

© Т.М. Подоляк¹, В.І. Дмитренко¹

¹Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна

ТЕХНОЛОГІЯ ПОПЕРЕДЖЕННЯ ГІДРАТОУТВОРЕННЯ В ПРОЦЕСАХ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ПІДГОТОВКИ ГАЗУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЕНЕРГІЇ НАДВИСОКОЧАСТОТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

T. Podoliak¹, <https://orcid.org/0009-0008-5287-0880>

V. Dmytrenko¹ <https://orcid.org/0000-0002-1678-2575>

¹ National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine

GAS HYDRATE PREVENTION TECHNOLOGY IN LOW-TEMPERATURE CONDITIONING USING ULTRA-HIGH FREQUENCY RADIATION ENERGY

Мета. Підвищення ефективності використання метанолу в процесах низькотемпературної підготовки газу в умовах гідратуутворення шляхом використання енергії надвисокочастотного випромінювання.

Методика. Аналіз вуглеводневої сировини здійснено фізичними, хімічними та фізико-хімічними методами дослідження. Дослідження вмісту метанолу у технологічних лініях установок низькотемпературної сепарації газу проведено за допомогою симулятора Aspen HYSYS. Потужність електромагнітного випромінювання визначено за допомогою розробленої автором комп'ютерної програми Pipe3. Результати промислового впровадження та економічну ефективність розробленої технології проаналізовано методами обробки та аналізу промислових даних.

Результати. Розроблено технологію використання метанолу в процесах низькотемпературної підготовки газу з використанням енергії надвисокочастотного випромінювання. Обґрунтовано вибір ділянки для облаштування магнетрону між дросельним пристроєм та сепаратором другої ступені. Запропоновано нову конструкцію знімної вставки з магнетроном. Відмінною рисою розробки є створення резонансної зони між дроселем та діафрагмою. Запропоновано облаштування мікрохвильового випромінювача в технологічній схемі установки низькотемпературної сепарації. Визначено методику вибору потужності магнетрона залежно від концентрації гідратів у потоці. Встановлено технічні обмеження використання технології за тиском, діаметром трубопроводів і режимом руху фаз. Наведено результати випробування нової технології використання метанолу в умовах УППГ «Західні Радченки».

Наукова новизна. Встановлені нові апроксимаційні залежності питомих витрат метанолу та електроенергії від добових витрат газу для використання технології НВЧ випромінювання в процесах низькотемпературної підготовки газу у визначеному діапазоні витрат газу.

Практична значимість. Запропонована технологія використання метанолу в процесах низькотемпературної підготовки газу з використанням енергії надвисокочастотного випромінювання дозволяє забезпечити безгідратний режим роботи установок комплексної підготовки газу, знизити витрати вартісного та токсичного метанолу та екологічне навантаження на довкілля.

Ключові слова: гідратуутворення, метанол, надвисокочастотне електромагнітного випромінювання, енергоефективність, підготовка газу, низькотемпературна сепарація, природний газ, математичне моделювання.

Вступ. Підготовка вуглеводневої сировини до транспортування, як правило, супроводжується процесом гідратуутворення. Відкладаючись на внутрішніх стінках труб, гідрати різко зменшують їх пропускну здатність і можуть привести до аварійної зупинки експлуатації газопроводу [1]. Це призводить до зниження пропускну спроможності трубопроводів, а в ряді випадків і до їх зупинки [2]. Тому усунення гідратуутворення під час видобутку і транспортування вуглеводневої сировини є однією з важливих і актуальних проблем.

У вітчизняній і зарубіжній практиці до теперішнього часу не знайдено універсального способу боротьби з газогідратами в свердловинах і трубопроводах. Це пов'язано, перш за все, з різними умовами утворення газогідратів в процесі підготовки вуглеводнів, а також з різноманітністю конструкцій трубопроводів [1].

В останні десятиліття зростає інтерес до використання надвисокочастотного (НВЧ) електромагнітного випромінювання як нетрадиційного способу руйнування гідратів [3–4]. Мікрохвильове та високочастотне випромінювання розглядаються як перспективні методи локального нагріву і розпаду газових гідратів в трубопроводах; експериментальні та чисельні дослідження показують, що при коректному підборі частоти та потужності, конструкції випромінювача можна забезпечити швидшу дисоціацію газових гідратів [5].

Оскільки на родовищах Східного нафтопромислового регіону України основний обсяг видобутку забезпечується процесами низькотемпературної сепарації, то дослідження можливості впровадження енергії надвисокочастотного випромінювання в межах цих технологічних схем є актуальним завданням. Реалізація такого підходу дозволить здійснити антигідратний захист газопромислового обладнання, а також розробити нові технологічні прийоми, які дозволять скоротити витрати інгібітору і одночасно знизити собівартість продукції та екологічне навантаження на довкілля.

Аналіз попередніх досліджень. Східний нафтопромисловий регіон України залишається ключовим центром вітчизняного газовидобутку, сучасний стан розробки його родовищ характеризується значною часткою покладів із високим вмістом рідких вуглеводнів. Ефективність функціонування систем збору та підготовки природного газу на родовищах даного регіону значною мірою залежить від глибини вилучення цільових компонентів, що досягається шляхом інтенсивного охолодження газового потоку. Тому у зв'язку зі специфікою сировинної бази Східного нафтопромислового регіону України найбільш поширеними на місцевих родовищах є низькотемпературні процеси підготовки газу.

Однією з поширених технологій у вказаному регіоні є низькотемпературна абсорбція (НТА) газу [6]. Висока металомісткість обладнання, технологічна складність процесу, втрати абсорбенту та залежність системи від компонентного складу вхідного потоку обмежують впровадження методів НТА виключно окремими родовищами, такими як Тимофіївське газоконденсатне родовище (ГКР), Ігнатівське нафтогазоконденсатне родовище (НГКР), Солохівське ГКР, Глинсько-Розбишівське НГКР, Качанівське НГКР.

Глибоке вилучення цільових компонентів з природного газу дозволяє забезпечити процес низькотемпературної ректифікації. Однак дана технологія підготовка газу має рентабельність лише при високих та стабільних обсягах вхідної сировини, тому серед родовищ Східного нафтопромислового регіону України реалізована лише на Яблунівському НГКР.

Основним способом підготовки газу на родовищах Східного нафтопромислового регіону України є низькотемпературна сепарація (НТС). Незважаючи на високу технологічну ефективність низькотемпературної сепарації як базового методу вилучення вологи та рідких вуглеводнів, її практична реалізація супроводжується низкою специфічних технічних ускладнень [6]. Ключовим дестабілізуючим фактором у процесах низькотемпературної підготовки газу є ризик утворення газових гідратів [1, 7], що потребує впровадження додаткових заходів для забезпечення безперебійної роботи обладнання.

На вітчизняних підприємствах ключовим реагентом для попередження гідратуутворень залишається метанол. Проте його використання пов'язане з низкою ризиків: високою токсичністю, вибухонебезпечністю та значною вартістю [8, 9]. Важливим аспектом є те, що реальні витрати метанолу часто перевищують розрахункові норми на 15–20% [1]. Це вказує на нераціональне керування процесом, що робить питання оптимізації дозування реагенту надзвичайно актуальним [10].

Критичною проблемою для газодобувної галузі України є повна відсутність внутрішнього виробництва метанолу. Історично основні потужності з синтезу метилового спирту зосереджені на підприємствах хімічної промисловості (зокрема ПрАТ «Севєродонецьке об'єднання Азот»). Проте через бойові дії та руйнування інфраструктури вітчизняний ринок став стовідсотково залежним від зовнішніх поставок. Це створює пряму загрозу енергетичній безпеці, оскільки безперебійність видобутку природного газу корелює з наявністю необхідного обсягу інгібіторів на складах промислових об'єктів.

Транспортування метанолу з європейських терміналів значно здорожує реагент, що у поєднанні з акцизною політикою та складністю ліцензування операцій з отруйними речовинами створює додаткове фінансове навантаження на газодобувні компанії. За таких умов перевитрата інгібітора є не просто технологічним недоліком, а суттєвим економічним збитком, що потребує негайного впровадження нових сучасних рішень, що дозволили б суттєво зменшити споживання інгібітора.

Сукупність наведених факторів, від критичної залежності України від імпорту метанолу до високих ризиків аварійних зупинок через гідратуутворення, визначає необхідність підвищення ефективності підготовки газу та вдосконалення технології використання інгібіторів.

Серед технологій, що використовують для ліквідації гідратуутворення слід відмітити використання енергії надвисокочастотних електромагнітних полів для руйнування газогідратів. Установлено, що надвисокочастотне електромагнітне випромінювання є перспективним інструментом не лише для ліквідації існуючих суцільних пробок, а й для ефективного попередження гідратуутворення у системах збору та транспортування газу. Метод забезпечує ефективне перетворення електромагнітної енергії в тепло без проміжних носіїв, дозволяє прискорити дисоціацію гідратів і знизити витрати метанолу.

Лабораторні спроби застосування мікрохвиль для розкладання гідратів показали прискорення дисоціації в 1,5–3 рази порівняно з традиційним нагрівом гарячою водою [11]. Пряме нагрівання гідратної фази забезпечує зниження енергетичних витрат, при цьому швидкість процесу залежить від потужності випромінювання (300–900 Вт) та часу експозиції. Під час досліджень було зафіксовано формування двох зон: активної (максимальне поглинання) та інертної, що виникає внаслідок зменшення вологості або відбиття хвиль [12].

Подальші роботи [11] доповнили дослідження, використавши RF та плазмові джерела. Результати свідчать, що в діапазоні 0,3–3 ГГц ефективність руйнування гідратів зростає із частотою до певної межі, після чого спостерігається насичення через обмежену проникність хвиль [13].

В роботі [14] наведено сучасні комплексні фізичні моделі, що поєднують ЕМВ-нагрів і інжекцію газів (наприклад, N_2) для підвищення ефективності видобутку. Такі моделі дозволяють виконувати проектні розрахунки і застосовувати розроблену методику у промисловості.

В роботі [15] запропонована математична модель руйнування гідратних пробок в трубопроводі при використанні коаксіального мікрохвильового джерела ЕМВ, наведено конструктивні деталі антени, розподілу температури і ефективності дисоціації газових гідратів. Наведена теоретична оцінка ефективності використання такого впливу для розблокування газопроводів від газогідратних пробок.

Практичне застосування електромагнітних методів у газовій промисловості базується на розробці спеціалізованих систем генерації та спрямування енергії безпосередньо у зону гідратоутворення [16–21].

Таким чином, перехід від загального інгібування до локалізованого НВЧ-впливу в критичних зонах гідратоутворення є стратегічно важливим напрямком для підвищення надійності та екологічності систем підготовки вуглеводневої сировини в Україні.

Мета роботи: Підвищення ефективності використання метанолу в процесах низькотемпературної підготовки газу в умовах гідратоутворення шляхом використання енергії надвисокочастотного випромінювання.

Методи дослідження. Аналіз вуглеводневої сировини здійснено фізичними, хімічними та фізико-хімічними методами дослідження. Дослідження вмісту метанолу у технологічних лініях установок низькотемпературної сепарації газу проведено методами статичного моделювання за допомогою симулятора Aspen HYSYS компанії Aspen Technology, Inc. Моделювання виконано у режимі статичного моделювання. Aspen HYSYS має вбудовані термодинамічні моделі, які за допомогою утиліти Hydrate Formation дозволяють точно передбачати термобаричні умови утворення гідратів в трубопроводах об'єктів видобутку, переробки та транспортування газу. Вказана утиліта розраховує точку початку утворення твердих гідратів (структури I, II, H) з використанням термодинамічних моделей. Прогнозування точки початку утворення гідратів базуються на оригінальній моделі рівноваги гідратів, запропонованій Ван дер Ваальсом (van der Waals) та Платтеу (Platteeuw), у поєднанні з модифікацією, запропонованою Перрішем (Parrish) та Праусніцем (Prausnitz) [1].

Для моделювання процесу підготовки газу з використанням ефекту Джоуля-Томпсона за основу взято параметри та характеристики технологічної лінії низькотемпературної сепарації на Мачухському ГКР.

Кількість газу, газового конденсату, супутньо-пластової води вибрано в кількостях, що відповідають стандартним проектним значенням для аналогічних установок низькотемпературної сепарації газу, що застосовуються на об'єктах видобутку газу в Україні:

- дебіт газу – 1 млн ст. м³/добу;
- дебіт газового конденсату – 100 т/добу;
- дебіт супутньо–пластової води – 10 т/добу.

Склад газу для моделювання процесу відповідає усередненому компонентному складу газу свердловин Мачухського ГКР.

Потужність електромагнітного випромінювача для забезпечення безгідратного режиму роботи трубопроводів визначено за допомогою розробленої автором комп'ютерної програми Pipe3 написаної на мові QBASIC для математичного моделювання синтезу і дисоціації газового гідрату. Для виконання розрахунків уся довжина трубопроводу розбита на 100 ділянок. Розрахунковий часовий крок становить $1/10^4$ від часу перебування газу в газопроводі. Диференційне рівняння швидкості утворення газогідрату вирішується методом Рунге-Кутта 4-го порядку.

Структурно комп'ютерна програма передбачає: 1. Оголошення модулів, процедур, масивів, змінних. 2. Задання вихідних даних, констант і початкового стану. 3. Виконання циклу розрахунку рівнянь математичної моделі по часу з вкладеним циклом по довжині газопроводу. 4. Виведення результатів розрахунку на екран та у файл pipe1.dat. Цей файл зчитується програмою Excel, яка дозволяє їх обробляти та аналізувати.

Результати промислового впровадження та економічну ефективність розробленої технології проаналізовано методами обробки та аналізу промислових даних, статистичними методами обробки та аналізу результатів експериментальних досліджень.

Результати дослідження. Розроблено нову технологію використання метанолу в процесах низькотемпературної підготовки газу з використання енергії надвисокочастотного випромінювання, яка включає облаштування розробленого пристрою для мікрохвильового запобігання гідратуутворенню між дросельним пристроєм та сепаратором другої ступені (рис. 1).

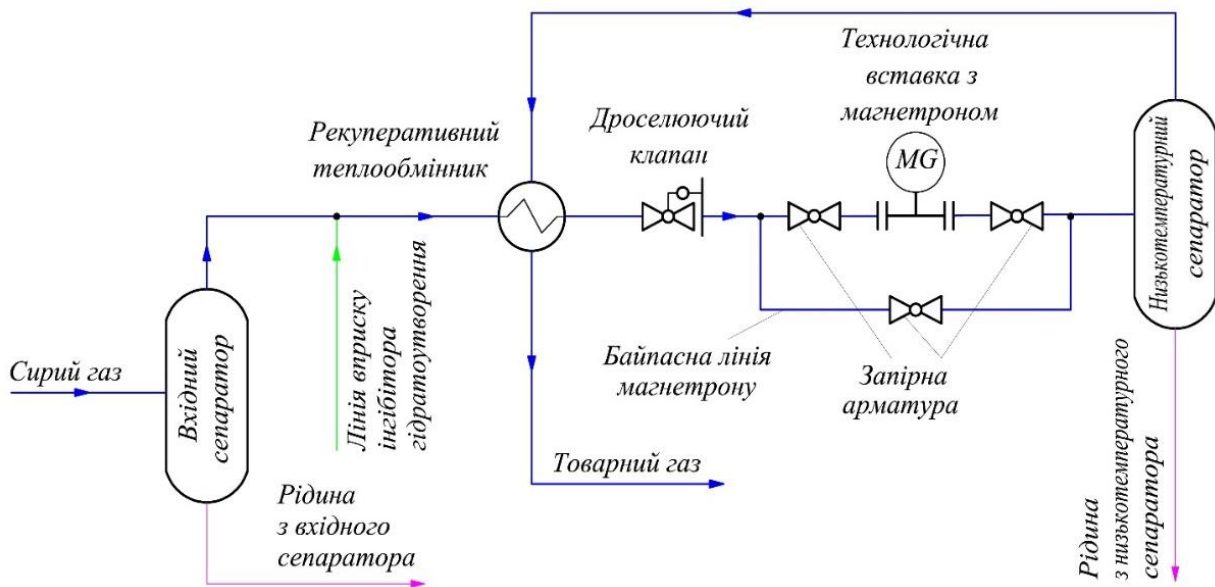


Рис. 1. Схема установки НТС із застосуванням ділянки газопроводу з технологічною вставкою з НВЧ випромінювача

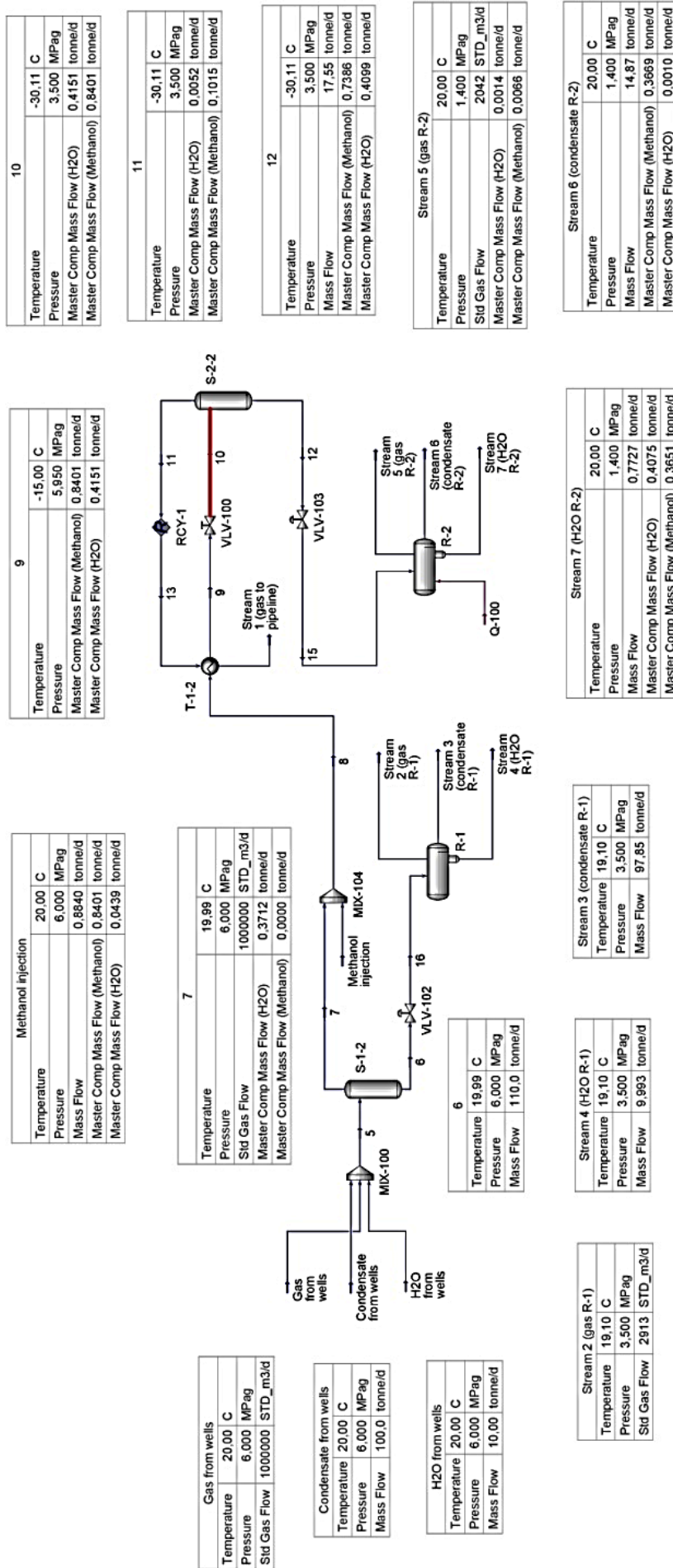


Рис. 2. Технологічна схема лінії НТС з використанням ефекту Джоуля-Томпсона Мачуцького ГКР

Вибір ділянки 10 (між дросельним пристроєм VLV-100 та сепаратором С-2-2) як місця для монтажу магнетрона є найбільш виправданим через критичні показники, виявлені під час моделювання в Aspen HYSYS (див. рис. 2). Встановлено, що падіння температури до $-30,11^{\circ}\text{C}$ при порозі гідратуутворення $-23,40^{\circ}\text{C}$ створює умови, які вимагають перевитрати метанолу на 30% вище номінального значення.

Запропонована автором технологія передбачає використання удосконаленої конструкції пристрою для подачі мікрохвильового електромагнітного випромінювання в середню частину ділянки газопроводу, що сполучає дроселюючий клапан з низькотемпературним сепаратором [21]. Розроблений автором пристрій передбачає розміщення антени мікрохвильового електромагнітного випромінювача усередині газопроводу. Розроблена автором технологічна вставка з встановленим на ній магнетроном виконана знімною з привареними фланцями та складається з послідовно зварених між собою ділянок: дифузора, прямого трубопроводу та конфузора, в просторі яких знаходиться фторопластове кільце з внутрішнім отвором, рівним внутрішньому діаметру газопроводу, та вирізом для антени випромінювача (рис. 3). Таким чином досягається введення мікрохвильового електромагнітного випромінювання усередину газопроводу установки НТС.

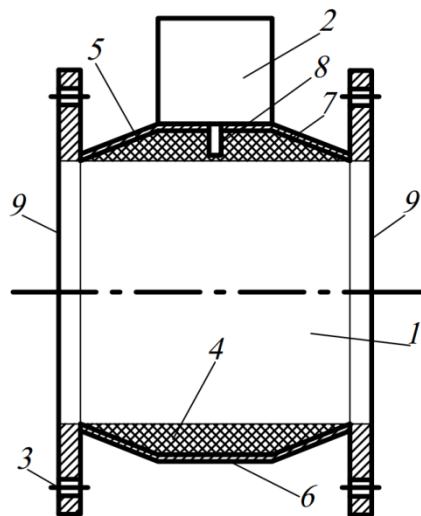


Рис. 3. Конструктивна схема знімної технологічної вставки з вузлом кріплення мікрохвильового випромінювача та захисним елементом: 1 – технологічна вставка; 2 – мікрохвильовий електромагнітний випромінювач; 3 – кріплення; 4 – фторопластове кільце (захисний елемент); 5 – дифузор; 6 – пряма ділянка трубопроводу; 7 – конфузор; 8 – антена випромінювача; 9 – приварені фланці

Підвищення концентрації НВЧ випромінювання на конкретній ділянці газопроводу за потреби досягається монтажем діафрагми. Розроблено конструкцію діафрагми (рис. 4), яка слугує для відбивання радіохвиль згенерованих магнетроном і яку виконано у вигляді семи отворів з заданим внутрішнім діаметром, що дозволяє зменшити її аеродинамічний опір.

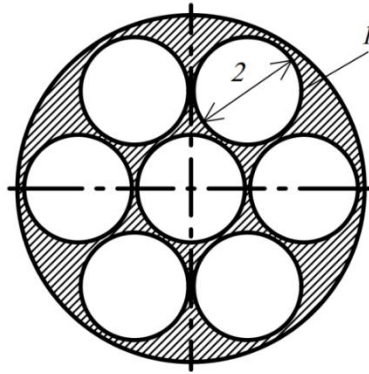
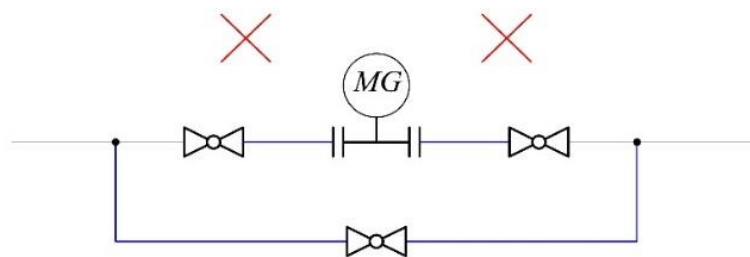


Рис. 4. Фронтальний вигляд діафрагми для відбиття випромінювання: 1 – отвір діафрагми (у кількості 7 шт.); 2 – внутрішній діаметр отвору діафрагми D

Електроживлення генератора НВЧ-випромінювань (магнетрона) планується забезпечити шляхом прокладання кабельної лінії від існуючої електрощитової УКПГ безпосередньо до місця його встановлення на ділянці 10 (рис.2). Параметри роботи пристрою інтегруються в загальну систему автоматизованого управління технологічним процесом через передачу даних по проектній кабельній лінії до логічного контролера установки. Це дозволяє здійснювати безперервний моніторинг режимів випромінювання та оперативно реагувати на зміни термодинамічних параметрів газового потоку.

Процес монтажу проекційної технологічної вставки з НВЧ-випромінювачем передбачає попередній демонтаж ділянки існуючого трубопроводу та подальше приварювання вставки на визначене місце. Паралельно з цим необхідно облаштувати байпасну лінію, що дозволить забезпечити безперебійну роботу системи під час обслуговування обладнання. Послідовність та деталі схеми монтажу наведено на рис. 5.



Умовні позначення:

- - існуючий трубопровід
- - проектний трубопровід
- ✗ - ділянка, що підлягає демонтажу
- ⊗ - проектна запірна арматура
- ⊙ MG - проектна вставка з магнетроном

Рис. 5. Схема монтажу проекційної технологічної вставки з НВЧ-випромінювачем

Обчислення необхідної потужності випромінювання та визначення точних обсягів заміщення метанолу тепловою енергією НВЧ-поля базується на комплексному аналізі потоку за допомогою цифрової математичної моделі. Модель на відміну від існуючих, одночасно враховує динаміку двох протилежних процесів: кінетику синтезу мікрогранул газогідратів у потоці та їх дисоціацію під впливом енергії НВЧ-випромінювання. Виконання розрахунків проведено за допомогою комп'ютерної програми Pipe3. На основі результатів багатомодового моделювання у програмі (моди H_{11} , E_{01} , H_{01}) отримана аналітична залежність $P_W = 124 \cdot C_{gg} / R^{1,7}$, яка дозволяє оперативно визначати необхідну потужність випромінювача залежно від поточної концентрації гідратів та розміру їх гранул.

Застосування запропонованої технології комбінованого використання метанолу та енергії надвисокочастотного випромінювання у процесах низькотемпературної підготовки газу характеризується певними технологічними обмеженнями.

1. Гідродинамічний режим руху фаз у потоці має бути рівномірним, оскільки виникнення нестационарних процесів або залпових «пробок» рідини спричиняє різке зниження глибини проникнення НВЧ-хвиль. Це ускладнює забезпечення стабільного енергетичного впливу на весь об'єм цільової ділянки трубопроводу.

2. Баричні параметри системи обмежені максимальним тиском до 10,0 МПа, що безпосередньо пов'язано з граничною механічною міцністю діелектричних вікон введення енергії. Використання таких матеріалів, як фторопласт або спеціальна кераміка, дозволяє зберігати герметичність системи, проте лімітує її застосування на надвисоких тисках.

3. Геометричні характеристики трубопроводів та вибір обладнання орієнтовані на широко розповсюджені генератори НВЧ, які працюють на частоті 2,45 ГГц. Дана частота є найбільш ефективною для трубопроводів діаметром від 100 мм до 300 мм. Захист трубопроводів інших розмірів потребує впровадження генераторів на специфічних частотах, які не мають масового виробництва, що суттєво підвищує капітальні витрати та загальну вартість пристрою.

Дослідно-промислові випробування запропонованої технології попередження гідратоутворень із застосуванням мікрохвильового електромагнітного випромінювання проведені на установці попередньої підготовки газу (УППГ) «Західні Радченки» ТОВ «Прайм-газ». Підготовка газу на даному об'єкті здійснюється методом НТС із використанням ефекту Джоуля-Томпсона. Як інгібітор гідратоутворення використовується метанол. Вприск інгібітору в систему НТС здійснюється насоса-дозатора моделі НД 40/160. Впровадження НВЧ-випромінювача на даній площадці дозволило перевірити ефективність розробленої технології в експлуатаційних умовах.

Захист від гідратоутворень на ділянці трубопроводу $\varnothing 108 \times 6$ мм забезпечується шляхом монтажу технологічної вставки з мікрохвильовим електромагнітним випромінювачем. Обладнання розміщене після ручного дроселя моделі ШР-12 перед сепаратором другого ступеню С-2 (модель ГС-2-6,3-1200-2). Конструкція вузла передбачає наявність байпасної лінії. Основу випромінювача становить магнетрон моделі Galanz M24FB-610A з вихідною потужністю 900 Вт. Таке компонування дозволяє здійснювати спрямований енергетичний вплив на потік газу в найбільш критичній зоні охолодження.

Таблиця 1

Видобування газу і витрати метанолу до і після впровадження технології НТС з використанням мікрохвильового електромагнітного випромінювання

Дата	Технологія захисту від гідратуутворень традиційним способом			Дата	Технологія захисту від гідратуутворень за способом запропонованим автором		
	$Q_{\text{газу}}$, тис. м ³ /добу	$q_{\text{метанолу}}$, т/добу	$q_{\text{пит. метанолу}}$, кг/тис. м ³ газу		$Q_{\text{газу}}$, тис. м ³ /добу	$q_{\text{метанолу}}$, т/добу	$q_{\text{пит. метанолу}}$, кг/тис. м ³ газу
05.03	195	0,369	1,89	16.03	204	0,310	1,45
06.03	190	0,363	1,91	17.03	207	0,299	1,47
07.03	198	0,382	1,93	18.03	210	0,300	1,47
08.03	196	0,367	1,87	19.03	203	0,296	1,43
09.03	203	0,396	1,95	20.03	205	0,302	1,48
10.03	207	0,391	1,89	21.03	198	0,280	1,43
11.03	210	0,389	1,85	22.03	196	0,280	1,4
12.03	208	0,389	1,87	23.03	202	0,295	1,42
13.03	206	0,394	1,91	24.03	208	0,297	1,45
14.03	207	0,403	1,95	25.03	203	0,293	1,48
Разом	2020	3,843	1,90	Разом	2036	2,952	14,48

Таблиця 2

Видобування газу та споживання електроенергії (e/e) для захисту від гідратуутворень до і після впровадження технології з використанням мікрохвильового електромагнітного випромінювання

Дата	Технологія захисту від гідратуутворень традиційним способом			Дата	Технологія захисту від гідратуутворень за способом запропонованим автором		
	$Q_{\text{газу}}$, тис. м ³ /добу	W , кВт·год/добу	$W_{\text{пит.}}$, Вт·год/тис. м ³ газу		$Q_{\text{газу}}$, тис. м ³ /добу	W , кВт·год/добу	$W_{\text{пит.}}$, Вт·год/тис. м ³ газу
05.03	195	25,0	127,9	16.03	204	40,4	198,0
06.03	190	23,8	124,9	17.03	207	40,1	193,6
07.03	198	24,1	122,3	18.03	210	39,5	188,9
08.03	196	23,6	120,0	19.03	203	37,8	185,6
09.03	203	24,5	120,1	20.03	205	38,2	185,5
10.03	207	23,9	116,3	21.03	198	35,4	179,1
11.03	210	23,6	112,0	22.03	196	34,0	172,5
12.03	208	23,1	110,6	23.03	202	34,7	170,4
13.03	206	22,2	108,2	24.03	208	34,6	166,8
14.03	207	21,9	106,1	25.03	203	33,1	163,8
Разом	2020	235,7	1168,4	Разом	2036	367,8	1804,2

Заміри поточних параметрів роботи УППГ Західні Радченки за діючою технологією захисту від гідратутворень проводились протягом 10 днів (табл. 1, 2). Діапазон витрати газу за вказаний період становила від 190 до 210 тис ст. м³/добу, робочий тиск тримався в межах 3,8–4,0 МПа, робоча температура на ділянці, що досліджувалась змінювалась у межах мінус 25 – мінус 22 °С.

Внаслідок математичної обробки експериментальних досліджень підібрали апроксимаційні залежності коефіцієнту зменшення витрат метанолу (q) від витрат газу (Q). Коефіцієнт детермінації (R^2) – 0,9.

$$q = 0,8873 - 0,0006Q \quad (1)$$

На рис. 6 проаналізовані результати експериментальних вимірювань витрат метанолу до і після застосування НВЧ-випромінювання. Отримана апроксимаційна залежність (1) показує збільшення ефективності використання метанолу при збільшенні витрат газу при впровадженні даної технології (рис. 6).

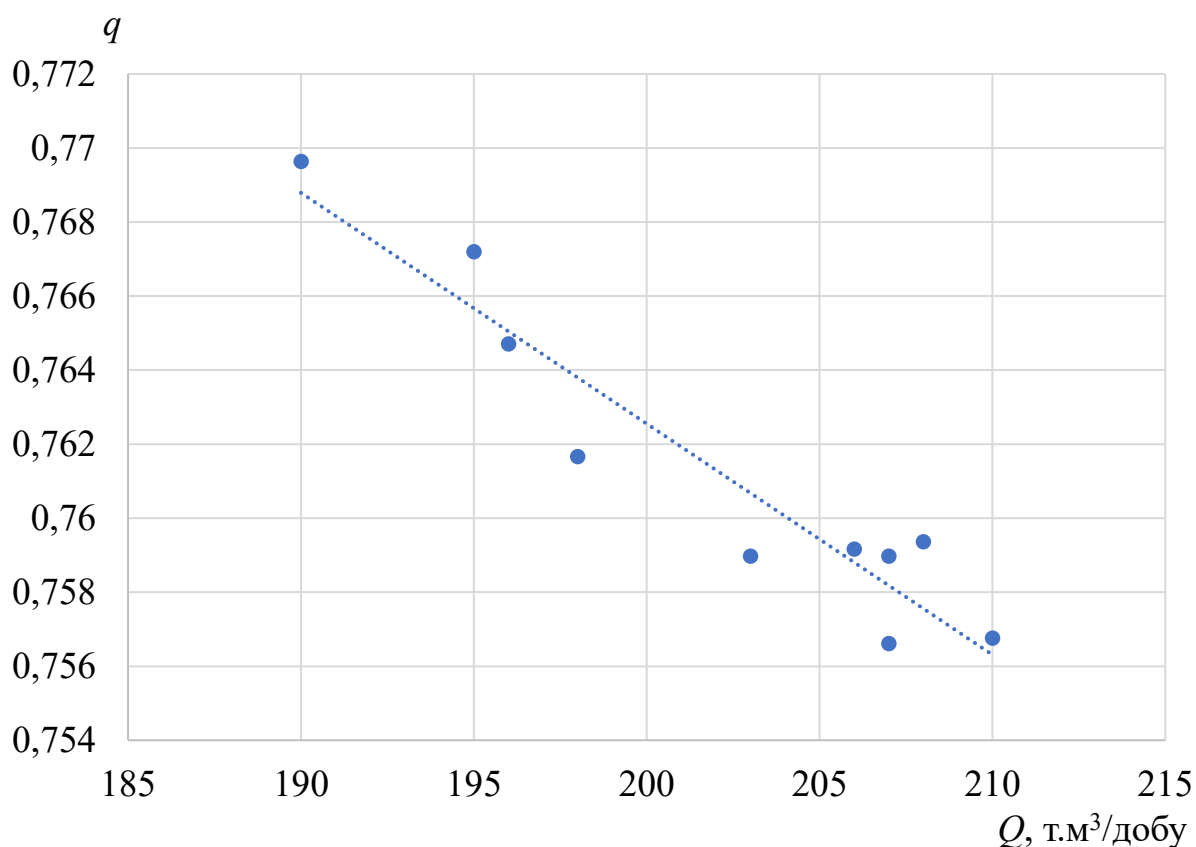


Рис. 6. Скорочення витрат метанолу при використанні ЕМ випромінювання

Внаслідок математичної обробки експериментальних досліджень підібрали апроксимаційні залежності коефіцієнту збільшення енергоспоживання (W) від витрат газу (Q). Коефіцієнт детермінації (R^2) – 0,89.

$$W = 1,642 - 0,0005Q \quad (2)$$

Отримана залежність (2) показує, що при збільшенні витрат газу відбувається зменшення питомих витрат електроенергії (рис. 7).

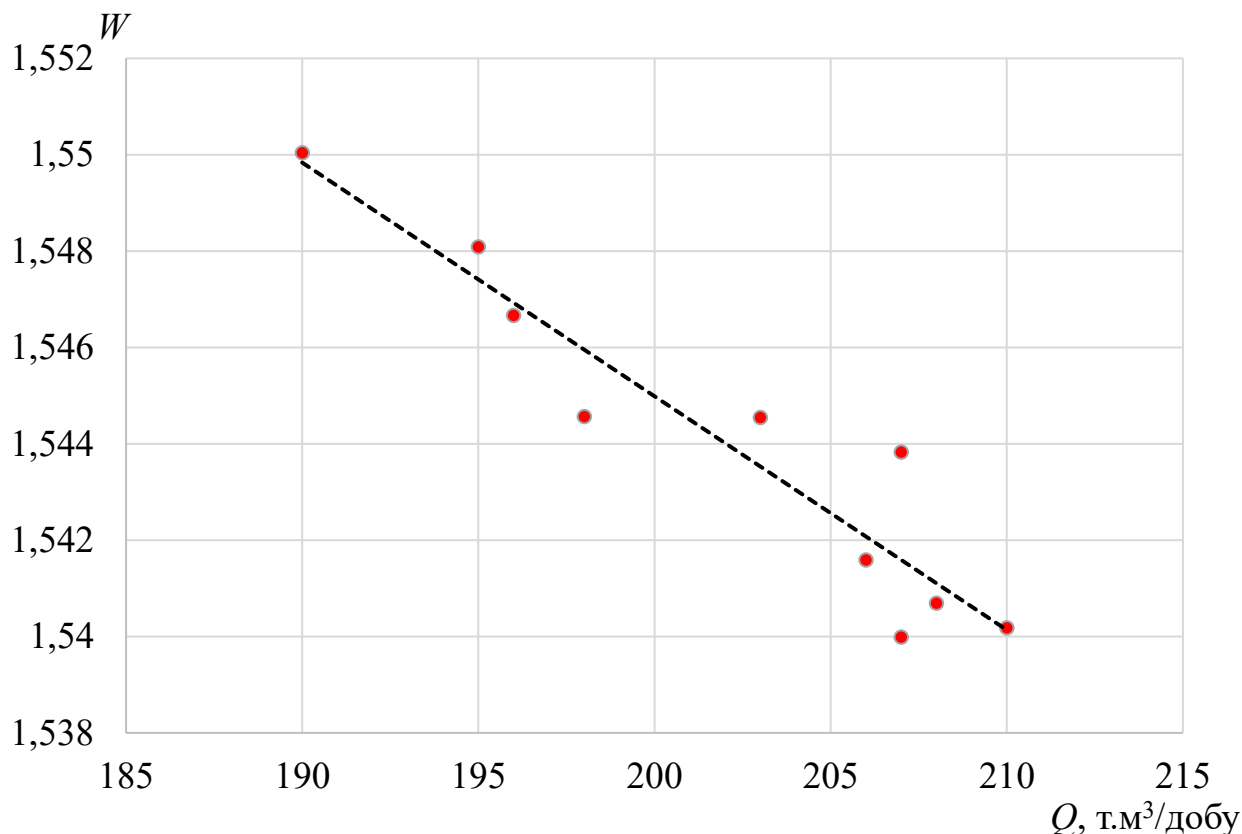


Рис. 7. Відносне споживання електроенергії при застосуванні НВЧ випромінювання

За результатами промислових випробувань встановлено:

1) зниження витрат інгібітору метанолу за період випробувань завдяки впровадженню технології захисту від гідратуутворень з використанням НВЧ-випромінювання становить: $0,45 \cdot 2036 = 916,2$ кг, де 0,45 – зниження питомої витрати інгібітору метанолу кг/тис. м³ газу; 2036 – об'єм обробленого газу, тис. м³. Виходячи з тривалості випробувань (10 діб), зниження витрат метанолу становить 91,6 кг за добу;

2) збільшення споживання електроенергії за період випробувань завдяки роботі генератора НВЧ-випромінювань при застосуванні технології захисту від гідратуутворень становить: $0,064 \cdot 2036 = 130,2$ кВт·год, де 0,064 – підвищення питомого споживання електроенергії кВт·год/тис. м³ газу; 2036 – об'єм обробленого газу, тис. м³.

Виходячи з тривалості випробувань (10 діб), підвищення обсягів споживання електроенергії становить у середньому 13,02 кВт·год за добу.

Впровадження розробленої автором технології використання метанолу в процесах низькотемпературної підготовки газу із застосуванням енергії надвисокочастотного випромінювання дозволило зменшити питоме споживання метанолу на установці НТС на 23,2%. Розрахунок економічної ефективності технології за період дослідження показав економічний ефект у сумі 111 196,8 грн. Очікуваний річний економічний ефект від впровадження технології для підприємства складає 1 255 857,76 грн. за рахунок суттєвої економії витрат на закупівлю реагентів за рік.

Таким чином, результати промислових випробувань підтвердили ефективність технології попередження гідратуутворення в процесах низькотемпературної підготовки газу із застосуванням енергії надвисокочастотного випромінювання. Впровадження запропонованої системи антигідратного захисту забезпечило стабільну роботу установки підготовки газу в безгідратному режимі, скорочення питомих витрати вартісного та токсичного метанолу та досягти значного екологічного ефекту внаслідок попередження забруднення навколишнього середовища й утилізації використаних реагентів.

Висновки.

1. Розроблено технологію використання метанолу в процесах низькотемпературної підготовки газу із застосуванням енергії надвисокочастотного випромінювання, що включає облаштування у лінії низькотемпературної сепарації спеціальної ділянки газопроводу з технологічною вставкою з розташованим на ній мікрохвильовим електромагнітним випромінювачем, антена якого розташована усередині газопроводу.

2. Випробування нової технології використання метанолу в процесах низькотемпературної підготовки газу із застосуванням енергії надвисокочастотного випромінювання в умовах УППГ «Західні Радченки» є промисловим підтвердженням поставленим задачам. Впровадження запропонованої схеми дозволило знизити витрати метанолу на 22,5% при забезпеченні безгідратного режиму роботи установки підготовки газу. Економічний ефект від впровадження запропонованої технології становить 111 196,8 грн, очікуваний річний економічний ефект – 1 255 857,76 грн. за рахунок суттєвої економії витрат на закупівлю метанолу.

Перелік посилань

1. Dmytrenko, V., & Podoliak, T. (2024). Research of methanol content in technological flows of facilities that process gas preparation by low-temperature separation method. *Technology Audit and Production Reserves*, 6(1 (80)), 46–53. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.318926>
2. Воловецький, В. Б., Витязь, О. Ю., & Щирба, О. М. (2010). Попередження відкладання гідратів та збирання рідини під час продування свердловини та шлейфу. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*, 1(34), 160–164. <http://elar.nung.edu.ua/bitstream/123456789/4125/1/986p.pdf>
3. Yang, H., Liu, X., Yue, J., & Tang, X. (2021). Analysis of factors affecting microwave heating of natural gas hydrate combined with numerical simulation method. *Petroleum*, 8(3), 391–402. <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2021.12.003>
4. Bera, A., & Babadagli, T. (2017). Effect of native and injected nano-particles on the efficiency of heavy oil recovery by radio frequency electromagnetic heating. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 153, 244–256. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.03.051>
5. Бондаренко, В. І., Сай, К. С., Ганушевич, К. А., & Овчинніков, М. П. (2015). Розробка математичної моделі інтенсифікації процесу гідратуутворення за результатами експериментальних досліджень. *Розробка родовищ*, 9(1), 259–266. <https://rr.nmu.org.ua/pdf/2015/20150906-34.pdf>
6. Rojey, A., & Larue, J. (1988). *Integrated process for the treatment of a methane-containing wet gas in order to remove water therefrom* (U.S. Patent No. 4,775,395). U.S. Patent and Trademark Office. <https://patents.google.com/patent/US4775395>

7. Дмитренко, В. І., & Подоляк, Т. М. (2024, 12–13 грудня). Технології використання метанолу на установках НТС. В *Академічна й університетська наука: результати та перспективи: Збірник наукових праць XVII-ої Міжнародної науково-технічної конференції* (с. 319–322). Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». <https://reposit.nupp.edu.ua/files/original/178/18902/8bcff7b30b76c8d3d57f0e2fa0133eb3065979e7.pdf>
8. Satenov, K. G., Tkenbayev, S. M., Tashenov, Z. A., & Akhmetov, Z. E. (2024). Processes of methanol regeneration from water-methanol solutions in the oil and gas industry. *Kazakhstan Journal for Oil & Gas Industry*, 6(1), 99–109. <https://doi.org/10.54859/kjogi108691>
9. Nielsen, R. B., & Bucklin, R. W. (1983). Why not use methanol for hydrate control? *Hydrocarbon Processing*, 62(4), 71–78. <https://www.osti.gov/biblio/5382028>
10. Mukhsaf, M. H., Li, W., & Jani, G. H. (2025). Optimizing methanol injection quantity for gas hydrate inhibition using machine learning models. *Applied Sciences*, 15(6), 3229. <https://doi.org/10.3390/app15063229>
11. Khan, S. H., Misra, A. K., Majumder, C. B., & Arora, A. (2020). Hydrate dissociation using microwaves, radio frequency, ultrasonic radiation, and plasma techniques. *ChemBioEng Reviews*, 7(4), 130–146. <https://doi.org/10.1002/cben.202000004>
12. Tang, L. G., Xiao, R., Huang, C., Feng, Z. P., & Fan, S. S. (2005). Experimental Investigation of Production Behavior of Gas Hydrate under Thermal Stimulation in Unconsolidated Sediment. *Energy & Fuels*, 19(6), 2402–2407. <https://doi.org/10.1021/ef050223g>
13. Wang, B., Fan, Z., Wang, P., Liu, Y., Zhao, J., & Song, Y. (2020). Numerical analysis of microwave stimulation for enhancing energy recovery from depressurized methane hydrate sediments. *Applied Energy*, 262, Article 114559. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114559>
14. Wang, Y., Li, X. S., Guan, P., Fan, S. S., & Chen, J. L. (2024). Study on microwave heating energy supplement technology for gas hydrate reservoir. *Energy*, 286, Article 129624. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129624>
15. Dreus, A. Y., Horbiei, M. S., Dmytrenko, V. I., & Kozii, S. V. (2022). Numerical study of microwave impact on gas hydrate plugs in a pipeline. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (4), 28–34. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-4/028>
16. Wang, S., Zhu, Y., Bondarenko, V., Dreus, A., Liang, J., & Liu, B. (2021). Design and numerical simulation of a microwave antenna with coaxial slots for preventing secondary formation of gas hydrate. *E3S Web of Conferences*, 230, 1008. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123001008>
17. Chong, Z. R., Yang, S. H. B., Babu, P., Linga, P., & Li, X. S. (2016). Review of natural gas hydrates as an energy resource: Prospects and challenges. *Applied Energy*, 162, 1633–1652. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.061>
18. Davletshina, M. R., Stolpovsky, M. V., Chiglintseva, A. S., & Gimaltdinov, I. K. (2020). Features of decomposition of gas hydrate when exposed to microwave radiation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 919(6), 62071. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/919/6/062071>
19. *Microwave antenna assembly and methods* (2018). (Patent WO2018191743A1)
20. Кондрат, О. Р., & Гутак, А. Д. (2015). Енергоєфективна модифікація установки низькотемпературної сепарації газу. *Нафтогазова галузь України*, (5), 26–30. <http://elar.nung.edu.ua/bitstream/123456789/317/3/5186p.pdf>
21. Подоляк, Т. М., & Дмитренко, В. І. (2026, 18 березня). Удосконалення конструкції пристрою для мікрохвильового запобігання гідратуутворення у промислових газопроводах. В *Тези XVI Всеукраїнської конференції молодих вчених «Молоді вчені 2026 – від теорії до практики»* (с. 516–520). НТУ «Дніпровська політехніка». <https://drive.google.com/file/d/17uytircluOGv3xILxEk6WOu9QGh0ePMN/view>

ABSTRACT

Purpose. Improving the efficiency of methanol use in low-temperature gas treatment processes under hydrate formation conditions by utilizing ultra-high frequency radiation energy.

The methods. The analysis of hydrocarbon was carried out using physical, chemical and physico-chemical research methods. The study of methanol content in technological lines of low-temperature gas separation plants was carried out using the Aspen HYSYS simulator. The power of electromagnetic radiation was determined using the Pipe3 computer program developed by the author. The results of industrial implementation and the economic efficiency of the developed technology were analyzed using industrial data processing and analysis methods.

Findings. The technology for using methanol in low-temperature gas preparation processes using microwave radiation energy has been developed. The choice of a site for installing a magnetron between the choke device and the second-stage separator has been substantiated. A new design of a removable insert with a magnetron has been proposed. A distinctive feature of the development is the creation of a resonant zone between the choke and the diaphragm. The installation of a microwave emitter in the technological scheme of a low-temperature separation installation has been proposed. A method for selecting the magnetron power depending on the concentration of hydrates in the flow has been determined. Technical limitations of the technology for pressure, pipeline diameter and phase movement regime have been established. The results of testing a new technology for using methanol in the conditions of the Zakhidny Radchenko gasification plant are presented.

The originality. New approximate dependences of specific methanol and electricity consumption on daily gas consumption have been established for the use of microwave radiation technology in low-temperature gas preparation processes in a certain range of gas consumption.

Practical implementation. The proposed technology for methanol application in low-temperature gas treatment processes using ultra-high frequency radiation energy ensures hydrate-free operation of integrated gas treatment units, reduces the consumption of expensive and toxic methanol, and lessens the environmental impact.

Keywords: *hydrate formation, methanol, ultra-high frequency electromagnetic radiation, energy efficiency, gas treatment, low-temperature separation, natural gas, mathematical modeling.*

дата першого надходження статті до видання	17.01.2026
дата прийняття до друку статті після рецензування	21.02.2026
дата публікації (оприлюднення)	30.03.2026