

ВІДГУК

офіційного опонента

доктора технічних наук, професора **Дешка Валерія Івановича**,
завідувача кафедри теплотехніки та енергозбереження Національного
технічного університету України «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»

на дисертаційну роботу Кутного Богдана Андрійовича «**Розвиток теорії тепломасообмінних процесів при кристалізації та дисоціації газових гідратів**», подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06 - технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

Актуальність обраної теми досліджень та зв'язок її з науковими програмами, планами і темами.

Розроблення газогідратних технологій залишається однією з актуальних задач, які потребують особливої уваги, враховуючи що світові запаси газогідратів на планеті за орієнтовними оцінками становлять не менше 250 трлн. м³, що робить їх одним найбільш перспективних альтернативних джерел енергії для людства. Україна також має доступ до газових гідратів у шельфі Чорного моря, де міститься 50–60 трлн. м³ метану.

Незважаючи на активні дослідження передових країн світу, які тривають останні десятиліття, розвиток газогідратних технологій відбувається порівняно повільно. Їх активному розвитку заважає відсутність теоретичної основи теплофізичних процесів, на яких ґрунтуються газогідратні технології. Існуюча проблема розроблення науково-практичних основ газогідратних технологій вимагає комплексного підходу до її вирішення з проведенням досліджень процесів тепломасообміну при кристалізації та дисоціації газових гідратів, вивчення спільного впливу різноманітних факторів, які інтенсифікують та сповільнюють ці процеси. Саме такі проблемні питання були досліджені в даній роботі.

Важливість даного напрямку досліджень підкреслює і те, що основні етапи роботи виконувались в рамках науково-дослідної роботи за держбюджетною темою «Дослідження впливу термодинамічних параметрів фазових переходів у системах із газовими гідратами на ефективність газогідратних технологій» (номер державної реєстрації 0115U002420) у 2015-2017 р., тематика якої відповідає обраному напрямку дисертації та проводилася у відповідності до енергетичної стратегії України на період до 2030р., схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 15.03.2006р. № 145-р, та енергетичної стратегії України на період до 2035 року (затверджена розпорядженням Кабінету Міністрів України 18 серпня 2017 р. №605-р).

З огляду на вищесказане, тематика дисертаційного дослідження Кутного Б.А., яка присвячена вирішенню проблеми розвитку газогідратних технологій є актуальною як в науковому, так і в прикладному плані.

Наукова новизна дослідження й отриманих результатів.

- Отримали подальший розвиток принципи моделювання теплообмінних та масообмінних процесів при кристалізації газогідратів з урахуванням

дифузійних процесів перенесення теплоти та енергії біля міжфазної поверхні осцилюючої газової бульбашки;

- Вперше експериментально визначено динамічні характеристики формування газогідратів на міжфазній поверхні в умовах введення додаткової енергії в область гідратоутворення;

- Вперше встановлено функціональний взаємозв'язок між термобаричними умовами та інтенсивністю масообміну на міжфазній поверхні в умовах гідратоутворення при підведенні додаткової акустичної енергії та електромагнітного випромінення;

- Вперше встановлено залежність газовмісту газового гідрату від теплофізичних параметрів, які діють в умовах його синтезу;

- Вперше розроблені моделі дисоціації газових гідратів при поверхневому підведенні теплоти з застосуванням критерію подібності стаціонарного теплообміну між газогідратом, як твердим тілом з постійнодіючими стоками теплоти, та навколишнім середовищем;

- З позицій теоретичної теплофізики розкрито і обґрунтовано механізм самоконсервації газогідратів, особливостями якого є охолодження глибинних шарів газогідратного масиву внаслідок часткової дисоціації;

- На основі дослідження поглинання багатомодового надвисокочастотного електромагнітного випромінення в газових гідратах вдосконалено метод руйнування газогідратних пробок в газопроводах.

Загальна характеристика дисертаційної роботи.

Представлена дисертаційна робота складається з вступу, восьми розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел і додатків.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми виконаної роботи, визначено мету та основні задачі досліджень, сформульовано наукову новизну і практичну цінність одержаних результатів, вказано дані про апробацію основних положень дисертації.

У **першому розділі** наведено аналіз сучасного стану наукової проблеми, яку автор досліджує у дисертації. Зокрема розглянуто питання стабільності газових гідратів, їх структуру, термобаричні умови існування та теплофізичні характеристики. Також проаналізовано технологічні схеми синтезу газових гідратів та окреслено шляхи інтенсифікації цього процесу. Вказано, що для дослідження тепло- і масообмінних процесів, які відбуваються при кристалізації та дисоціації газогідратів, необхідний комплексний підхід: розробка математичної моделі, встановлення фізичних закономірностей цих процесів шляхом проведення експериментальних досліджень, розробка та випробування обладнання для синтезу газових гідратів в умовах, що досліджуються. Також проаналізовано відомі дослідження процесів дисоціації газогідратів та окреслено шляхи наукових досліджень у цьому напрямку.

В цілому, матеріал, що викладений в цьому розділі, достатньо повний та відображає сучасний стан проблем, які розглядаються в роботі.

Другий розділ роботи присвячений створенню математичної моделі процесів кристалізації та дисоціації газогідратів на міжфазній поверхні газової бульбашки, які є невід'ємною складовою більшості технологічних процесів синтезу газових гідратів. Ключовою особливістю даної математичної моделі є використання дифузійних процесів для опису тепломасообміну біля міжфазної

поверхні газової бульбашки. Також математична модель враховує різноманітні фазовоперехідні процеси в газовій фазі та в рідині, які можуть виникати при застосуванні різних газів в широкому діапазоні термобаричних умов. Наведено авторські розробки: методику розрахунку, алгоритм та комп'ютерну програму для обчислень.

У **третьому розділі** автор виклав результати апробації математичної моделі на прикладі таких відомих фазовоперехідних процесів як кристалізація льоду та його танення. Для перевірки моделювання термодинамічних та осциляційних процесів автором застосована методика резонансного підсилення амплітуди коливань газових бульбашок. Представлено розроблений комплекс експериментального устаткування для дослідження явища резонансу газових бульбашок. На основі проведених досліджень доведена коректність математичного моделювання тепломасообмінних та фазовоперехідних процесів в газових бульбашках.

Особливої уваги заслуговує, отримана автором в процесі дослідження резонансних явищ, нова структура бульбашок – мультибульбашка. Її характерною особливістю є розташування усередині бульбашки розміром 3-5 мм великої кількості бульбашок розміром 50-70 мкм. Важливою перевагою такої структури є різке збільшення площі міжфазної поверхні, яке відіграє ключову роль в інтенсифікації багатьох технологічних процесів барботажного типу.

Четвертий розділ присвячений комплексним експериментальним дослідженням масообмінних процесів на міжфазній поверхні в умовах гідратуутворення. В розділі отримано експериментальне підтвердження положення про те, що утворення газогідратної кірки на міжфазній поверхні здатне у десятки разів сповільнити процес гідратуутворення. Показано, що застосування засобів руйнування цієї кірки та використання бульбашкових структур дозволяє різко активізувати процес синтезу газового гідрату. Отримано залежності для визначення питомої інтенсивності масообміну для різноманітних умов.

Для дослідження масообміну на міжфазній поверхні використані розроблені автором оригінальні за будовою і принципом дії лабораторні установки. Також досліджено механізм активізації гідратуутворення при застосуванні поверхнево-активних речовин.

У **п'ятому розділі** розглянуто вплив різноманітних факторів на утворення газових гідратів за допомогою математичного моделювання перехідних процесів в газових бульбашках.

Показано, що такий інтенсифікуючий фактор, як зниження початкової температури газу має обмеження внаслідок утворення льоду на міжфазній поверхні. Встановлено, що інтенсифікація гідратуутворення при зниженні температури води поступово зменшується внаслідок погіршення відведення теплоти від області реакції. З'ясовано комбінований характер впливу тиску газу на процес гідратуутворення, отримано кількісні характеристики впливу розміру бульбашок та типу газів на швидкість кристалізації газогідрату.

Шостий розділ роботи відображає результати розробки і практичної реалізації методів інтенсифікації гідратуутворення в апаратах барботажного типу. З'ясовано переваги щілястих насадок в збільшенні площі міжфазної поверхні та підвищення надійності в роботі масообмінних апаратів.

Проаналізовано різні шляхи відводу теплоти з міжфазної поверхні під час гідратуутворення. Запропоновано методику розрахунку барботажного апарату для синтезу газових гідратів.

Також автором розроблено безрозмірний коефіцієнт оптимізації синтезу газових гідратів для аналізу процесів та проектування технологічного обладнання, наведено його значення для різних вуглеводневих газів та показано застосування на прикладі дослідної установки.

Для дослідження синтезу газових гідратів автором зібрана та запатентована дослідна установка барботажного типу з щільною насадкою. Проведені експериментальні дослідження дозволили не лише встановити залежність газовмісту гідрату від термобаричних умов та інших факторів, але й напрацювати технологію отримання газогідрату високої якості. Максимальна швидкість гідратуутворення, отримана під час роботи барботажною установкою становить 78% від теоретичного значення, що за урахування впливу великої кількості збурюючих факторів, які не завжди піддаються урахуванню, можна вважати добрим результатом.

У **сьомому розділі** наведено результати дослідження дисоціації газогідратного масиву при поверхневому підведенні теплоти.

Для дослідження розподілу температур в газогідратному масиві автором розроблена дослідна установка, за допомогою якої, на основі експериментальних досліджень встановлено нелійність розподілу температур у глибині газогідратного масиву. Запропоновано застосування критерію дисоціації, який відображає подібність температурних полів біля поверхні та у глибині дисоціюючого газогідрату.

Особливо детально автор зупинився на дослідженні ефекту самоконсервації газогідратів. Дана оцінка впливу льодяної кірки на поверхні газогідратного масиву. Визначено теплофізичну основу ефекту самоконсервації та розроблено математичну модель дисоціації газогідратного масиву в умовах поверхневого підведення теплоти. Наведено результати розрахунку для гідрату метану та гідрату пропану.

Значну увагу автор приділив визначенню теплофізичних характеристик суміші гідрату та льоду, яка часто утворюється в установках синтезу газогідратів та в умовах поступової дисоціації. Отримані аналітичні залежності задовільно узгоджуються з результатами натурних експериментів, що доводить їх коректність.

Восьмий розділ дисертаційної роботи присвячено дослідженню впливу високочастотного електромагнітного випромінення на дисоціацію газових гідратів. Особливу увагу автор приділив застосуванню багатомодового електромагнітного випромінення для руйнування газогідратних пробок в металевих газопроводах.

За допомогою сконструйованої експериментальної установки автором проведено дослідження об'ємних джерел теплоти, які вникають в газогідраті під впливом багатомодового надвисокочастотного випромінення. Встановлено, що інтенсивність поглинання електромагнітного випромінення в газогідраті пропану на частоті 2,45 ГГц в 1,74 рази перевищує аналогічну величину для снігу та льоду. Визначений автором коефіцієнт корисної дії установки для дисоціації

газогідратів (90-92%) також вказує на перспективність застосування електромагнітного випромінювання для руйнування газогідратних пробок.

Дисертантом розроблено математичну модель руйнування газогідратної пробки в газопроводі в умовах дії електромагнітного випромінювання та виконано порівняння дисоціації газогідратного масиву при дії одномодового та двохмодового випромінювання. Аналіз отриманих результатів переконливо доводить перевагу багатомодового режиму транспортування електромагнітного випромінювання, порівняно з одномодовим.

У висновках викладені найбільш важливі наукові і практичні результати, одержані в дисертаційному дослідженні.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, їх достовірність і новизна.

Обґрунтованість представлених у дисертаційній роботі Кутного Б.А. наукових положень, висновків і рекомендацій полягає перш за все у комплексному підході до вирішення поставлених наукових задач, який включає використання експериментальних даних при розробці методів та побудові моделей. Наукові положення, висновки і рекомендації дисертаційної роботи ґрунтуються на всебічному аналізі отриманих результатів та використанні наукових положень сучасної теорії тепломасообмінних процесів. Враховуючи вищесказане, обґрунтованість викладених в роботі положень не викликає сумніву.

До найвагоміших науково-практичних результатів, отриманих в роботі, слід віднести:

- вперше розроблено математичну модель синтезу газових гідратів на поверхні осцилюючих газових бульбашок та показано, що процес синтезу газогідратів складається з періодів кристалізації та дисоціації;
- дана кількісна оцінка впливу газогідратної кірки, яка утворюється на міжфазній поверхні, на швидкість масообмінних процесів при гідратоутворенні;
- досліджено вплив термобаричних умов, концентрації поверхнево-активних речовин та інших факторів на газовміст отриманого газогідрату;
- розроблено методику розрахунку барботажного апарату для отримання газового гідрату та перевірено її в експериментальних умовах;
- досліджено резонансні явища газових бульбашок та отримано нову бульбашкову структуру, площа міжфазної поверхні якої у 40-60 разів перевищує площу одиночної бульбашки аналогічного розміру;
- вперше ефект самоконсервації газогідратів отримав пояснення на основі положень термодинаміки та технічної теплофізики;
- розроблена методика руйнування газогідратних пробок в газопроводах за допомогою багатомодового надвисокочастотного електромагнітного випромінювання.

Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих працях.

Матеріали дисертації достатньо повно викладені в 43 публікаціях (з них 14 одноосібних). В тому числі дві монографії, статей 30 (9 з них в закордонних виданнях), патентів України 2, а також у тезах конференцій. Всі вимоги положень ДАК МОН України щодо наукових публікацій витримано. Зміст

автореферату достатньо повно відображає зміст і результати дисертаційної роботи.

Зауваження до дисертації

1. У розділі 1.2 в таблиці 1.4 автором вказано критичні температури та тиски для газогідратів різних газів. Якщо для «важких» газів ці термобаричні умови дійсно мають місце, оскільки обмежуються скрапленням газу, то для метану гідратоутворення може відбуватися і при $+50^{\circ}\text{C}$, тобто таке поняття як критична температура гідратоутворення взагалі не характерне, що доводить рис.1.2-б.

2. На ст.63 (розділ 2.) автором наведено посилання на додаток А, в якому розглядається виведення рівняння Релея-Плессета. Насправді виведення цього рівняння наведено в додатку Б дисертаційної роботи.

3. На рисунках 3.1-3.6 розділу 3 у позначенні координатної осі написано «№ шару». Не зрозуміло чому автор не застосовує загальноприйнятних величин для визначення відстані чи товщини цього шару.

4. Формула 3.2. (ст.142) відображає залежність резонансної частоти бульбашки лише від її розміру. Варто було також врахувати вплив інших факторів: тиску, температури, виду газу, тощо.

5. Для «чистоти» експериментів з визначення масообміну при застосуванні мішалок (розділ 4.) варто було електродвигун винести за межі реактора. Це дозволило б уникнути додаткових теплонадходжень в зону реакції і розширити діапазон швидкостей та тривалості дії мішалок.

6. У різних розділах дисертаційної роботи автор широко застосовує такі поняття, як синтез, кристалізація та дисоціація газових гідратів. Як пов'язані між собою ці поняття?

7. Для розрахунку дисоціації газогідратного масиву (розділ 7) автор пропонує застосовувати три варіанти математичного моделювання: самоконсервації, танення льодяної кірки та інтенсивної дисоціації. Бажано було б навести їх область застосування, наприклад від поверхневого теплового потоку чи розробленого автором критерія дисоціації.

8. Автором запропонована формула для розрахунку теплообміну при дисоціації газових гідратів безпосередньо в глибинному масиві, але при цьому не враховується щільність (порозність) порід.

9. Оскільки кристалізація газогідратів є фізико-хімічним екзотермічним процесом, автору варто було детальніше зупинитися на аналізі його рушійних сил в тепломасообмінних процесах.

10. Матеріали дисертації, як зазначалося, достатньо повно викладені в 43 публікаціях (з них 14 одноосібних), але деякі з них, а саме №№ 13, 14, 16, 18, 20 зі списку публікацій автора, на мою думку, мають до теми дисертації достатньо опосередкований характер.

Наведені зауваження по суті не впливають на загальні висновки, наукову новизну і практичну цінність дисертаційного дослідження.

Загальний висновок

Представлені в дисертаційній роботі нові науково підтвержені результати дозволяють зробити обґрунтований висновок, що вони, в сукупності, складають вагомий внесок в розвиток науки про тепломасообмінні

та фазовоперехідні процеси і ефективно дозволяють вирішувати важливу науково-прикладну проблему підвищення ефективності газогідратних технологій.

Дисертаційна робота Б.А. Кутного відповідає вимогам, що висуваються до докторських дисертацій згідно з пп. 9, 10, 12 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567.

У зв'язку з вищенаведеним вважаю, що дисертація за актуальністю, новизною теоретичних та експериментальних результатів, високим рівнем проведених досліджень відповідає паспорту спеціальності 05.14.06 - технічна теплофізика та промислова теплоенергетика та вимогам пунктів 9, 10 «Порядку присудження наукових ступенів» до докторських дисертацій, а її автор Кутний Богдан Андрійович заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06 - технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

Офіційний опонент,
завідувач кафедри теплотехніки та енергозбереження
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»
д.т.н., професор



Валерій ДЕШКО

Підпис д. т. н., проф. Дешка В. І. засвідчую

Вчений секретар Національного
технічного університету України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»



Валерія ХОЛЯВКО