 (30–31). С. 363–372.
15. Бык С. Ш., Макогон Ю. Ф., Фомина В. И. Газовые гидраты. Москва : Химия. 1980. 296 с.
16. Макогон Ю. Ф. Гидраты природных газов. Москва : Недра. 1974. 208 с.
17. Макогон Ю. Ф. Газогидраты, история изучения и перспективы освоения. *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*. 2010. № 2. С. 5–21.
18. Клименко В. В., Зоценко М. Л., Бандуріна О. В., Педченко Л. О. Підвищення ефективності видобування і підготовки газу з виснажених родовищ шляхом застосування газогідратної технології. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. 2012. Випуск 2 (73). С. 92–95.
19. Онищенко В. О., Клименко В. В. Застосування газогідратних технологій в нафтогазовій промисловості. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2011. № 4 (41). С. 5–8.
20. Pedchenko L. A., Pedchenko M. M. Improving the efficiency of gas hydrate technology of transportation of natural gas. “*Problems of energy saving and nature use 2013*” : conference reports materials. Budapest. 2014. P. 70–78.

REFERENCES

1. Economides, M., Sun, K., Subero, G. (2006). Compressed Natural Gas (CNG): An Alternative to Liquefied Natural Gas (LNG). *Journal SPE Production & Operations*. Volume 21, Number 2. SPE 92047. Society of Petroleum Engineers, 318–324. [in English]
2. Seungyong, Chang (2001). Comparing Exploitation and Transportation Technologies for Monetisation of Offshore Stranded Gas. *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*. Indonesia, Jakarta, 17–19 April. [in Indonesian]
3. Gudmundsson, J. S. (1994). Storing natural gas as frozen hydrate / J. Gudmundsson, M. Parlaktuna, A. Khokhar. *SPE Production and Facilities*. February, 69–73. [in English]
4. Kanda, H. (2006). Economic study on natural gas transportation with natural gas hydrate (NGH) pellets. 23rd World Gas Conference, Amsterdam, 11. [in Netherlands]

5. Tarko, Ya. B., Pedchenko, L. O. & Pedchenko, M. M. (2012). Prospects of gas hydrate technology in the market of maritime transportation of natural gas [Perspektyvy hazohidratnoi tekhnolohii na rynku morskykh perevezhen pryrodnoho hazu]. *Exploration and development of oil and gas fields*, 2 (43), 49–55. [in Ukrainian]
6. Zhuk, G. V., Pyatnichko, A. I., Krushnevich, V. T., & Fedorenko, D. S. (2014). Methanohydrates: situation analysis, property studies, mining and transportation problems [Metanogidraty: analiz situatsii, issledovaniya svoystv, problemy dobychi i transportirovaniya]. *Technical gases*, No. 2, 3–10. [in Ukrainian]
7. Zhuk, G. V., Pyatnichko, A. I., Krushnevich, V. T., Fedorenko, D. S., & Klymenko, V. V. (2014). Methanohydrate technologies in Ukraine: research and prospects [Metanogidratnyye tekhnologii v Ukraine: issledovaniya i perspektivy]. *Geology. Mining. Oil and gas business. Energy*, No. 1 (3), 3–10. [in Ukrainian]
8. Pedchenko, L. O., & Pedchenko, M. M. (2014). Transportation of natural gas in gas hydrate form [Transportuvannia pryrodnoho hazu u hazohidratnii formi]. *Geology. Mining. Oil and gas business. Energy*, No. 1 (3), 100–113. [in Ukrainian]
9. Trondheim, Gudmundsson J. S. (1991). Gas-in-ice: Concept evaluation / J. S. Gudmundsson, M. Parlaktuna. Technical report, Department of Petroleum Engineering and Applied Geophysics, Norwegian University of Science and Technology. [in English]
10. Yakushev, V. S., Gerasimov, Y. A., Kwon, V. G., & Istomin, V. A. (2008). Modern state of gas hydrate technologies [Sovremennoye sostoyaniye gazogidratnykh tekhnologiy]. *Rev. inf. Moskva : LTD “IRTS Gazprom”*, 88. [in Russian]
11. Nakai, S. (2012). Development of natural gas hydrate (NGH) supply chain. *Proceedings of the 25th worldgas conferences*. Kuala Lumpur, Malaysia, June 4–8. P. 367–375.
12. Gudmundsson, J. S., US Patent No. 5536893. Method for production of gas hydrates for transportation and storage. J. S. Gudmundsson; inventor J. S. Gudmundsson. No. 195748; 07.01.1994; pub. 16.07.1996, 7.
13. Khavkin, A. Ya. (2010). Prospects for the creation of the gas hydrate industry [Perspektyvy sozdaniya hazohidratnoy promyshlennosti]. *Vestnik RAEN*, V. 10, No. 1, 42–45. [in Russian]
14. Biletskyi, V. S., Pedchenko, L. O., & Pedchenko, M. M. (2012). Technology of formation of gas-hydrate blocks for the purpose of transportation and storage of hydrocarbon gases [Tekhnolohiia formuvannia hazohidratnykh blokiv z metoiu transportuvannia ta zberihannia vuhlevodnykh haziv]. *News of Donetsk Mining Institute*, No. 1 (30), 2 (31), 363–372. [in Ukrainian]
15. Byk, S. Sh., Makoron, Yu. F., & Fomina V. I. (1980). Gas hydrates [Hazovye hydraty]. Moskva : Khimiya, 296. [in Russian]

16. Makogon, Yu. F. (1974). Hydrates of natural gases [Hydraty pryrodnykh hazov]. Moskva : Subsoil, 208. [in Russian]
17. Makogon, Yu. F. (2010). Gas hydrates, history of study and prospects of development [Hazohydraty, ystoryya yzuchenyya y perspektyvy osvoenyia]. *Geology and minerals of the World Ocean*, No. 2, 5–21. [in Russian]
18. Klymenko, V. V., Zotsenko, M. L., Bandurina, O. V., & Pedchenko, L. O. (2012). Improving the efficiency of extraction and preparation of gas from depleted fields through the use of gas hydrate technology [Pidvyshchennia efektyvnosti vydobuvannia i pidhotovky hazu z vysnazhenykh rodovyshch shliakhom zastosuvannia hazohidratnoi tekhnolohii]. *Bulletin of the Mykhailo Ostrogradsky KrNU*, 2 (73), 92–95. [in Ukrainian]
19. Onyshchenko, V. O., & Klymenko, V. V. (2011). Application of gas hydrate technologies in the oil and gas industry [Zastosuvannia hazohidratnykh tekhnolohii v naftohazovii promyslovosti]. *Exploration and development of oil and gas fields*, No. 4 (41), 5–8. [in Ukrainian]
20. Pedchenko, L. A., & Pedchenko, M. M. (2014). Improving the efficiency of gas hydrate technology of transportation of natural gas. “Problems of energy saving and nature use 2013”: conference reports materials. 70–78. [in Hungarian]