


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
«ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ»

Абдуллах Нашван МахмудТабіт



УДК 532.528, 529.5: 536.423

«Тепломасообмін та гідродинаміка в газорідних дисперсних середовищах»

05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», м.Полтава.

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор
Павленко Анатолій Михайлович
Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу, професор кафедри
будівництва та енергоефективних споруд,
м. Івано-Франківськ

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Бошкова Ірина Леонідівна
Одеська національна академія харчових
технологій, професор кафедри
теплоенергетики та трубопровідного
транспорту енергоносіїв, м. Одеса

кандидат технічних наук,
Гончарук Світлана Михайлівна,
Інститут технічної теплофізики Національної
академії наук, провідний науковий
співробітник відділу теплофізичних основ
енергоощадних технологій, м. Київ

Захист відбудеться “ 20 ” грудня 2021 р. о 12³⁰ годині на засіданні спеціалізованої
вченої ради Д 41.088.03 у Одеській національній академії харчових технологій за адресою:
765082, м. Одеса вул. Дворянська 1/3

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Одеської національної академії харчових
технологій за адресою: 765082, м. Одеса, вул. Дворянська 1/3

Автореферат розіслано “ 18 ” листопада 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 41.088.03

д.т.н., професор,



Мілованов В. І.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Створення енергозберігаючих технологій, які відповідають сучасним вимогам виробництва, базуються на розробці нових концепцій, проведенні комплексних наукових досліджень та детальному вивченні сутності фізичних явищ, що у підсумку зумовлює можливість цілеспрямованого керування технологічними процесами і забезпечення оптимальних умов їх проведення.

Актуальність теми. Неослабний інтерес до вивчення газових гідратів стимулюється зростаючими вимогами галузей промисловості, де такі системи знаходять практичне застосування. Це, насамперед, енергетика, хімічна технологія, переробні галузі промисловості, транспортування та зберігання палива тощо. В останні десятиріччя такі дослідження пов'язуються переважно з вирішенням практичних задач при видобуванні та транспортуванні газу, особливо у зв'язку з необхідністю переходу на нові енергоресурси.

Дослідження тепломасообмінних і гідродинамічних процесів які відбуваються під час синтезу та дисоціації газових гідратів, систематично проводяться в наукових лабораторіях індустріально розвинених держав світу. Безперервно зростає кількість публікацій з цієї тематики. Тенденція до збільшення фундаментальних досліджень в цьому напрямку, яка спостерігається в останні роки, відображує постійну потребу промисловості в такій науковій інформації. З іншого боку, це свідчить про незадоволеність дослідників існуючим станом проблеми в цілому.

Теперішній стан проблеми, на наш погляд, можна сформулювати так. Динамічні ефекти, що супроводжують явища синтезу газових гідратів, зумовлені впливом цілого ряду умов: тиск, температура, турбулізація потоку, вплив поверхнево-активних речовин, час та багато інших. Одночасний вплив великої кількості різноманітних факторів ускладнює можливість експериментального дослідження навіть за умов застосування найсучасніших засобів вимірювання. Тому проведення аналізу експериментів по синтезу та дисоціації газових гідратів не буде ефективним, якщо не залучати методи математичного моделювання, і ступінь вірогідності одержаної інформації визначається ступенем достовірності застосованої моделі і коректністю прийнятих припущень. Вочевидь, виходом із цієї ситуації є застосування методів чисельного моделювання з урахуванням усіх визначальних фізичних факторів і з використанням мінімальної кількості обмежувальних припущень. Швидкий розвиток комп'ютерних технологій відкриває шлях до одержання легкодоступної і вірогідної інформації при дослідженні найскладніших систем і швидкоплинних процесів. Такий підхід створює необмежені можливості для вивчення особливостей фізичних механізмів гідратуутворення, а також для створення надійних методів розрахунку технологічних процесів і для прогнозування екстремальних ситуацій, пов'язаних з видаленням з трубопроводів газогідратних пробок.

Вирішення таких задач актуально для України як промислово розвинутої країни, що має досвід застосування найсучасніших технологій, і на території якої розміщено розгалужену мережу газо- та нафтопроводів, а також є великі поклади газових гідратів у шельфі Чорного моря.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась відповідно до постанови КМУ від 22.11.1993 № 938 «Про пошуки газогідратної сировини в Чорному морі і створення ефективних технологій її видобутку та переробки», комплексної програми «Енергетична стратегія України до 2030 р.», схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 24.07.2013р. №1071

Дослідження виконувалися у Полтавському національному технічному університеті імені Юрія Кондратюка відповідно до держбюджетної НДР МОН України «Дослідження впливу термодинамічних параметрів фазових переходів у системах із газовими гідратами на ефективність газогідратних технологій» ДР №0115U002420, де здобувач був відповідальним виконавцем окремого розділу.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є дослідження впливу теплофізичних параметрів (температури, тиску, часу та концентрації ПАР) на якість синтезованого газового гідрату, встановлення теплотехнічних характеристик дисоціації газових гідратів у трубопроводах під дією точкового джерела НВЧ випромінювання.

Відповідно до поставленої мети визначено такі завдання:

- вивчити вплив термодинамічних параметрів на ефективність процесу гідратоутворення, а також виконати аналіз процесів та установок з синтезу газових гідратів;
- розробити дослідні установки для дослідження теплофізичних процесів та синтезу і дисоціації газових гідратів;
- виконати експериментальні дослідження синтезу газових гідратів з метою дослідження впливу різноманітних факторів на цей процес;
- дослідити процес дисоціації газового гідрату під впливом НВЧ ЕМ випромінювання;
- скласти математичну модель, котра описує вплив НВЧ випромінювання на процес дисоціації газових гідратів.

Об'єктом дослідження є газогідратні структури, що динамічно розвиваються внаслідок дії зовнішніх факторів.

Предметом дослідження є тепломасообмінні і гідродинамічні процеси, зумовлені впливом різноманітних термодинамічних факторів, котрі визначають динаміку синтезу чи дисоціації газових гідратів.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених у роботі задач застосовано методи фізичного експерименту та математичного моделювання. Експериментальні дослідження виконано на розробленій та запатентованій дослідній установці. При обробці результатів лабораторних досліджень використовувалися методи математичної статистики, метод планування експерименту. Обробка і аналіз дослідних даних і даних математичного моделювання виконувалися за допомогою програм MS Excel та MathCad. Математичні моделі розроблялися на основі детального аналізу фізичних механізмів і явищ, що визначають динаміку теплофізичних процесів у масиві гідрату, з використанням інформації, яку отримано шляхом узагальнення результатів експериментальних і теоретичних досліджень.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

1. Вперше досліджено теплофізичні процеси синтезу гідрату пропану в барботажному апараті з фільтросною насадкою, що дозволило проаналізувати вплив термодинамічних параметрів на функцію оптимізації – газовміст газового гідрату.
2. Вперше виконано дослідження теплофізичних процесів синтезу гідрату пропану шляхом визначення режимів роботи установки з максимальною ефективністю. Досліджено вплив ПАР на

ефективність процесу синтезу гідратів, що дало можливість підвищити ефективність процесу синтезу газового гідрату.

3. На основі натурних експериментальних досліджень вперше виконано порівняння дисоціації газового гідрату під впливом НВЧ випромінення в замкненому об'ємі з льодом, снігом та водою, що дало можливість встановити закономірності зміни внутрішніх джерел теплоти та ККД випромінювача від кількості газового гідрату.

4. Удосконалено математичну модель теплофізичного процесу дисоціації гідрату під впливом внутрішніх джерел теплоти, яка дозволила отримати основні характеристики процесу, необхідні параметри установки і проаналізувати вплив різноманітних факторів на процес дисоціації гідрату.

5. Отримали подальший розвиток дослідження впливу НВЧ ЕМ випромінення на ефективність установок з ліквідації газогідратних пробок в трубопроводах

Практичне значення одержаних результатів. Результати досліджень можна використовувати для визначення газовмісту газового гідрату, який отримують у барботажних установках з фільтросним розпилювачем, залежно від температури, тиску, часу та концентрації ПАР в широкому діапазоні умов проведення процесу. Це створює передумови для здійснення процесу синтезу гідрату з максимальною концентрацією газу у промислових газогідратних установках. Отримано висновок про те, що головними факторами гідратоутворення є тиск та концентрація ПАР, які у певному співвідношенні дозволяють швидко отримувати високоякісний газовий гідрат. Врахування отриманих рекомендацій при промисловому виробництві газових гідратів дозволить оптимізувати технологічний процес.

Результати дослідження дисоціації гідратів в умовах дії НВЧ ЕМ випромінення дозволили встановити основні закономірності дисоціації газових гідратів під дією внутрішніх джерел теплоти. Запропонована математична модель може застосовуватися для розрахунку необхідної потужності, часу дії та дальності дії приладів для усунення газогідратних пробок в трубопроводах.

За результатами досліджень отримано 1 патент на корисну модель та 1 патент на винахід.

Матеріали роботи впроваджено у навчальний процес Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Особистий внесок здобувача полягає в конструюванні і монтажу дослідних установок для синтезу газового гідрату, визначення газоємності гідрату, проведення експериментальних досліджень з отримання гідрату пропану при різних термодинамічних умовах та концентрації ПАР, експериментального визначення газоємності отриманого гідрату, визначення впливу ПАР на поверхневий натяг.

Автором особисто сконструйовано установку для дослідження впливу НВЧ ЕМ випромінення на процес дисоціації газового гідрату та проведено ряд експериментальних досліджень. Наведені у дисертаційній роботі результати досліджень, їх обробка, висновки та рекомендації виконані Автором самостійно.

У наукових працях автора, що опубліковані у співавторстві, здобувачу належить: участь в обґрунтуванні загальних положень, узагальнення результатів, підготовка до друку [1];

обґрунтування загальних положень, проведення теоретичних та експериментальних досліджень, узагальнення результатів [2]; планування та проведення досліджень, узагальнення результатів [3]; участь у проведенні експериментальних досліджень, аналіз результатів, підготовка матеріалів до публікації [4]; участь у проведенні експериментальних досліджень, аналіз результатів, підготовка матеріалів до публікації. [5]; розробка концепції, проведення досліджень, аналіз результатів [7]; узагальнення результатів теоретичних і експериментальних досліджень, підготовка до публікації [9]; експериментальні дослідження [10]. У патенті здобувачу належить розробка обв'язки реактора, підготовка до друку [11].

Апробація результатів дисертації. Основні результати оголошувались і обговорювались на наукових конференціях: II міжнародна науково-технічна конференція «Газогідратні технології в гірництві, нафтогазовій справі та геотехніці» у м. Дніпрі 09-11 листопада 2016р.; 2-й міжнародній науково-технічній конференції «Actual problems of power engineering, construction and environmental engineering» в Свентокшиській політехніці м. Кельце (Польща) 23–25 листопада 2017р.; міжнародна наукова конференція «Проблеми і перспективи розвитку академічної та університетської науки» м. Полтава 6-8 грудня 2017р.; 70-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів Полтавського НТУ ім. Ю. Кондратюка 18 травня 2018р.; міжнародна наукова конференція «Technology, Engineering and Science – 2018», 24-25 жовтня 2018р.

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 13 наукових публікацій в яких повністю відображені основні результати дисертації, з них 4 статі у наукових фахових виданнях України (у тому числі 1 стаття у виданні України, яке включено до міжнародної наукометричної бази SCOPUS), 3 статті у наукових періодичних виданнях інших держав; 2 патенти України та 4 тези доповідей на міжнародних конференціях. Основні результати досліджень містяться у роботах [1-11].

Структура дисертації. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 167 найменувань. Дисертація містить 155 сторінок друкованого тексту, 79 рисунків, 24 таблиці та 2 додатки на 8 сторінках. Дисертація за структурою, мовою та стилем викладення відповідає вимогам МОН України.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, визначено зв'язок з науковими програмами, темами, планами, сформульовано мету та задачі досліджень, наведено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, особистий внесок автора, ступінь апробації та відомості про публікації автора.

В першому розділі проаналізовано структуру газових гідратів, особливості розташування газогідратних покладів, відмічено значний внесок у вивчення властивостей гідратів В. Г. Васильєва,

Ю. Ф. Макогона, Ф. А. Требіньє, А. А. Трофимука та ін. Проаналізовано сучасний стан та перспективи технології транспортування газу у газогідратній формі.

Проаналізовано термодинамічні та фізико-хімічні властивості газових гідратів. Установлено, що гідрати мають ряд унікальних властивостей: велику теплоту дисоціації, низьку теплопровідність, високий газовміст та ін. Урахування цих властивостей є надзвичайно важливим при здійсненні процесів синтезу та розкладу газових гідратів.

Розглянуто механізми утворення і розкладу гідратів. При утворенні гідратної структури питомий об'єм газу різко знижується, відбувається його стиснення від зовнішнього тиску гідратоутворювачів до тиску газу в гідратному стані.

Проаналізовано статистичні моделі розрахунку умов гідратоутворення Ван-дер-Ваальсом і Плеттом, Перішом і Праусніцем, модель Пенга і Робінсона, кінетичну модель дисоціації запропоновану Кімом і Бішною.

Проаналізовано особливості утворення природних газогідратів. Встановлено, що накопичення газогідратів у щільному просторі активно протікає як при позитивних так і при негативних температурах.

Розглянуто способи утворення і розкладання гідратів у трубопроводах. Проаналізовано вплив різних факторів на гідратоутворення. Розглянуто причини утворення гідратних пробок в трубопроводах. Визначено і класифіковано місця утворення газогідратних пробок.

Проаналізовано способи попередження утворення гідратів природних гідратів і боротьба з ними: осушення газу етиленгліколем, зниження тиску, підвищення температури газу та застосування інгібіторів.

Проаналізовано переваги і недоліки відомих способів руйнування гідратних пробок в трубопроводах. Особливості ліквідації гідратних пробок методом зниження тиску. Ліквідація гідратних пробок природних і зріджених газів в трубопроводах методом підігріву. Усунення гідратних пробок природних і зріджених газів в трубопроводах за допомогою метилового спирту, Комбіновані способи руйнування гідратних пробок в трубопроводах.

Встановлено, що потребують додаткового вивчення фактори впливу на утворення газового гідрату та пошук ефективних способів руйнування гідратних пробок в трубопроводах.

Другий розділ дисертації присвячено експериментальним дослідженням синтезу гідратів в лабораторних умовах.

На початку розділу проведено огляд досліджень, пов'язаних з синтезом газових гідратів. Виділено головні фактори, які активно впливають на гідратоутворення: термобаричні умови, присутність води, час, розвинена поверхня тепломасообмінної поверхні та наявність поверхнево-активних речовин (ПАВ).

Для досліджень особливостей впливу наведених факторів використовувалась розроблена автором лабораторна установка, представлена на рисунку 1. Установка дозволяє виконувати наступні завдання: отримання газових гідратів протягом різних проміжків часу при заданих умовах; дослідження впливу таких факторів як температура, тиск, час, наявність ПАР на процес утворення (розчинення) гідратів; отримання необхідної кількості гідрату для подальших досліджень процесу

дисоціації на експериментальній установці, запропонованій автором.

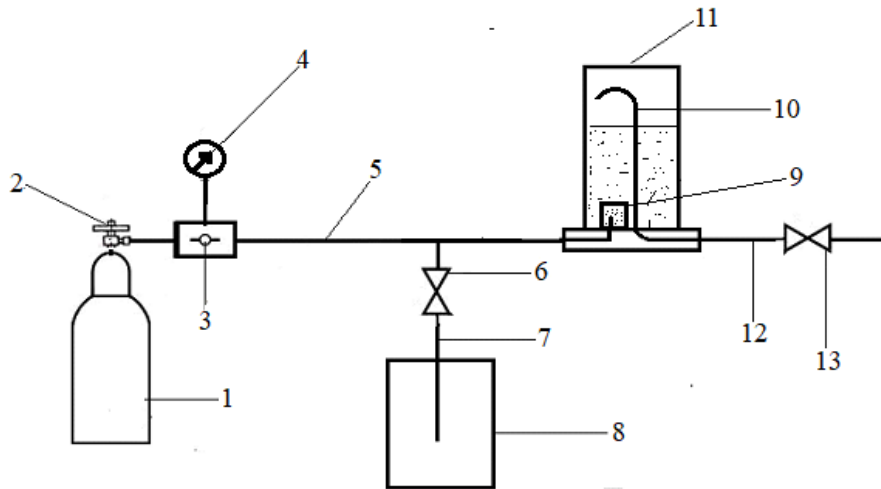


Рис. 1. Схема лабораторної установки для отримання гідратів в лабораторних умовах:

1 – балон з газом, 2 – вентиль, 3 – допоміжний газовий редуктор, 4 – манометр надлишкового тиску, 5 – газовий шланг, 6 – кульовий кран, 7 – шланг зливу води, 8 – ємність для води, 9 – пориста насадка, 10 – мідна трубка, 11 – прозора колба, 12 – патрубок для виходу газу, 13 – кран для регулювання та випуску газу.

Проведення експериментальних лабораторних досліджень з утворення гідратів включали спостереження за протіканням процесу гідратоутворення, виділення основних фаз гідратоутворення та інструментальні вимірювання тиску, температури, газовмісту гідрату за різних вихідних параметрів. Встановлено, що формування газового гідрату відбувається у чотири стадії, рис.2.

Визначення кількості газу в отриманому гідраті виконувалося за допомогою зібраної автором дослідної установки, схема та загальний вигляд якої зображені на рис.3.

При проведенні даного дослідження важливу роль відіграє кількість поверхнево-активних речовин. Для визначення поверхневого натягу на міжфазній поверхні було використано спеціальний прилад – сталагмометр, загальний вигляд та схема якого зображені на рисунку 4.а. та 4.б. відповідно.

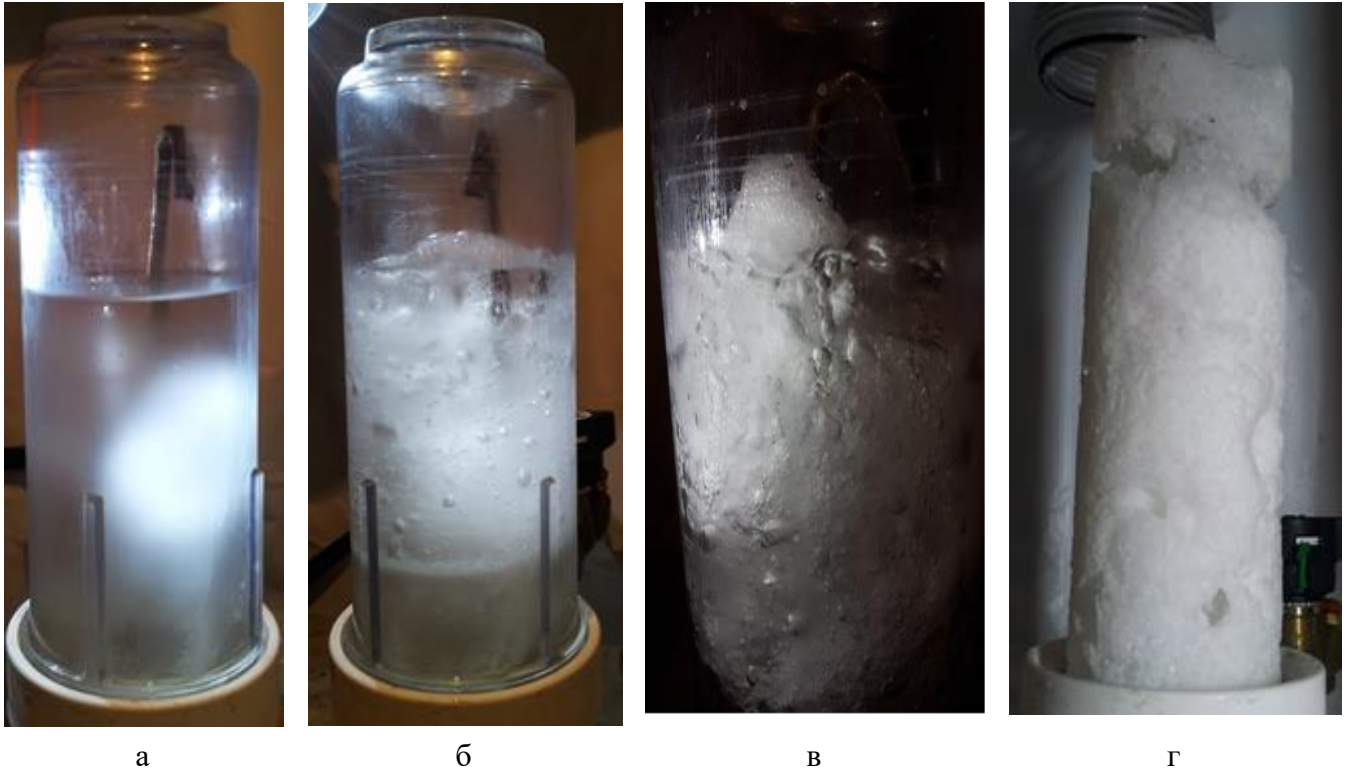
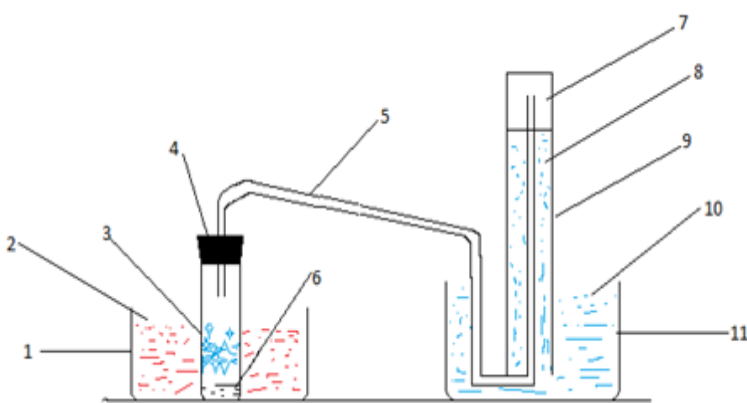
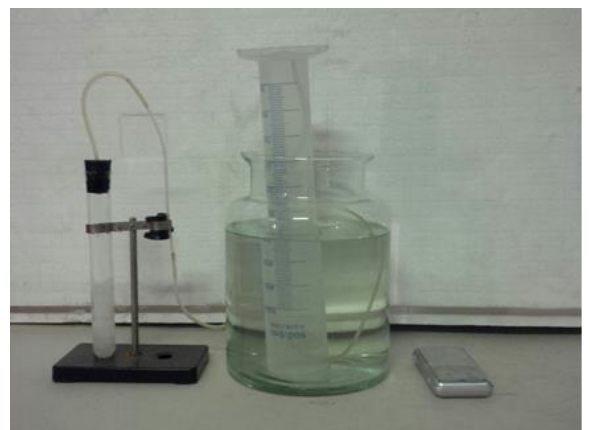


Рис.2. Стадії формування гідрату

Встановлено, що в процесі гідратоутворення можна виділити декілька стадій: утворення мікрочастин, рис.2.а., при якому спостерігається помутніння водного середовища; формування напівпрозорої гелеподібної фази, рис.2.б., процес змерзання гелеподібної структури в тверду масу, рис.2.в., утворення твердого гідрату після процесу осушення, рис.2.г.



а



б

Рисунок 3. Лабораторна установка для визначення газосмістності гідрату а. – схема; б – загальний вигляд

1 – ємність для води; 2 – тепла вода; 3 – пробірка; 4 – кришка; 5 – газовий шланг; 6 – гідрат; 7 – об'єм газу в колбі; 8 – кількість води в колбі, 9 – колба; 10 – вода; 11 – ємність для води

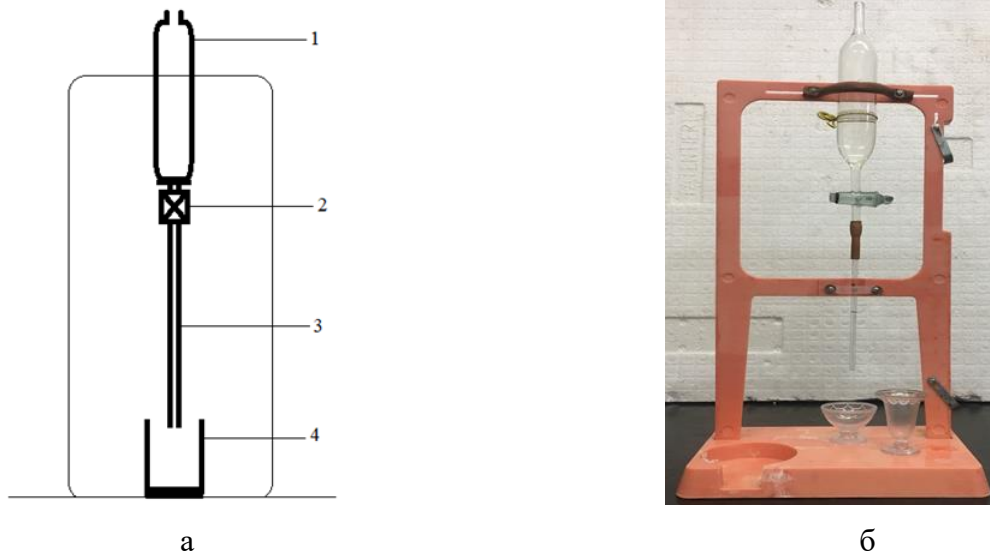


Рис.4. Лабораторна установка для визначення сили поверхневого натягу сталагмометричним методом а–схема; б – загальний вигляд

1 – ємність; 2 – кран для регулювання; 3 – капілярна трубка; 4 – ємність для зливання рідини

Для визначення поверхневого натягу в умовах дії ПАР різної концентрації застосовувався метод підрахунку крапель. Результати експериментальних досліджень, які представлено на рис.5., показують що для зменшення поверхневого натягу вистачає невеликої концентрації ПАР.

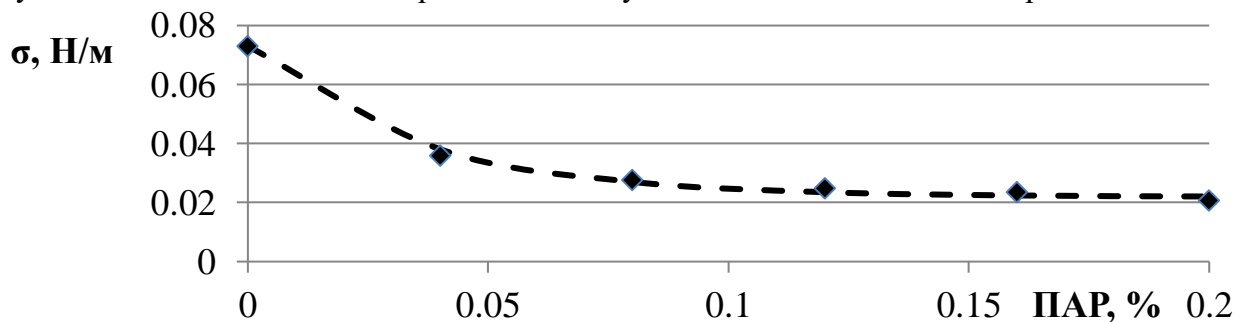


Рис.5. Поверхневий натяг при різній концентрації ПАР

В результаті досліджень отримали, що поверхневий натяг змінювався в межах від 0 до 50 Н/м при зміні концентрації ПАР від 0 до 0,2%.

Висновки. Для визначення термодинамічних параметрів утворення гідрату була розроблена лабораторна установка. За допомогою неї проведено ряд натурних дослідів при різних початкових параметрах:

- тиск змінювали в межах від 0,1 до 0,6МПа;
- температура змінювалась в межах від 0 до 5 °С;
- концентрація поверхнево – активних речовин змінювалась в межах від 0 до 10 мл/г;
- час змінювали в межах від 30 хвилин до 5 годин.

2. Була розроблена установка для вимірювання газоємності газового гідрату. В результаті експерименту встановлено, що газоємність змінюється (при заданих умовах) від 0 до 73.

3. Використано сталагмометр для визначення поверхневого натягу водних розчинів поверхнево-активних речовин. Проаналізувавши результати експериментальних досліджень

встановлено, що поверхневий натяг змінювався в межах від 0 до 50 Н/м.

Третій розділ присвячено обробці результатів експериментальних досліджень.

Кореляційний аналіз отриманих результатів показав, що основними факторами впливу на газовміст сформованого гідрату пропану виявилися тиск і концентрація ПАР, рис.6. Температура води повинна знаходитися в межах термобаричних умов існування газових гідратів.

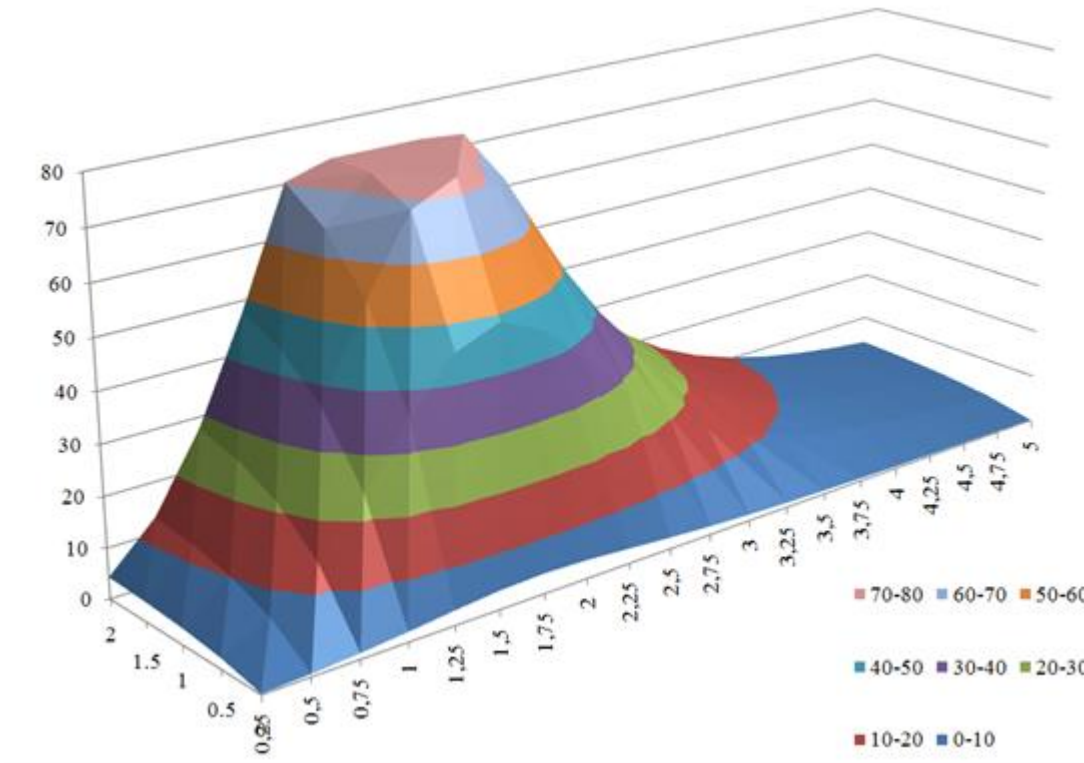


Рисунок 6. – Апроксимація газоємності пропанового ГГ залежно від тиску та концентрації ПАР (по вертикалі – газоємність, права вісь – надлишковий тиск, ліва вісь – концентрація ПАР)

Апроксимаційна функція двох параметрів: тиску та концентрації ПАВ

$$Q = 1.37 \frac{1 + 36P^2}{1 + 0.018P^6} \left(1.5 - 20 \cdot 0.073(0.3 + 0.7e^{-1.15z}) \right), \quad (1)$$

$$Q \leq Q_T$$

де P – надлишковий тиск газу, Атм; Q_T – максимальне теоретичне значення газоємності гідрату.

Знаючи стехіометричний склад газового гідрату можна визначити його максимальну газоємність. Кількість речовини можна обчислити знаючи масу порції речовини чи її об'єм (якщо речовина – газ):

$$n(A) = \frac{m(A)}{M(A)}, \quad (2)$$

де $m(A)$ – маса порції речовини А; $M(A)$ – молярна маса речовини А.

$$n(A) = \frac{V(A)}{V_m}, \quad (3)$$

де $V(A)$ – об'єм газу А; V_m – молярний об'єм газу (за нормальних умов 22,4 л/моль).

Розрахунки, пов'язані з хімічними перетвореннями, основані на стехіометрії хімічних реакцій. Кількість речовини реагентів, які вступили в реакцію або утворились в результаті реакції, пов'язані між собою простими співвідношеннями, які включають стехіометричні коефіцієнти з рівняння реакції.

Аналіз впливу часу та температури потребує додаткового дослідження. Для цього проаналізуємо «залишки» різниці між отриманими значеннями (за результатами дослідів) та апроксимаційною функцією (1). Результати аналізу впливу тривалості здійснення реакції відображені на рисунку 7.

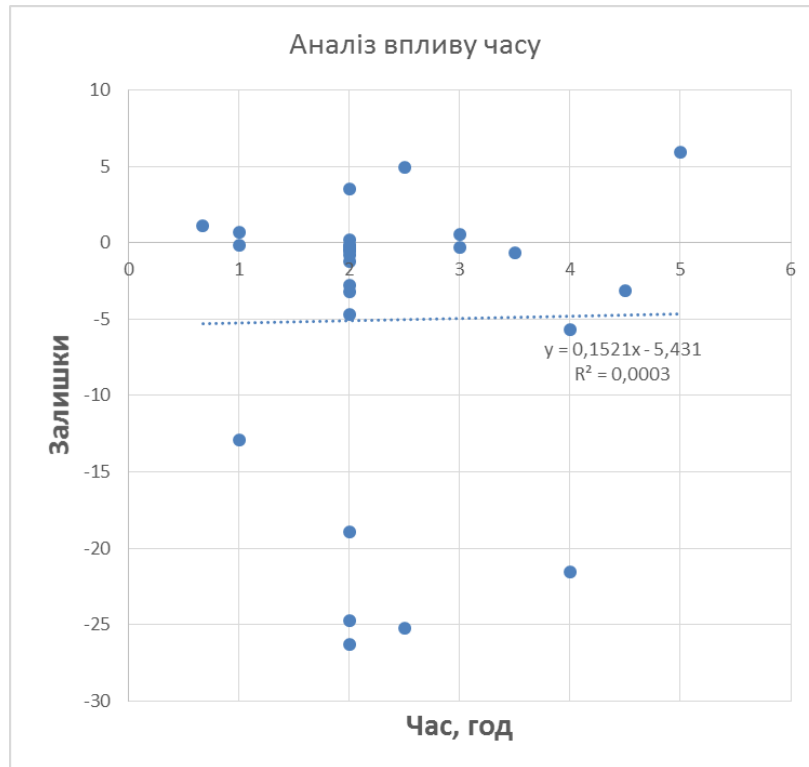


Рисунок 7 – Результати впливу часу на формування газового гідрату

Отже, горизонтальна лінія тренду свідчить про незначний вплив часу проведення дослідів на газоємність гідрату. Цей висновок має велике значення для промислового виготовлення гідрату. Він означає що дана технологія дозволяє отримувати гідрат дуже швидко.

Це підтверджується в окремих дослідях, коли під час розгерметизації реактора гідрат утворювався практично одразу.

Для аналізу впливу температури води також побудуємо діаграму залишків з лінією тренду (8).

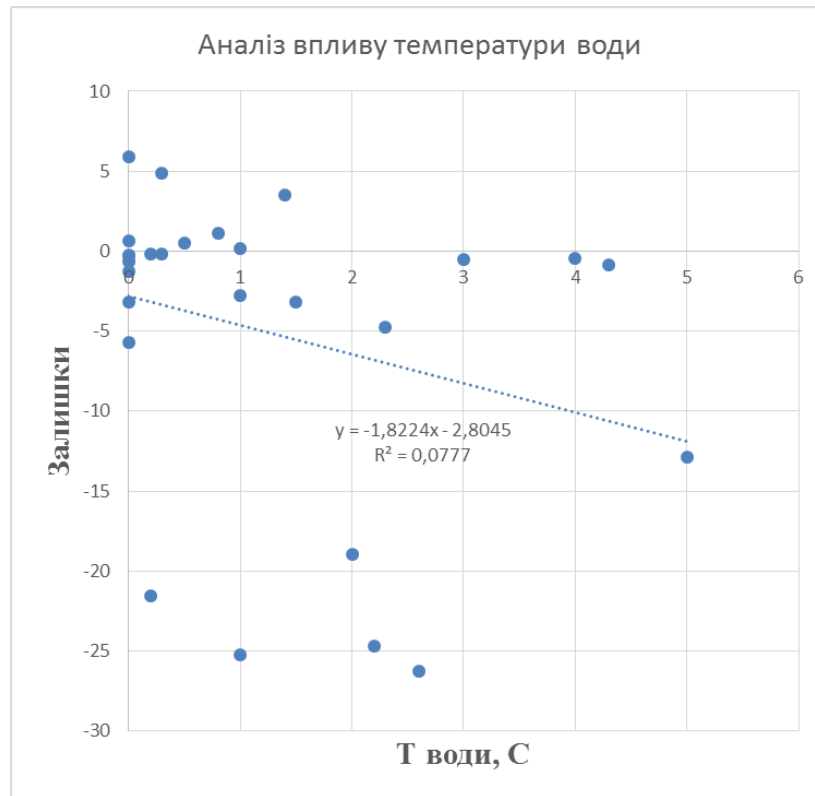


Рисунок 8 – Вплив температури води на формування газового гідрату

Лінія тренду вказує, що процес синтезу газогідрату краще відбувається при нижчій температурі води. Для ідеальних умов – це температура 0 °C.

Тож в головну формулу (1) можна внести поправку для температури води. Обчислимо значення цієї поправки, прийнявши за основу залежність:

$$Q_{P,ПAB,t} = Q_{P,ПAB} K_t \quad (4)$$

При температурі $t=0$ °C поправочний коефіцієнт дорівнює 1. Тому поправочний коефіцієнт можна записати у вигляді лінійної залежності:

$$K_t = 1 + mt \quad (5)$$

Якщо правильно внести поправки, то лінія тренду стане горизонтальною. Звідси можна знайти коефіцієнт m (рис. 9).

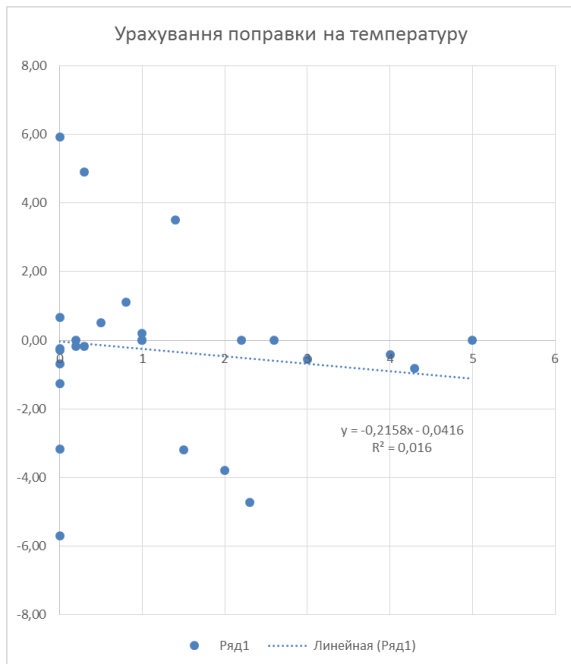


Рисунок 9 – Вплив температури води на формування гідрату з урахуванням поправки

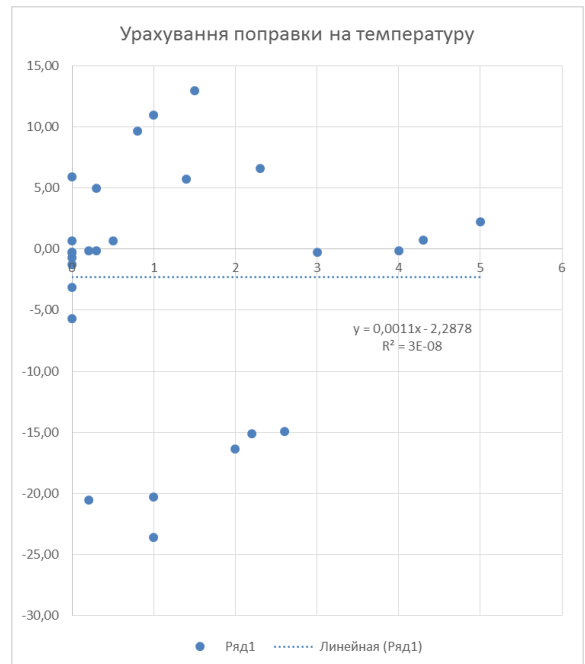


Рисунок 10 – Вплив температури води на ормування гідрату з урахуванням поправки.

Діаграма показує, при коефіцієнті $m = -0,1565$ лінія тренду стає практично горизонтальною. Тож з урахуванням температурної поправки можемо записати:

$$Q_{P,ПAB,t} = Q_{P,ПAB} (1 - 0,1565t) \quad (6)$$

Проте, помилка визначення газоємності при температурах $+1 - +2$ °C також збільшується. При цьому експериментальна газоємність гідрату більша за розрахункову! Це свідчить, що з урахуванням поправки значно підвищився вплив температури на газоємність гідрату, що не відповідає дійсності.

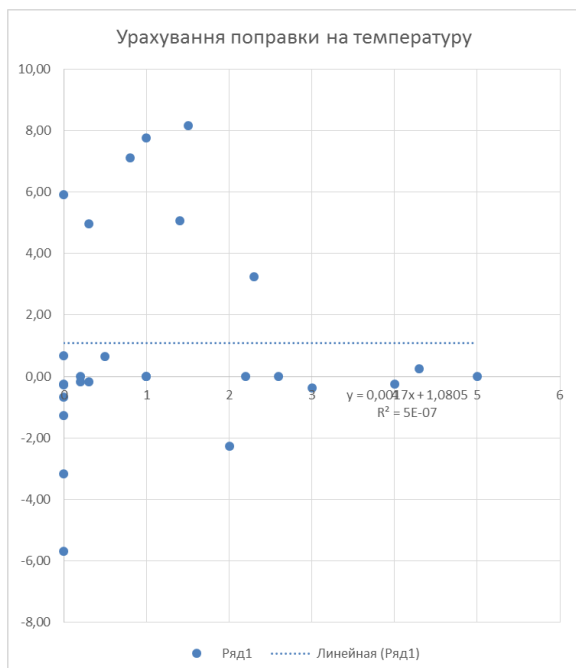


Рисунок 11 – Вплив температури води на формування гідрату з урахуванням поправки.

Для уникнення збільшення помилки можна скористатися аналізом середньоквадратичних відхилень. Тоді лінія тренду не буде горизонтальною, проте середньоквадратична помилка повинна дещо знизитися. Мінімальне значення середньоквадратичної помилки спостерігається при $m = -0,1665$. Це значення мало відрізняється від попереднього ($-0,1565$).

Якщо знехтувати завідомо заниженими результатами, які розташовані на рівні залишків $-20 - -25$, то лінія тренду набуває малого нахилу. Це означає, що вплив температури стає незначним (рис. 10).

В межах температур від 0 до 5 °C впливом температури на газоємність гідрату можна знехтувати.

Виконання статистичної обробки результатів експериментальних даних свідчить про те, що отриманий варіант розрахунку кореляційної залежності є найточнішим.

Висновки

1. Досліджено вплив 4-х теплофізичних факторів на газоємність гідрату: тиску газу, температури води, концентрації ПАВ та часу проведення досліду.
2. На основі статистичної обробки встановлено, що головними факторами впливу є тиск та концентрація ПАВ. Температура води та час проведення досліду мало впливають на газоємність. Встановлено коефіцієнти кореляції, побудовано регресійні залежності та графіки. Аналіз отриманих результатів показав, що автоматизовані методи статистичної обробки результатів не дають достовірних залежностей. Встановлено, що причиною цього явища є існування яскраво вираженого екстремуму досліджуваної функції на даному інтервалі.
3. Методом підбору отримано оптимальну апроксимаційну формулу для визначення прогнозованої газоємності гідрату.
4. Основні результати експериментальних досліджень автора відображено в роботах [173, 174, 175, 178]

Четвертий розділ присвячено вивченню динаміки парових бульбашок в процесах кипіння.

В основі математичного моделювання лежить рівняння теплопровідності Фур'є з розподіленими об'ємними джерелами теплоти, змінними теплофізичними характеристиками теплопровідного середовища та граничними умовами 3-го роду

$$\begin{aligned}
 c_v \rho \frac{\partial t}{\partial \tau} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + q_v \\
 -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} &= \alpha (t_{(x=0, \tau)} - t_3) \\
 -\lambda \frac{\partial t}{\partial y} &= \alpha (t_{(y=0, \tau)} - t_3)
 \end{aligned} \quad (7)$$

Густина розподілу джерел теплоти визначається виразом

$$q = -\frac{1}{2} \operatorname{Re} \frac{\partial}{\partial z} \left(\dot{E}_r \cdot \dot{H}_\phi \right) \quad (8)$$

Тепловий режим трубопроводу круглого перерізу з джерелами теплоти у вигляді НВЧ випромінювання

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{2\alpha P_0}{\pi R^2} \ell^{-2\alpha z} \quad (9)$$

Для гідрату коефіцієнт затухання визначається за формулою

$$\alpha_\Gamma = \frac{\pi \varepsilon' \operatorname{tg} \delta}{\lambda_0 \sqrt{1 - \frac{1}{\varepsilon'} \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{kp}} \right)^2}} \quad (10)$$

Для трубопроводу

$$\alpha_{TP} = \sqrt{\frac{\pi f \mu \mu_0}{\sigma}} * \frac{1}{Z_c R_{TP} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{kp}}\right)^2}} \quad (11)$$

де μ_0 – магнітна проникність вакууму; $Z_c = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}$ – хвильовий опір діелектрика, що заповнює трубопровід, Ом.

Запропонована цифрова математична модель для розрахунку перехідних процесів теплообміну в двовимірних елементах конструкцій з урахуванням зміни фізичних властивостей матеріалу (дисоціації гідрату), джерел теплоти у вигляді теплонадходжень від НВЧ випромінювання та тепловтрат на дисоціацію гідрату і граничних умов третього роду. Для її розв'язку застосовано метод Рунге–Кутта 4-го порядку.

Для проведення експериментальних досліджень було сконструйовано нами експериментальну установку.

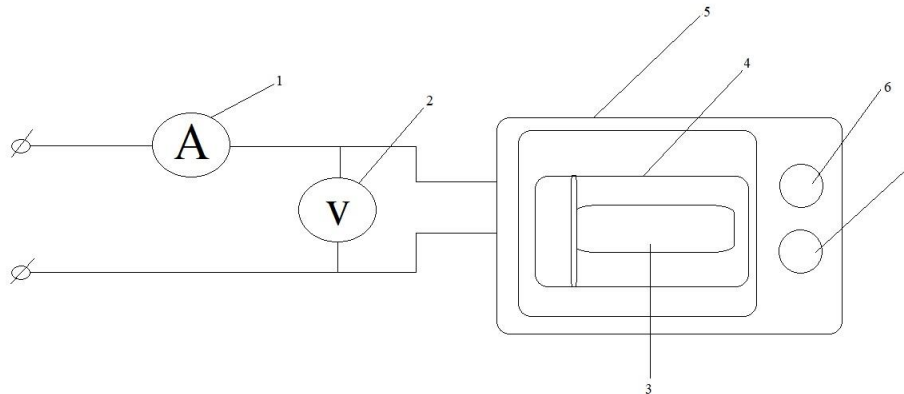


Рисунок 12 Схема експериментальної установки для розкладання гідрату методом НВЧ випромінювання: 1 – амперметр; 2 – вольтметр; 3 – гідрат; 4 – прозора колба; 5 – мікрохвильова піч; 6 – кнопка регулювання часу; 7 – кнопка регулювання режимів

Лабораторна установка для розкладання газового гідрату працює наступним чином. Отриманий для досліджень гідрат пропану зберігається в герметичній сталевій ємності в морозильній камері при температурі від мінус 10 °С до мінус 15 °С. ~~Береться~~ Необхідна кількість гідрату насипається в прозору колбу і герметично закривається. Поміщається прозора колба в лабораторну установку з високочастотним випромінювачем і включається на заданий час і режим. Через кожні 5 секунд прозора колба виймається і візуально оцінюється, коли відбудеться розкладання частини гідрату. Під час кожного виймання вимірюється температура та, за допомогою електронних ваг, кількість води, яка утворилася. Якщо процес розкладання гідрату не відбувся, прозора колба поміщується назад в лабораторну установку, і задається новий час опромінення ЕМП. Повторюється така процедура доти, доки не розкладеться весь гідрат. Одночасно ведеться лабораторний журнал, куди у відповідну таблицю записується результат розкладання гідрату.

Для визначення потужності джерел теплоти та ККД НВЧ нагрівання за допомогою ЕМП було проведено ряд дослідів: нагрівання води, танення льоду, снігу та розкладу гідрату пропану при

атмосферному тиску.

Результати експериментальних досліджень показали, що при постійних умовах теплообміну збільшення об'єму зразка вдвічі призводить до зменшення питомих об'ємних джерел у два рази. Збільшення площі поверхні у 5,6 рази не позначається на потужності джерел теплоти. Експеримент підтверджує те, що вплив НВЧ випромінювання має передусім об'ємний, а не поверхневий характер. Тому усі подальші дослідження спрямовано передусім для встановлення залежності об'ємних джерел теплоти від впливу різних факторів.

Для порівняння головних характеристик процесів НВЧ опромінення різних речовин (води, снігу, льоду та гідрату) усі апроксимуючі криві наведено на зведеному графіку.

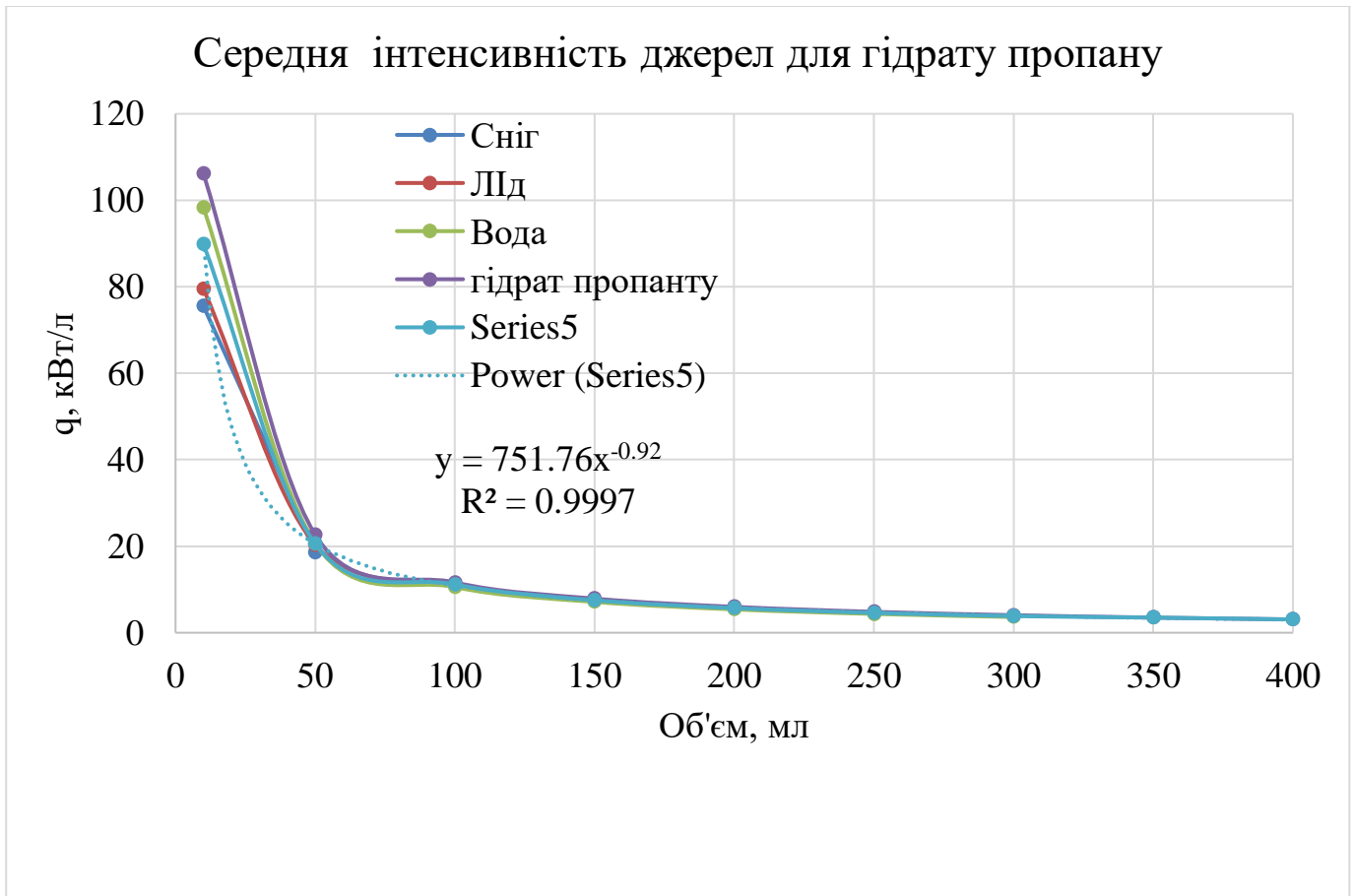


Рисунок 13 – Порівняння середньої інтенсивності об'ємних джерел для снігу, льоду, води і гідрату

Як бачимо, найгірше НВЧ випромінювання поглинає вода. Для невеликої кількості льоду та снігу (до 0,5 л) характерне краще поглинання випромінювання ніж для води. Причому лід та сніг у цьому відношенні поведуть себе приблизно однаково, очевидно внаслідок майже однакової кристалічної структури. Коли об'єм речовини починає займати значну частину простору камери (1–1,5 л), спостерігається зменшення інтенсивності та вирівнювання джерел теплоти для рідкої та твердої фаз води. Найбільше поглинання характерне для гідрату пропану в усьому діапазоні об'ємів.

Результатів розрахунку, свідчить про високу інтенсивність дисоціації гідрату під впливом НВЧ випромінювання у початкові моменти часу. Після досягнення температури фазового переходу дисоціація відбувається в усьому розрахунковому об'ємі трубопроводу, проте з різною швидкістю. Після 30 хвилинного танення, гідрат розтав на 20 см вправо та вліво від випромінювача. Після 1 години роботи випромінювача область повної дисоціації розширилася до ± 40 см. У подальшому інтенсивність дисоціації сповільнюється, що викликано затуханням НВЧ випромінювання на більший

відстані.

Інтенсивність дисоціації гідрату досить швидко змінюється з часом. Максимальна швидкість дисоціації спостерігається протягом першої години роботи випромінювача. При цьому, у кінці першої години роботи ефективність дії випромінювача не перевищує 10% його початкового впливу. У кінці другої години ефективність зменшується до 1,5%.

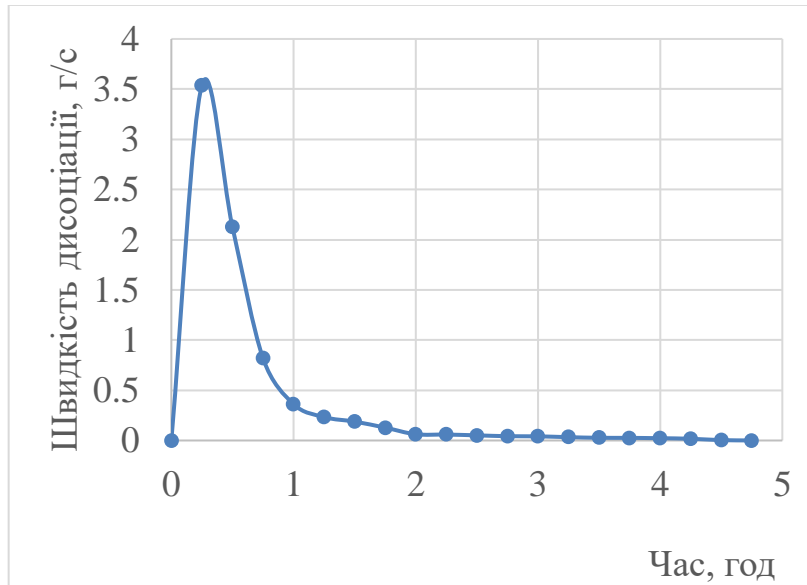


Рисунок 14 – Швидкість дисоціації гідрату в трубопроводі під впливом НВЧ випромінювання

Отже, виконані розрахунки показують принципову можливість руйнування гідратних пробок в газопроводах під впливом НВЧ випромінювання. Для трубопроводу діаметром 100 мм ефективна область дії випромінювання становить $\pm 0,6$ м від точки підводу енергії. Ефективна тривалість дії випромінювання – 1–1,5 години.

Висновки. З метою дослідження процесу дисоціації гідрату під впливом НВЧ електромагнітного випромінювання було проведено ряд натурних експериментів, розроблено математичну модель і виконано ряд досліджень. Результати експериментальних досліджень дисоціації газового гідрату дозволили зробити такі висновки:

1. Підтверджено припущення, що домінуючим впливом на дисоціацію гідрату під дією НВЧ випромінювання є саме дія об'ємних джерел теплоти, а не вплив граничних умов. Це положення лягло в основу математичного моделювання дисоціації масиву гідрату.

2. Встановлено, що процеси нагрівання води, танення льоду і снігу та дисоціація гідрату відбуваються схожим чином. Характерним є те, що отримано обернено пропорційну залежність внутрішніх питомих джерел теплоти від об'єму матеріалу, та зниження ККД випромінювача при зменшенні об'єму матеріалу.

3. Встановлено, що об'ємні теплові джерела, які виникають усередині гідрату пропану під дією НВЧ випромінювання, у 1,5 рази більші ніж у воді та у 1,74 рази більші ніж у льоді та снігові. Для великих кількостей гідрату поглинання електромагнітного поля на частоті 2,4 ГГц становить 90%.

4. Порівняно результати експериментальних досліджень з математичним моделюванням дисоціації гідрату та підтверджено працездатність математичної моделі. Результати математичного моделювання процесу дисоціації гідрату метану у трубопроводі діаметром 100 мм показали, що протягом 1–1,5 години можна усунути гідратну пробку довжиною до 1,5 м. Подальше підведення енергії випромінювача є малоефективним.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

1. Проаналізовано структуру газових гідратів, термодинамічні і фізико–хімічні властивості газових гідратів, механізми утворення і розкладу гідратів, способи утворення і розкладання гідратів у трубопроводах, попередження утворення гідратів природних газів та виявлено недоліки всіх проаналізованих методів, а також встановлено, що гідрати різко зменшують їх пропускну здатність і можуть привести до аварійної зупинки експлуатації газопроводу.

2. Проведено аналіз способів утворення і розкладання гідратів у трубопроводах та встановлено, що для утворення гідратів необхідно, щоб парціальний тиск парів води над гідратом був вище пружності цих парів в складі гідрату. Встановлено, що на температуру утворення гідратів впливають склад гідратоутворювача, чистота води, турбулентність, і т. д. Зміна рівноважної температури гідратоутворення також залежить від швидкості охолодження системи гідратоутворювача – вода.

3. Для визначення оптимальних термодинамічних параметрів утворення гідрату була розроблена лабораторна установка. За допомогою неї проведено ряд натурних експериментів, в яких досліджено вплив 4–х факторів на газоємність гідрату: тиску газу, температури води, концентрації ПАВ та часу проведення досліду.

4. На основі статистичної обробки результатів встановлено, що головними факторами впливу на газовміст газогідрату є тиск та концентрація ПАВ на газовміст гідрату пропану. Температура води та час проведення досліду мало впливають на газоємність. Встановлено коефіцієнти кореляції, побудовано регресійні залежності та графіки. Аналіз отриманих результатів показав, що автоматизовані методи статистичної обробки результатів не дають достовірних залежностей. Встановлено, що причиною цього явища є існування яскраво вираженого екстремуму досліджуваної функції на даному інтервалі.

6. Запропонована цифрова математична модель для розрахунку перехідних процесів теплообміну в двовимірних елементах конструкцій з урахуванням зміни фізичних властивостей матеріалу (дисоціації гідрату), джерел теплоти у вигляді теплонадходжень від НВЧ випромінювання та тепловтрат на дисоціацію гідрату і граничних умов третього роду. Для її розв'язку застосовано метод Рунге–Кутта 4–го порядку.

7. Запропонований метод оперативного усунення невеликих газогідратних пробок у сталевих газопроводах можна рекомендувати до застосування як самостійно, так і в комплексі з іншими заходами.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

B - газова стала; c - питома теплоємність; E - енергія; f - частота коливань; G - масова витрата потоку; g - прискорення; H - тепловміщення; i - номер зони в каналі; j - густина потоку речовини; L - теплота конденсації; M - молекулярна маса; m - маса; N_b - концентрація бульбашок; p - тиск; p_{ex} - протитиск; q - густина потоку теплоти; R - радіус; r - радіальна координата; T - температура; u, v - швидкість; V - об'єм; W - потужність; w - радіальна швидкість; x, y, z - декартові координати; α - коефіцієнт конденсації; β - об'ємний паровміст; δ - товщина теплового граничного шару; ε - густина енергії; λ - коефіцієнт теплопровідності; μ - коефіцієнт динамічної в'язкості; $\tilde{\mu}$ - хімічний потенціал; ρ - густина; σ - коефіцієнт міжфазного натягу; τ - час.

Індекси

0 - початкове значення; ∞ - значення параметра на нескінченному віддаленні; ac - акустичний; $boil$ - кипіння; c - неперервна фаза; cr - критичний; d - дисперсна фаза; f - кінцевий; k - кінетичний; l - рідина; max - максимальне значення; min - мінімальне значення; R - значення параметра в рідині на границі з бульбашкою; s - значення параметра на міжфазній поверхні; sat - стан насичення; tr - трансформування; v - пара.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ, ЯКІ ОПУБЛІКОВАНО ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Pavlenko A. A study of phase transition processes features in liquid–gas systems/ A. Pavlenko, B. Kutnyi, N. Abdullah // Eastern–European Journal of Enterprise Technologies. 4/5 (88) 2017. P. 43–50. (Фаховий, Скопус Q3)
2. Павленко А. М., [Аналіз впливу розміру газопарової бульбашки на процес гідрату утворення](#) / А. М. Павленко, Б. А. Кутний, **Н. М. Абдуллах** // Холодильна техніка та технологія № 53, Вип. 3 Одеса 2017р. С.21 – 28
3. Павленко А. М., [Аналіз утворення дисоціації газових гідратів](#) / А. М. Павленко, Б. А. Кутний, **Н. М. Абдуллах** // Вісник Приазовського технічного університету Вип. 34, 2017р.
4. **Abdullah N.**, GAS HYDRATES EXTRACTION / N. Abdullah, M. Pedchenko, N. Pedchenko // 36. наук. праць (Галузеве машинобудування, будівництво) Вип.3 (45) Полтава: ПолтНТУ, 2015 С.317 – 323
5. Pavlenko A., [A study of phase transition processes features in liquid–gas systems](#) / A Pavlenko, Bohdan Kutnyi, **Nashvan Abdullah** // Восточно–Европейский журнал передовых технологий №4 (5), 2017, p. 43–50
6. Кутний Б., [Вплив зовнішніх чинників на процес утворення гідратів в лабораторних умовах](#) / Б. А. Кутний, **Н. М. Абдуллах** // Технологічний Центр, Харків, 2018р.
7. Kutnyi B., [Исследование особенностей фазово-переходных процессов в газо–жидкостных системах](#)/ **N. Abdullah**, B.Kutnyi // Восточно–Европейский журнал передовых технологий Том 4 № 5 (88), 2017р.
8. **Abdullah N.** EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE PROCESS FOR THE DEVELOPMENT OF DIVERS IN LABORATORY CONDITIONS – Actual problems of power engineering, construction and environmental engineerig, 163 №23–25 November 2017, Kielce, Poland, p.163
9. **Abdullah N.**, [Influence of external factors on the process of hydrates development in laboratory conditions](#) / Bohdan Kutnyi, **Nashvan Abdullah** // Technology audit and production reserves 4 № 1 (42), 2018 – p. 39–45
10. **Abdullah N.**, [Decomposition of Hydrates under the Action of Ultrahigh–Frequency Radiation](#) / **Nashwan Abdullah**, Bohdan Kutnyi, Maryna Leshchenko, Liubov Shumska// International Journal of Engineering & Technology 7№ 4.8,2018 – p.7–16
11. Kutnyi B. [Main features of gas hydrates](#)/ **N. Abdullah**, B. Kutnyi // Journal of New Technologies in Environmental Science Том 1 №4, 2017р.
12. Pavlenko A., [The phenomenon of resonance in gas–steam bubbles](#) / A Pavlenko, Bohdan Kutnyi, **Nashvan Abdullah** // Journal of New Technologies in Environmental Science 1 № 2, 2017
13. Пат. 125003 Україна, МПК (2018) B01F 3/04(2006.01), C10I 3/10 (2006.01) Установка для отримання гідратів у лабораторних умовах /Винахідник: Абдуллах Н.М.Т., Кутний Б.А

- власник Полтава нац. тех. ун–т ім. Юрія Кондратюка. – № u 2017 1 11833 ; заяв. 04.12.2017; опубл. 25.04.2018, Бюл. №8. – 4с.
14. Патент на винахід 121772 UA, МПК В01F 3/04, С10L 3/10. Спосіб отримання газових гідратів у лабораторних умовах / Абдуллах Н.М., Кутний Б.А. – № а 2017 11859; Заявл. 04.12.2017; Опубл. 27.07.2020, Бюл.№14
15. Kutnyi B., Main features of gas hydrates / **N. Abdullah**, B. Kutnyi // issn 2409–65x № 1–2 , 2016 p. 71–78

АНОТАЦІЯ

Абдуллах Н. Тепломасообмін та гідродинаміка в газорідних дисперсних середовищах. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю: 05.14.06 «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика». «Одеська національна академія харчових технологій, Одеса , 2021.

Газові гідрати є єдиним нерозроблювальним джерелом природного газу на Землі, який може скласти реальну конкуренцію традиційним родовищам. Значні потенційні ресурси газу в гідратних покладах надовго забезпечать людство високоякісною енергетичною сировиною.

Автором зроблено аналіз попереднього досвіду:

– механізму утворення і розкладу гідратів та встановлено, що рівноважні параметри утворення і розкладання гідратів в щільному просторі відрізняються від відповідних параметрів у вільному обсязі. На процес гідратування в пористому просторі впливають склад порід, пористість, мінералізація пластової води, кривизна поверхні розділу фаз, що призводить до гістерезису між відповідними умовами та до їх зміни відносно умов гідратування у вільному об'ємі;

– способів утворення і розкладання гідратів у трубопроводах та встановлено, що для утворення гідратів необхідно, щоб парціальний тиск парів води над гідратом був вище пружності цих парів в складі гідрату.

Для визначення термодинамічних параметрів утворення гідрату була розроблена лабораторна установка. За допомогою неї проведено ряд натурних дослідів при різних початкових параметрах: тиск змінювали в межах від 0,1 до 0,6 МПа; температура змінювалась в межах від 273 до 278 К; концентрація поверхнево – активних речовин змінювалась в межах від 0 до 10 мл/літр; час змінювали в межах від 30 хвилин до 5 годин.

Була розроблена установка для вимірювання газоємності газового гідрату. В результаті експерименту встановлено, що газоємність змінюється (при заданих умовах) від 0 до 80 м³/м³.

З метою дослідження процесу дисоціації гідрату під впливом НВЧ електромагнітного випромінювання було проведено ряд натурних експериментів, розроблено математичну модель і виконано ряд досліджень..

Проведено ряд натурних дослідів при різних початкових параметрах:

- тиск змінювали в межах від 0 до 5 Атм;
- температура змінювалась в межах від 0 до 5 °С;
- концентрація поверхнево – активних речовин змінювалась в межах від 0 до 10 мл/літр;
- час змінювали в межах від 30 хвилин до 5 годин.

Встановлено, що об'ємні теплові джерела, які виникають усередині гідрату пропану під дією НВЧ випромінювання, у 1,5 рази більші ніж у воді та у 1,74 рази більші ніж у льоді та снігові. Для великих кількостей гідрату поглинання електромагнітного поля на частоті 2,4 ГГц становить 90%.

Порівняно результати експериментальних досліджень з математичним моделюванням дисоціації гідрату та підтверджено працездатність математичної моделі. Результати математичного моделювання процесу дисоціації гідрату метану у трубопроводі діаметром 100 мм показали, що

протягом 1–1,5 години можна усунути гідратну пробку довжиною до 1,5 м. Подальше підведення енергії випромінювача є малоефективним.

Запропонований метод оперативного усунення невеликих газогідратних пробок у сталевих газопроводах можна рекомендувати до застосування як самостійно, так і в комплексі з іншими заходами.

Ключові слова: газовий гідрат, синтез і дисоціації гідрату, НВЧ випромінювання, магнетрон, математична модель, статистичний аналіз.

SUMMARY

Abdullah N. Heat and mass transfer and hydrodynamics in gas-liquid dispersed media . - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty: 05.14.06 "Technical thermophysics and industrial heat power engineering". "Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, 2021.

Gas hydrates are the only non-productive source of natural gas on Earth that can compete with traditional fields. Significant potential gas resources in hydrated deposits will provide humanity with high-quality energy raw materials for a long time.

The author analyzes the previous experience:

- the mechanism of formation and decomposition of hydrates and it is established that the equilibrium parameters of formation and decomposition of hydrates in the slit space differ from the corresponding parameters in the free volume. The process of hydrate formation in the porous space is influenced by the composition of rocks, porosity, mineralization of formation water, curvature of the phase interface, which leads to hysteresis between the corresponding conditions and to their change relative to the conditions of hydrate formation in the free volume;

- methods of formation and decomposition of hydrates in pipelines and it is established that for the formation of hydrates it is necessary that the partial pressure of water vapor over the hydrate was higher than the elasticity of these vapors in the hydrate.

A laboratory setup was developed to determine the thermodynamic parameters of hydrate formation. With its help a number of field experiments were carried out at different initial parameters: the pressure was changed in the range from 0.1 to 0.6 MPa; the temperature varied from 273 to 278 K; the concentration of surfactants varied from 0 to 10 ml / liter; the time was varied from 30 minutes to 5 hours.

An installation for measuring the gas capacity of a gas hydrate was developed. As a result of the experiment it was found that the gas capacity varies (under given conditions) from 0 to 80 m³ / m³.

In order to study the process of hydrate dissociation under the influence of microwave electromagnetic radiation, a number of field experiments were performed, a mathematical model was developed and a number of studies were performed.

A number of field experiments were performed at different initial parameters:

- the pressure was varied in the range from 0 to 5 Atm;
- the temperature varied from 0 to 5 °C;
- the concentration of surfactants varied from 0 to 10 ml / liter;
- the time was varied from 30 minutes to 5 hours.

It was found that the volumetric heat sources that occur inside propane hydrate under the action of microwave radiation are 1.5 times larger than in water and 1.74 times larger than in ice and snow. For large amounts of hydrate, the absorption of the electromagnetic field at a frequency of 2.4 GHz is 90%.

The results of experimental researches with mathematical modeling of hydrate dissociation are compared and the efficiency of the mathematical model is confirmed. The results of mathematical modeling of the process of dissociation of methane hydrate in a pipeline with a diameter of 100 mm showed that within 1–1.5 hours it is possible to remove the hydrate plug up to 1.5 m long. Further energy supply of the emitter is inefficient.

The proposed method of surgical removal of small gas hydrate plugs in steel pipelines can be recommended for use both independently and in combination with other measures.

Key words: gas hydrate, synthesis and dissociation of hydrate, microwave radiation, magnetron, mathematical model, statistical analysis.