
ГАЗОГІДРАТНА ТЕХНОЛОГІЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ МОРСЬКИМ ТРАНСПОРТОМ

Босий М. В.

DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-653-9-8>

ВСТУП

Важливим чинником енергетичної безпеки України є ефективне транспортування газу у вигляді газогідратів. На даний час для транспортування газу використовуються технології скрапленого газу і технологія LNG-танкери. LNG-технологія розглядається наразі як альтернатива трубопровідному транспорту. Альтернативна технологія для транспортування газу морськими суднами є перевезення газу у стисненому стані – це CNG-технологія¹.

Ринок європейського газу значно буде впливати на плани розробки альтернативних шляхів транспортування газу в Україну. Перспектива в майбутньому для України – це можливість імпорту газу з США, Канади, європейських країн, як Велика Британія, Норвегія, та країн близького сходу – Катару, ОАЕ, Іраку.

Отже ефективність альтернативних поставок природного газу морським транспортом буде залежати від технічних і економічних показників, наведених вище способів транспортування газу.

Так, наприклад, технологія LNG буде потребувати значної енерговитратної та високоартісної інфраструктури зі скраплення і регазифікації природного газу, яку треба будувати. Підприємства LNG-технології є довгостроковими інвестиційними проектами, для яких необхідно будівництво або оренда танкерного морського флоту. Наведені чинники будуть перешкоджати, по-перше, організації транспортування газу за допомогою LNG-технології з невеликих ізольованих родовищ, по-друге – це масштабність та неперервність виробництва технології-LNG,

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.

які необхідні для підтримання термодинамічної ефективності, а також мінімізації витрат на виробництво даної технології².

Альтернативним морським способом для транспортування природного газу з родовищ, які ізольовані, є перевезення газу за допомогою CNG-технології. Природний газ при перевезенні та зберіганні в ємностях буде перебувати у стисненому стані під високим тиском 200–250 атм.

Технологія CNG складається з процесу стискання газу, транспортування його танкерами CNG, та наявності декомпресійного терміналу для зберігання газу. CNG-технологія має звісно нижчу вартість його виробництва та зберігання в порівнянні з LNG-технологією, тому що виробництво за CNG-технологією не буде включати процес охолодження, а також і криогенних резервуарів. На даний час танкери, якими перевозять газ за допомогою CNG-технології на великі відстані, знаходяться на стадії розробки і будуть розглядатися конкурентоспроможними для транспортування газу LNG-технологією.

Порівняння спроможності транспортування газу танкерами за технологією CNG з танкерами за LNG-технологією полягає в наступному: вони ефективні в різних за масштабами проектах при транспортуванні газу. Підприємства та морські суда LNG-технології при великих капітальних витратах будуть рентабельні, використовуючи їх в інноваційних проектах з великим запасом газу, а також ринками збуту високого обсягу³. Морські суда CNG-технології будуть більш мобільні, вони складаються з суден звісно меншого розміру, але більші за кількістю, це дає можливість транспортувати газ щодня безпосередньо аж до відповідно розподільчого трубопроводу. Проект CNG-технології можна побудувати за короткий термін і він буде мати значно більший дохід в порівнянні з проектом LNG-технології^{4, 5}.

Порівнюючи транспортування газу морськими судами LNG-технологією з CNG-технологією, відстань, за якою більш ефективно транспортування газу за CNG-технологією, змінюється в залежності від типу проекту, розмірів родовищ, ринку перевезення і других економічних умов. Загальні витрати з транспортування газу CNG-технологією в порівнянні з LNG-технологією є нижчими, наприклад, при відстані, менше 2500 км.

² Seungyong Chang. Comparing Exploitation and Transportation Technologies for Monetisation of Offshore Stranded Gas. Seungyong Chang // SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition: Indonesia, Jakarta. 2001. 17-19 April. P. 24-32.

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 Там само.

⁵ Kanda H. Economic study on natural gas transportation with natural gas hydrate (NGH) pellets. 23rd World Gas Conference, Amsterdam. 2006. 11p.

Перспективною технологією транспортування газу є застосування NGH-технології в порівнянні з традиційними технологіями – це трубопровідний транспорт і LNG-технологія. NGH-технологія – технологія транспортування і зберігання природного газу, яка заснована на його перетворенні в твердий гідратний стан при відповідних термодинамічних параметрах тиску та температури. Вона буде економічно вигідною на відстані 1000 км. Перспективними напрямками транспортування газу для подальшого дослідження та впровадження є наступне: розробка новітніх енергоощадних технологій, відповідно, отримання метану з покладів газогідратів; також розробка звісно процесів та устаткування без трубопровідного постачання метану в гідратному стані за допомогою морського транспорту⁶.

Наразі інтерес до проблеми газогідратів у світі, а також в Україні значно виріс, розпочинається їх промислове освоєння. Морські газогідрати зараз визнані сучасним найперспективнішим та альтернативним паливом у багатьох країнах світу, розвідкою та освоєнням їх активно займаються у США, Канаді, Великій Британії, Франції, Німеччині і Японії. Так японська компанія (JOGMEC) перша в світі видобула газ з гідратів метану з дна океану. На сьогодні дослідження по перевезенню природного газу у вигляді гідратів набувають широкого розповсюдження.

Так міністерство енергетики США разом з приватною фірмою Chevron проводять дослідження у рамках проєкту Gas Hydrates JIP в Мексиканській затоці. Згідно оцінки відомої американської компанії Mineral Management Service, природні запаси газогідратного газу в Мексиканській затоці досягають 600 трлн м³.

Україна також вкрай зацікавлена в розвитку газогідратних технологій за NGH-технологією. Отже видобування метану з природних газогідратів дасть можливість замінити більшу частину імпортного природного газу, а в подальшому даже повністю відмовитися від нього. Тому транспортування природного газу за допомогою газогідратів є актуальним питанням, як альтернатива його перевезенню звісно у зрідженому стані. Інститутом геологічних наук НАН України у 1990-х роках були проведені дослідження у Чорному морі та виявлені три зони гідратоутворення. Їх запаси сягають біля 50–60 трлн м³ метану⁷.

Технології добування метану з його гідратів будуть ґрунтуватися на порушенні термодинамічної рівноваги звісно в системі «метан – вода –

⁶ 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. Вип. 2 (43). С. 49 – 55.

⁷ Жук Г.В., П'ятничко О.І., Крушневич В.Т., Федоренко Д.С., Клименко В.В. Метаногідратні технології в Україні: дослідження і перспективи. *Геологія. Гірництво. Нафтогазова справа. Енергетика*. 2014. № 1(3). С. 3-10.

гідрат метану» відповідно шляхом локального підвищення температури, та зниження тиску, додавання також активного ще третього компонента (рідини або газу). При відсутності замкнутого простору звісно перші два шляхи будуть витратними, а різницю температури і тиску з довкіллям необхідно буде завжди підтримувати.

Наразі технологія з переведення природного газу в гідратний стан досконаліша, ніж технологія добування газу метану з природних гідратів. Успішно виконано дослідно-промислові випробування газогідратної технології отримання капсул (пелет), які складаються з гідратів метану та звісно води, організовано також виробництво гідратних капсул з продуктивністю 0,7 т/день (за метаном), ще здійснена оцінка вартості транспортування природного газу гідратним способом. Нині у світі існує кілька технологій, а також технологічних рішень, які пов'язані з газогідратним транспортуванням природного газу, вони знаходяться на різних стадіях розробки та впровадження^{8,9}.

Враховуючи екологічні умови України досить цікавою буде технологія норвезьких дослідників. Їх технологія по перетворенню природного газу в газогідрат дозволяє транспортувати газ як без використання трубопроводів, так і зберігання в наземних сховищах звісно при нормальному тиску. Тому практична цінність цієї технології полягає в тому, що вона буде забезпечувати можливість розробки, не тільки віддалених родовищ газу, а ще й утилізації попутного газу для окремих родовищ, які не входять звісно до складу великих нафтогазоносних зон, зокрема це стосується шельфів, для яких прокладення газопроводу нерентабельно. Суть цієї технології полягає в тому, що газ буде перетворюватися в заморожений гідрат, він змішується із охолодженою нафтою до консистенції відповідно рідкої глини і в такому стані буде перевозитися, наприклад, морськими судами до берега. При порівнянні з результатами попередніх досліджень в цьому напрямку дана технологія є технологічним проривом. Перевага в тому, що отримана звісно газонафтова суміш, при охолодженні до температури -10...-20 °С, буде зберігати стабільність при нормальному атмосферному тиску.

В Японії побудована напівпромислова установка з отримання також льодогазогідратних «пігулок», їх можна зберігати та транспортувати при низьких температурах. У Великій Британії вже створена

⁸ Педченко Л.О., Педченко М.М. Транспортування природного газу у газогідратній формі. *Геологія. 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.

дослідно-промислова установка, за допомогою якої відпрацьовують технологію отримання газогідратів на морських платформах з подальшим їх транспортуванням. Проте ефективної, тобто, (комерційно привабливої) промислової технології виробництва газогідратів поки ще не існує¹⁰.

Лідером по дослідженню та створенню установок для виробництва газогідратів є Японія. Відома компанія Mitsui Engineering & Shipbuilding Co разом з JOGMEC вже створили першу технологічну (напівпромислово) установку. На першому етапі утворюється гідратна пульпа методом барботажу. На другому етапі – газові гідрати будуть очищатися, далі їм надається сферична форма (діаметром 5-70 мм).

Вже подальше зберігання газових гідратів буде здійснюватися при атмосферному тиску і температурі біля -20 °С, тобто при термодинамічних умовах, при яких виявляється ефект самоконсервації. Продуктивність установки складає 600-800 кг/доб., але при необхідності вона може бути збільшена і до 5-6 т.

1. Аналіз відомих технологій транспортування природного газу у газогідратному стані

Зараз є проблеми з накопиченням, транспортуванням, а також і зберіганням природного газу. Разом з тим традиційні технології транспортування природного газу через трубопроводи або у вигляді скрапленого чи стисненого газу нерідко бувають не досить ефективними, наприклад, проблема забезпечення споживачів природним газом при відсутності трубопроводів або видобування газу з необлаштованих родовищ, тощо. Отже важливими стають технології транспортування і зберігання газу в гідратному стані, крім того, розробки низькорентабельних родовищ та дорозробки вже виснажених родовищ за допомогою конверсії газу, який видобувається з гідратів. Наслідком цього є важливі питання щодо створення установок з виробництва газових гідратів і транспортування природного газу в газогідратному стані.

Зараз Японією опрацьовуються можливості морського транспортування природного газу в газогідратному стані або NGH (natural gas hydrate). У зв'язку з тим що, необхідна для зберігання і транспортування газових гідратів температура, значно ближче до природної, а тиск при мінусових значеннях температури гідрату можна знизити до атмосферного, тому і устаткування для їх отримання та спеціальні транспортні засоби для його перевезення дешевші, наприклад, за транспортування зрідженого метану.

¹⁰ Nakai S. Development of natural gas hydrate (NGH) supply chain. Proceedings of the 25 th world gas conferences. Kuala Lumpur, Malaysia, June 4-8. 2012. P. 367-375.

Аналіз літературних джерел щодо розробок, пов'язаних із транспортуванням газу в газогідратній формі, вказав на те, що найбільш досконалим і обґрунтованим є спосіб виробництва газових гідратів для транспортування і зберігання, який захищений патентом. Цей спосіб включає підготовку газу і води, гідратоутворення, сепарацію (відділення від газогідрату газу і води, що не увійшли до складу гідрату), потім охолодження і заморожування газогідрату, далі формування гідратних частинок (наприклад, гранул, діаметром 2-20 мм), також охолодження і заморожування утворених гранул, та їх оббризування водою і заморожування потоком охолодженого газу. Відповідно до відомого винаходу даний спосіб виконується за допомогою установки, яка складається з реактора гідратоутворення, що має пристрої для подачі газу і води та виведення звісно водогазогідратної суміші, також внутрішній теплообмінник та охолоджувальний кожух; відповідно системи підготовки і подачі газу (сепаратора, компресора, теплообмінника); насоса подачі води (підпитування і рециркуляції); також системи подачі рециркульованого газу (компресора і теплообмінника); трифазного сепаратора; та теплообмінника охолодження гідратної маси; пристрою для формування гідратних капсул; ще звісно пристрою для нанесення на гідратні капсули води та теплообмінника для заморожування газогідратних капсул¹¹.

Сьогодні розробка ефективних способів транспортування газу вважається однією з актуальних задач не тільки нафтогазової галузі, але й енергетичного комплексу в цілому. Наразі з'являються технології, які дозволять забезпечити можливість розробки як віддалених газових родовищ так і утилізації попутного газу окремих родовищ нафти, в т.ч. і на шельфі, для них прокладка газопроводу нерентабельна. Основою цих технологій є спосіб створення замороженого гідрату газу, змішаного з льодом. Разом з тим, отримана «газо-буферна» суміш повинна охолоджуватися до температури, біля нуля градусів та буде зберігати стабільність при нормальному атмосферному тиску. Очевидно дана технологія дозволить передусім вирішити задачі транспортування газу, не використовуючи трубопровід та безпечно зберігання газогідратної суміші при нормальному тиску та температурі¹².

Тож значний науковий інтерес становить переведення газу в газогідратний стан та його транспортування. Водночас розширюється

¹¹ Gudmundsson J.S., US Patent No.5,536,893. Method for production of gas hydrates for transportation and storage / J.S. Gudmundsson; inventor J.S. Gudmundsson. №195748; 07.01.1994; pub. 16.07. 1996. 7р.

¹² Павленко А.М., Педченко Л.О., Педченко М.М. Організація безперервного циклу виробництва газових гідратів. *Сбірник наукових праць SWorld*. 2012. Том 8. С. 98-106.

можливість експортного потенціалу газу власного видобутку, можливо реалізувати безтрубну газифікацію України.

Згідно тверджень американського професора Слоана біля 70 % природних родовищ газу є невеликих розмірів і до них збитково прокласти труби. Японською корпорацією Mitsui Engineering and Shipbuilding створено дослідний проект морського судна, який виробляє «сухий метан», перевозить його, і одночасно споживає частину для своїх потреб. Інший підхід практичного використання – це сухе паливо для автомобілів.

Трубопровідний транспорт вважають найдешевшим видом транспортування природного газу, але при збільшенні відстані його ефективність буде зменшуватися. Технологія зрідження природного газу звісно зменшує його початковий об'єм у 600 разів, що доцільно для транспортування газу на відстань, не менше 1800 км при річному об'ємі, не нижче 4 млрд м³. При цьому вартість одного танкера-газовоза, наприклад об'ємом 125 тис. м³, становить до 150 млн. \$. З рис. 1 видно, що газогідрати доцільно транспортувати все таки на середні відстані.



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

Варто порівнювати технологію транспортування газу у газогідратній формі з технологією транспортування зрідженого газу. Порівняння ефективності цих технологій показало, що загальні витрати транспортування природного газу у твердому стані виявилися на 12 – 24 % нижчими. Перевагами газогідратних технологій також є простіші умови транспортування та зберігання. В той час, як зріджений природний газ необхідно транспортувати при температурі -162 °С та високому тиску, що є значною небезпекою для навколишнього середовища, природний газ

у газогідратній формі може перебувати під час зберігання чи переміщення при температурі $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В Україні більшість газових та газоконденсатних родовищ знаходяться на завершальній стадії розробки, багато родовищ мають невеликі запаси газу і знаходяться на чималій відстані від наявних комунікацій, причому споживачі газу часто бувають обмежені наявністю газопроводів та витратами на їх прокладання. Беручи до уваги вищенаведене, доцільно розглянути, як перспективний, адаптований до економічних умов України технологічний цикл, який включає видобування, транспортування, зберігання та споживання природного газу за газогідратною технологією спільно з іншими інноваційними рішеннями.

В Україні основним транспортним засобом для перевезення гідратів газу є морські судна. Транспортування гідратів газу до місця зберігання відбувається в замороженому вигляді морським транспортом (з теплоізованими бункерами для гранульованого гідрату газу і тентовані та теплоізовані для льодогазогідратних блоків). До того ж слід обов'язково передбачити можливість утилізації газу при частковій дисоціації застосовуючи його в якості компонента пального. Зберігання газогідрату відбувається на незначній відстані від споживача, що дозволяє проводити дисоціацію гідрату при мінімальному тиску (наприклад, $0,3\text{ МПа}$).

Одним із найважливіших процесів газогідратних технологій, які розробляються в світі, це утворення газогідратних капсул, гранул або блоків, придатних до транспортування і довгострокового зберігання. Щоб запобігти втратам під час транспортування і зберігання утворених газогідратних структур на їх поверхні варто утворювати льодяну кірку з метою їх примусової консервації. Для ефективного заповнення об'єму гідратосховищ запропоновано виготовляти блоки у формі кубів. Вдалим вибором вважається монолітний блок великих розмірів, проте, прийнятна технологія для промислового виробництва таких газогідратних блоків дотепер ще не розроблена.

Нині актуальними стають технології транспортування та зберігання природного газу в гідратному стані, та розробки низькорентабельних родовищ і також дорозробки вже виснажених родовищ за допомогою конверсії газу, який видобувається з гідратів. Це означає, що стають важливими питання створення установок з виробництва газогідратів та транспортування їх у вигляді гранульованого газогідрату, на що вказують останні досягнення японських фахівців.

Важливо провести порівняльний аналіз технологій морського транспортування природного газу з обґрунтуванням перспективних технологій його транспортування в газогідратному стані.

2. Технологічний цикл та технологічна схема використання газогідратної технології для видобутку і підготовки до транспортування природного газу

Газогідрати – (тобто гідрати природних газів, клатрати) кристалічні сполуки, вони утворюються при певних термодинамічних умовах з води і газів. Процес утворення гідратів газу відбувається при високих тисках і низьких температурах, в подальшому це зберігання та плавлення дозволяє їх ефективно застосовувати в різних технологічних процесах, зокрема це стосується виробництва і акумулювання холоду, стискування різних газів, розділення також газових сумішей, ще опріснення солоних вод при транспортуванні природного газу у газогідратному стані (рис. 2)^{13, 14, 15}.

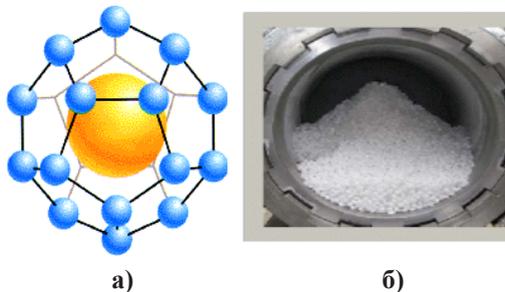


Рис. 2. Видгляд газогідратів: а) структура газогідрату метану; б) сферична форма гідрату метану

Газогідрати існують в природних умовах, за оцінками більшість покладів вуглеводневих газів відповідно знаходяться саме в газогідратному стані.

Газогідратна технологія по переведенню газу в гідратний стан розроблена та успішно здійснена при промисловому випробуванні отримання гідратних капсул тобто (пелет), які складаються відповідно з гідратів метану і води, та організовано виробництво даних гідратних капсул. Згідно з розробленою технологією, природний газ повинен очищатися від CO_2 та H_2S і у взаємодії з H_2O одержують газогідрати у вигляді гранул. Гранули повинні зберігатися у бункері, їх можна транспортувати морем в контейнерах при температурі -20°C . Потім

¹³ Sloan E.D., Koh C.A. Clathrate hydrates of natural gases. CRC Press. 2008. 752 p.

¹⁴ Sloan E. D., Jr., Koh C., Sum A. K. Natural Gas Hydrates in Flow Assurance. Colorado School of Mines, Summer workshop. June 10-12. 2009. Colorado. 75 p.

¹⁵ Босий М.В. Дослідження процесу утворення газових гідратів на поверхні розділу фаз «газ-рідина». *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2025. Том. 85. №4. С. 93-103.

газогідрати треба поступово перевантажувати у цистерни з високим тиском, які перевозять та подаються до газової магістралі. Щоб закачати газ до магістралі необхідно здійснити регазифікацію газогідратів шляхом їх дисоціації, тобто розкладання на воду і газ під впливом зовнішніх чинників нагрівання.

Для вивчення процесів утворення та дисоціації газогідратів вуглеводнів, які входять до складу природного газу, в Інституті газу НАН України було створено гідратний стенд СГ-16:100. На базі гігрометра ТОРОЗ-3-2ВИЗ (власна розробка Інституту газу НАН України) створено також експрес-метод визначення термодинамічних та звісно кінетичних параметрів газогідратів. Наприклад, для прискорення процесів утворення гідратів робочу камеру гігрометра обладнали барботером. При усередненні даних температури води і газів за відповідного тиску в камері барботера фіксували термодинамічні умови утворення газогідратів відповідно для даної технологічної схеми барботування.

Пропонується технологічний спосіб гідратоутворення при видобутку вуглеводневих газів з малодобітних родовищ при транспортуванні та регазифікації (рис. 3).

Умовно цей технологічний цикл розділяється на три складові:

– *утворення газогідратів і гідратних пелет* при стискуванні газу, який відбирається із свердловин, гідратоутворення, потім їх сепарація і далі пресування та гранулювання газогідратів (тобто утворення гідратних пелет), потім вони завантажуються в контейнери, де зберігаються, можна транспортувати і проводити регазифікацію; – *транспортування* гідратних пелет безпосередньо до споживача; – *регазифікація* гідратних пелет, при цьому відбувається виділення газу, який направляється до споживача¹⁶.

За схемним рішенням, наведеним на рис. 4, видобування і підготовка до транспортування вуглеводневих газів з малодобітних родовищ виконується за газогідратною технологією таким чином¹⁷.

Природний газ – суміш природного газу з іншими вуглеводнями з свердловини 1 при тиску $P = 0,1$ МПа та температурі $T = 293$ К надходить в сепаратор 2, тут він відокремлюється від крапель нафти, конденсату і води 3. Очищений газ буде стискатися в компресорі 4 та охолоджуватися в теплообміннику 5. Охолоджений та стиснутий газ далі через ежектор 6 та звісно барботаажний пристрій 11 поступає в кристалізатор 7, в нього також подається і вода. В кристалізаторі при $P = 2$ МПа і $T = 293$ К

¹⁶ Клименко В.В., Педченко М.М., Педченко Л.О. Моделювання адиабатного способу утворення льодогазогідратних капсул. *Холодильна техніка і технологія*. 2010. № 6 (128). С. 41-45.

¹⁷ Босій М.В., Клименко В.В. Транспортування природного газу в газогідратному стані. *Розвиток транспорту*. 2022. Вип. 1(12). С. 129-142.

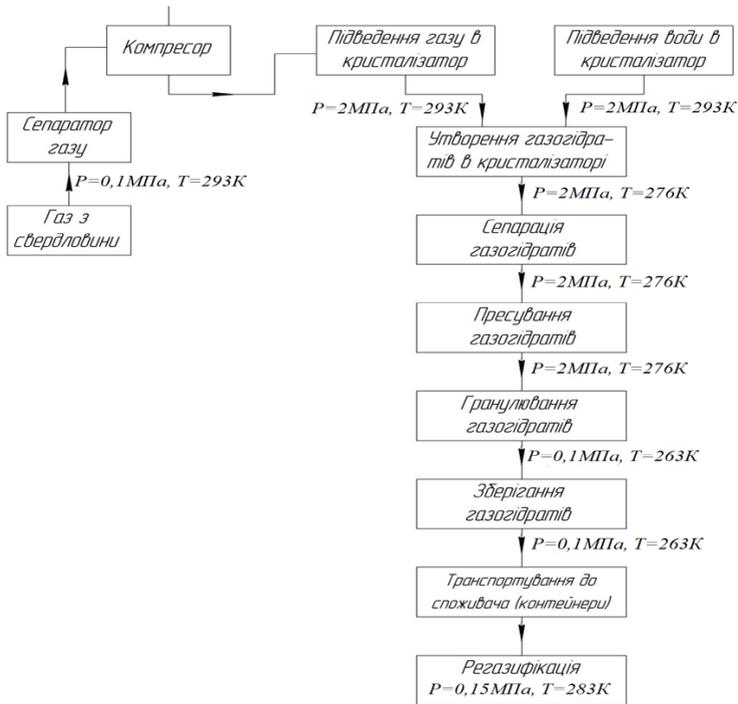


Рис. 3. Технологічний цикл гідратування при видобутку вуглеводневих газів з малодебітних родовищ, зберігання, транспортування і регазифікації

будуть утворюватися газогідрати, а теплота гідратування звідси відводиться агентом (пропаном), який кипить у випарнику 8. Тиск води не буде критичною величиною для процесу гідратування та встановлюється на відповідному рівні, звідси більш високому, ніж тиск в самому кристалізаторі 7. Але все ж таки тиск води треба відрегулювати так, щоб забезпечувалося, достатнє за обсягом, введення води в кристалізатор 7. Швидкість гідратування можна збільшувати за допомогою рециркулюючого непрореагованого газу, його можна подавати в кристалізатор також до основного потоку свіжого газу через ежектор 6, при цьому досягається ще краще перемішування води та газу (суспензії).

Водогазгидратна суспензія буде подаватися насосом 12 в сепаратор газогідратів 13, де гідрат відокремлюється від води, яку далі змішують з потоком свіжої води та направляють знову в кристалізатор 7. Далі після

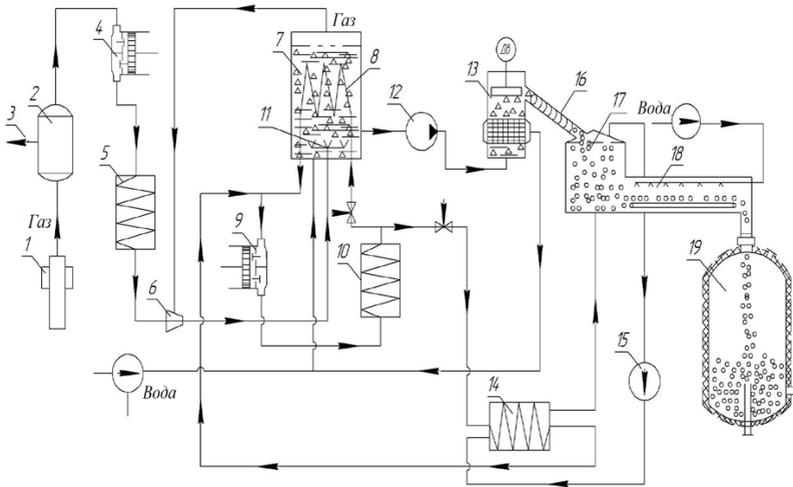


Рис. 4. Схемно-технологічне рішення використання гідратуотворення для видобутку і підготовки до транспортування вуглеводневих газів з малодебітних родовищ

сепарації водогідратної суспензії гідрати необхідно подавати в пристрій для гранулювання часток гідрату 16 (екструдер). Воду, яка виділилася в процесі екструдерування, направляють знову в кристалізатор (на рис. 4 не показано), а з газогідратів звісно будуть формувати газогідратні пелети, наприклад, можна у формі кульок діаметром 20 мм. Пелети в грануляторі 17 будуть охолоджуватися до температури $\approx -20\text{ }^{\circ}\text{C}$ та частково підморожуються газом, який подається з випарника 14, при цьому утворюються гранули. Гранули будуть надходити по транспортеру в пристрій для консервації гідратів 18, потім зверху на них буде розпилюватися охолоджена вода і гідрати покриються тонким шаром льоду, зберігаючи при цьому вміст газу всередині частинок. Діаметр стиснутих частинок гідрату буде залежати від способу їх гранулювання і ще від необхідного ступеня стиснення, діаметр гранульованих частинок гідрату природного газу повинен знаходитись в межах 10...20 мм. Щільність звісно гранульованих частинок гідрату газу повинна становити 850-950 кг/м³. Товщина крижаної оболонки може змінюватися за необхідності, крижана оболонка повинна мати товщину 0,5 – 1,5 мм. Крижана оболонка льоду буде мати вплив на стабільність самих частинок гідрату.

Насамперед, запобігається дифузія газу з середини в зовнішнє середовище, оскільки дифузія газу крізь лід мізерна і нею можна знехтувати, далі, крижана оболонка – це захисне покриття, яке втримує підвищений внутрішній тиск у частинці гідрату, який достатній для запобігання дисоціації типового гідрату природного газу за температури на декілька градусів нижче $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ і атмосферному тиску.

Одержані в такий спосіб гранульовані, охолоджені та покриті крижаною оболонкою (тобто тонким шаром льоду) частинки гідрату у вигляді пелет сферичної форми поступають в резервуар контейнер 19 для їх зберігання. Цей контейнер зручний для транспортування і надалі для проведення процесу регазифікації.

Для прикладу, згідно технічного завдання витрати вуглеводневих газів складають 1250 м^3 за добу і їх слід транспортувати на відстань в межах 100 км. Необхідно розробити схемні рішення для транспортування і регазифікації газогідратів вуглеводневих газів також малодобітних родовищ.

Як зазначалося раніше, утворені відповідним чином газогідратні пелети, які покриті крижаною плівкою невеликої товщини, можна тривалий час зберігати, а також транспортувати при атмосферному тиску та температурах $-10\dots-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, навіть при температурі $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ упродовж певного часу вони зберігають свою стійкість.

Елементарні обчислення показують, що наприклад, при витратах природного газу біля $\sim 52\text{ м}^3$ за годину (1250 м^3 за добу), для утворення 1 м^3 газогідратів необхідно ~ 3 год.

Газогідратні пелети, які підготовлені до транспортування, їх можна наповнювати в пластмасові термоізовані ємності-контейнери, наприклад, розміром $d \times h = 0,7 \times 1,2$ м. В одну ємність вміститься $\sim 0,4\dots 0,5$ т газогідратів, а таких ємностей, враховуючи час на регазифікацію, достатньо буде 12 шт.

В разі необхідності накопичення звісно резервної маси газогідратів, наприклад, в результаті нерівномірного споживання природного газу, варто на місці споживання розміщувати ще додаткову стаціонарну ємність (або навіть кілька ємностей) для зберігання газогідратних пелет при атмосферному тиску та невеликих від'ємних температурах, в яку було б доцільно розвантажувати газогідрати з транспортних ємностей.

Регазифікація газогідратів здійснюється прямо в транспортних контейнерах, шляхом подачі в них теплої води температурою $30\dots 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, для її нагрівання можна використовувати тепловий насос (рис. 5).

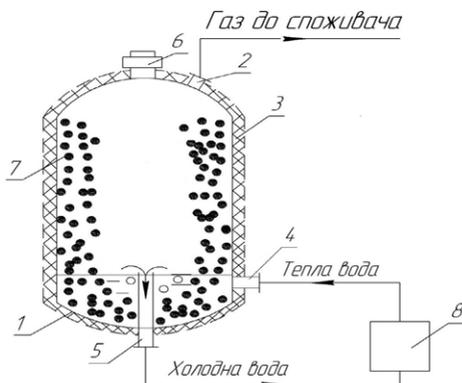


Рис. 5. Схемне рішення регазифікації гідратних пелет для їх транспортування в контейнері: 1 – корпус транспортної ємності; 2 – патрубок подачі газу споживачу; 3 – термоізоляція; 4, 5 – патрубок для підведення теплої води і відведення холодної; 6 – люк для наповнення газогідратними пелетами; 7 – газогідратні пелети; 8 – тепловий насос

Процес регазифікації в транспортній ємності наступний. В патрубок 4 буде подаватися тепла вода з теплового насосу 8. Контактуючи з теплою водою, пелети спочатку підігріваються до температури плавлення, а потім плавляться при тиску $P = 0,15$ МПа. Газ, що виділяється через патрубок 2, направляється до споживача, а холодна вода звисно через патрубок 5 повертається для підігріву до теплового насосу 8. Тиск газу після регазифікації повинен становити 0,15 МПа. Тож швидкість плавлення газогідратів і, звисно кількість виділеного газу, слід регулювати, погоджуючи їх з графіком споживання. В теплий період року регазифікатор доречно використовувати як охолоджувач для системи кондиціонування повітря.

Однією з актуальних задач не тільки газової і нафтогазової галузі, але й енергетичного комплексу в цілому, є розробка способів ефективного транспортування газу. Останнім часом з'являються технології, які дозволяють забезпечити можливість розробки, як віддалених газових родовищ та утилізації попутного газу окремих родовищ газу і нафти, також і на шельфі, для них прокладка газопроводу буде нерентабельно. Основою цих технологій є новий спосіб створення замороженого гідрату газу, змішаного з льодом. Разом з тим, отримана «газо-буферна» суміш

буде охолоджуватися до температури, близької до 0°C і зберігає сталість при нормальному атмосферному тиску. Безперечно дана технологія дозволить, насамперед, вирішити задачі транспортування газу звісно без використання трубопроводу та безпечного зберігання газогідратної суміші при нормальному тиску і температурі.

Отже велике зацікавлення представляє переведення газу в газогідратну форму і транспортування його в такому вигляді. Водночас розширюється також можливість експортного потенціалу вуглеводневих газів, тобто можливо реалізувати безтрубну газифікацію України.

До пріоритету газогідратних технологій можна віднести простіші умови транспортування та відповідно зберігання. Природний газ в газогідратній формі може знаходитися під час зберігання або переміщення за температури -15 °С. Варто зазначити, що для транспортування газу у вигляді газогідратів необхідні спеціальні герметичні ємності. Транспортуючи гідрати, слід контролювати тиск і температуру всередині ємності, щоб не розтавала крижана кірка на поверхні гідратів. Як згадувалося вище, процес транспортування гідратів можна реалізувати навіть при атмосферному тиску і температурі нижче 0°C. Відтак необхідно використовувати активне охолодження простору, в якому будуть знаходитися газогідрати, для підтримки необхідної їх температури при перевезенні.

ВИСНОВКИ

1. Виконано аналіз стану наукових та практичних досліджень газогідратних технологій. Розглянуто питання використання газогідратної технології для транспортування вуглеводневих газів у газогідратній формі.

2. Запропоновано і описано схемне рішення технологічного циклу утворення газогідратів при видобутку природного газу з малодобітних родовищ, його транспортування та використання.

3. На основі літературних даних виконані порівняння основних техніко-економічних показників транспортування газу від малодобітних родовищ, використовуючи різні технології, та показано переваги перспективної газогідратної технології транспортування вуглеводневих газів на відстані ~ 100 км.

4. З'ясовано, що технологія транспортування природного газу в газогідратній формі морськими судами має ряд переваг над технологіями LNG і CNG. LNG-технологія відпрацьована на світовому ринку. Звісно NGH-технологія перспективно підходить для вирішення проблеми диверсифікації поставок природного газу в Україну, а також вуглеводнів при розробці морських родовищ газу і нафти.

5. Показано, що транспортування як природного, так і попутного газу у газогідратному стані є перспективним при розробці невеликих та відповідно віддалених від інфраструктури родовищ, тому що недоцільно будувати трубопроводи або інфраструктуру технології LNG.

6. При порівнянні вартості традиційних і газогідратних технологій транспортування та зберігання вуглеводневих газів маємо наступне, вони наразі знаходяться на одному рівні. При використанні переваг технології на основі газових гідратів, вони стають серйозною альтернативою всім традиційним технологіям.

АНОТАЦІЯ

Споживання природного газу в Україні та світі наразі постійно зростає. Традиційні технології транспортування вуглеводневих газів є менш ефективними, ніж газогідратні технології. Існуючі технології не сприяють розробці невеликих родовищ. На сьогодні природний газ транспортується у зрідженому вигляді за LNG технологією морськими судами. Також існують альтернативні технології, до них відносяться CNG-технології – стиснений газ та перспективна технологія NGH – газ у газогідратній формі. Проведено порівняльний аналіз CNG -, LNG – і NGH-технологій транспортування природного газу морськими судами. Обґрунтовано перспективи та наукові основи впровадження NGH- технології транспортування газу в газогідратному стані. Наведені переваги NGH-технології. Згідно з відомою наразі NGH- технологією передбачено гідратоутворення та формування гідратних гранул. Запропоновано проводити формування газогідратів у вигляді гідратних пелет, які покриваються тонким шаром льоду. Вибір форми та послідовність виготовлення пелетів спрямовані на оптимізацію процесів технології NGH. Технологія NGH дозволяє з мінімальними енерговитратами одержувати пелети відповідних розмірів. Транспортування природного газу у вигляді газогідратів у формі пелетів дозволяє значно знизити вартість спеціалізованих морських танкерів.

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. Seungyong Chang // *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition: Indonesia, Jakarta*. 2001. 17-19 April. P. 24-32.

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. 11p.
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. Вип. 2 (43). С. 49 – 55.
6. Жук Г.В., П'ятничко О.І., Крушневич В.Т., Федоренко Д.С, Клименко В.В. Метаногідратні технології в Україні: дослідження і перспективи. *Геологія. Гірництво. Нафтогазова справа. Енергетика*. 2014. № 1(3). С. 3-10.
7. Педченко Л.О., Педченко М.М. Транспортування природного газу у газогідратній формі. *Геологія. Гірництво. Нафтогазова справа. Енергетика*. 2014. №1(3). С.100-113.
8. 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.
9. Nakai S. Development of natural gas hydrate (NGH) supply chain. Proceedings of the 25 th world gas conferences. Kuala Lumpur, Malaysia, June 4-8. 2012. P. 367-375.
10. Gudmundsson J.S., US Patent No.5,536,893. Method for production of gas hydrates for transportation and storage / J.S. Gudmundsson; inventor J.S. Gudmundsson. №195748; 07.01.1994; pub. 16.07. 1996. 7p.
11. Павленко А.М., Педченко Л.О., Педченко М.М. Організація безперервного циклу виробництва газових гідратів. *Сбірник наукових праць SWorld*. 2012. Том 8. С. 98-106.
12. Sloan E.D., Koh C.A. Clathrate hydrates of natural gases. CRC Press. 2008. 752 p.
13. Sloan E. D., Jr, Koh C., Sum A. K. Natural Gas Hydrates in Flow Assurance. Colorado School of Mines, Summer workshop. June 10-12. 2009. Colorado. 75 p.
14. Босий М.В. Дослідження процесу утворення газових гідратів на поверхні розділу фаз «газ-рідина». *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2025. Том 85. №4. С. 93-103.
15. Клименко В.В., Педченко М.М., Педченко Л.О. Моделирование адиабатного способа утворення льодогазогідратних капсул. *Холодильна техніка і технологія*. 2010. № 6 (128). С. 41-45.

16. Босий М.В., Клименко В.В. Транспортування природного газу в газогідратному стані. Одеський національний морський університет. *Розвиток транспорту*. 2022. Вип. 1(12). С. 129-142.

Information about the author:

Bosyi Mykola Viktorovich,

Senior Lecturer at the Department of Materials and foundry engineering,
Central Ukrainian National Technical University,
8, Universytetskyi ave., Kropyvnytskyi, 25006, Ukraine