

ВІДГУК

офиційного опонента на дисертаційну роботу Кутного Богдана Андрійовича на тему «Розвиток теорії тепломасообмінних процесів при кристалізації та дисоціації газових гідратів», подану до захисту у спеціалізовану вчену раду Д 64.180.02 Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України 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

Подальший розвиток таких газогідратних технологій, які застосовуються для: уловлення шахтного метану, зберігання і транспортування газу, акумулювання теплоти, видобування газу з газогідратних покладів, фракційний поділ газових сумішей та багато інших, потребує розвитку сучасних підходів, які дозволяли б досягти інтенсифікації тепломасообмінних процесів.

Загальною проблемою є визначення механізму кристалізації газогідратів на міжфазній поверхні в умовах динамічної зміни розміру газових бульбашок, які широко застосовуються в різноманітних газогідратних технологіях. Вирішення цих задач суттєво стримується відсутністю теплофізичної основи процесів кристалізації та дисоціації газових гідратів в конкретних технологічних процесах.

Дисертаційна робота виконана відповідно 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). Дослідження виконані в межах держбюджетної теми «Дослідження впливу термодинамічних параметрів фазових переходів у системах із газовими гідратами на ефективність газогідратних технологій» (номер державної реєстрації 0115U002420), у якій дисертант був виконавцем у 2015-2017 р.

Із урахуванням викладеного можна зробити висновок, що дисертаційна робота де розроблено науково-практичні основи підвищення ефективності технологій синтезу та дисоціації газових гідратів, які вже застосовуються або є перспективними для газової промисловості України, є актуальною.

Наукова новизна досліджень й отриманих результатів

Автором детально розроблено процеси теплообміну та масообміну, які відбуваються при кристалізації та дисоціації газових гідратів на міжфазній

детально продуманою програмою досліджень та їх статистичною обробкою із

поверхні осцилюючої газової бульбашки. Встановлено ступінь впливу різноманітних параметрів на швидкість гідратоутворення.

В результаті експериментальних досліджень масообмінних процесів біля міжфазної поверхні в умовах гідратоутворення встановлено ключову роль газогідратної кірки в сповільненні масообмінних процесів та визначено шляхи інтенсифікації гідратоутворення, що має важливе значення для технології синтезу газових гідратів.

Теоретичні та експериментальні дослідження резонансних коливань газових бульбашок дозволили розвинути уявлення про теплофізичні процеси та відкрити новий напрямок їх інтенсифікації у барботажних апаратах.

На основі експериментальних досліджень автором встановлено комплексний вплив теплофізичних параметрів та концентрації поверхнево-активних речовин на газовміст синтезованого газогідрату, що дозволяє прогнозувати його чисельні значення в технологічних процесах.

Вперше встановлено розподіл температур у приповерхневому шарі гідрату, який дисоціює у нерівноважних умовах, що дозволило отримати функціональні залежності для розрахунку інтенсивності дисоціації газового гідрату та запропонувати застосування критерію подібності стаціонарного теплообміну між газогідратом, як твердим тілом з постійнодіючими стоками теплоти та навколошнім середовищем.

Встановлено, що при підвищенні температури газогідратного масиву вище рівноважної починається поступова дисоціації газогідрату, яка супроводжується поглинанням теплоти і зниженням температури масиву. Якщо потужності стоків теплоти вистачає – спостерігається явище самоконсервації, якщо ні – дія механізму дисоціації триває. Запропоновано методику визначення умов переходу гідрату в режим самоконсервації, що дозволяє проектувати склади для зберігання газових гідратів в нерівноважних умовах.

Викликають певний інтерес дослідження дисоціації газогідратів під впливом багатомодового надвисокочастотного електромагнітного випромінення та розробка на цій основі методології підвищення ефективності руйнування газогідратних пробок в трубопроводах.

Ступень обґрутованості та достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій дисертаційної роботи

Наукові положення, висновки та рекомендації є наслідком різnobічних наукових досліджень, виконаних автором при вирішенні завдань, які поставлені в роботі. Достовірність отриманих теоретичних та практичних розробок визначається використанням сучасних методів дослідження, значним обсягом і детально продуманою програмою досліджень та їх статистичною обробкою із

застосуванням математичних методів аналізу результатів. Результати дослідження та наукові положення дисертації достатньо повно представлені в публікаціях у фахових виданнях. Дослідження проведено на достатньому сучасному рівні. Отримані результати і висновки не викликають сумніву.

Структура, зміст й оформлення дисертації

Дисертаційна робота виконана у вигляді рукопису, що має 427 сторінок тексту; з них 129 рисунків, 21 таблиця, 59 сторінок додатків та складається з вступу, восьми розділів, списку використаних джерел з 309 найменувань.

Основна частина дисертаційної роботи побудована у наступній послідовності.

У *першому розділі* дисертації проведено аналіз літературних джерел за темою дисертаційної роботи та обґрунтовано завдання дослідження.

Зокрема, розглянуто питання структурної стабільності газових гідратів та зроблено висновок, що різна кількість газу у дослідах з синтезу ГГ зумовлена домішками льоду. Показано, що більшість авторів відомих теорій самоконсервації газогідратів не пов'язують цей процес з фазовими діаграмами газогідратів. Висунуто гіпотезу, що поступова дисоціація газогідратів при від'ємних температурах може відігравати ключову роль в ефекті самоконсервації.

Розглянуто відомі технологічні схеми синтезу газових гідратів, визначено їх переваги та недоліки. Окреслено шляхи інтенсифікації процесу синтезу ГГ та проведено аналіз способів відведення теплоти з зони реакції. Встановлено, що для оптимізації процесу гідратоутворення потрібно детально розглянути тепло- і масообмінні процеси на міжфазній поверхні газових бульбашок.

Виконано аналіз складових відомих математичних моделей, які описують рух та термодинамічні параметри газових бульбашок. Встановлено, що для моделювання процесу гідратоутворення на міжфазній поверхні бульбашки газу необхідно враховувати температурний режим стінки бульбашки та дифузійні процеси біля міжфазної поверхні.

Обґрунтовано необхідність теоретичних та експериментальних досліджень впливу зовнішніх чинників на гідратоутворення з урахуванням структурної зміни поверхневого шару.

У *другому розділі* дисертаційної роботи наведено, розроблену автором математичну модель синтезу газових гідратів на міжфазній поверхні газової бульбашки. Модель призначено для визначення кінематичних, динамічних і енергетичних характеристик газових бульбашок в процесах кристалізації та дисоціації газогідратів.

Особливу увагу приділено автором урахуванню дифузії газу для опису тепломасообмінних процесів біля міжфазної поверхні бульбашки, тепловим та фазоперехідним процесам у прилеглих до бульбашки шарах рідини, урахуванню можливості скраплення «важких» газів метанового ряду.

Автором розроблено методику розрахунку, алгоритм та комп’ютерну програму для вирішення даної математичної моделі.

У третьому розділі розглянуто питання апробації математичної моделі та проведено теоретичні та експериментальні дослідження резонансу газової бульбашки.

Моделювання відомих фазоперехідних процесів на поверхні бульбашки у випадках її охолодження та нагрівання, стиснення та розширення показало повну відповідність існуючим уявленням про теплофізичну основу даних процесів.

Для перевірки моделювання швидкозатухаючих осциляційних процесів газової бульбашки автором була застосована оригінальна методика підсилення цих коливань за допомогою створення резонансу, який виникає внаслідок зовнішнього підведення енергії акустичних коливань. Для експериментальної перевірки розрахункових даних створена дослідна установка. За допомогою цієї установки була визначена частота осциляцій бульбашок, виконано запис відео, аудіо та фотофіксація осциляційних процесів. Аналіз отриманих результатів підтверджує коректність роботи математичної моделі.

Велику увагу в цьому розділі приділено дослідженням хронологічної послідовності процесів, що відбуваються при осциляційних коливаннях бульбашки та теплофізичним характеристикам її газового середовища.

Особливо варто відмітити отримання автором нової структури бульбашки-мультибульбашку, яка утворюється під час резонансних коливань і супроводжується поділом початкової бульбашки великого розміру на велику кількість бульбашок розміром 70-100 мкм. Встановлено, що площа міжфазної поверхні такої бульбашки може збільшуватися в 40-60 разів, що можна застосовувати для інтенсифікації різноманітних тепло- і масообмінних процесів в барботажних апаратах.

У четвертому розділі дисертаційної роботи представлено результати експериментальних досліджень масообмінних процесів на міжфазній поверхні в умовах гідратоутворення.

Для виконання таких досліджень автором розроблена експериментальна установка, детально описана в дисертаційній роботі. Численні досліди проведено як для нерухомої міжфазної поверхні, так і в умовах дії повільних та швидкісних мішалок. Аналіз отриманих даних дозволив визначити

апроксимаційні залежності зміни інтенсивності масообміну з часом для різноманітних умов. Отримано кількісні оцінки сповільнення масообміну в умовах кристалізації газогідрату на міжфазній поверхні. Встановлено, що визначальний вплив на це явище має газогідратна кірка, яка утворюється на міжфазній поверхні і різко погіршує надходження молекул газу до поверхні кристалізації.

Доведено можливість інтенсифікації масообміну при кристалізації газогідратів шляхом руйнування газогідратної кірки, наприклад при застосуванні бульбашкових структур. Встановлено, що головним механізмом активації масообміну при застосуванні поверхнево активних речовин є збільшення тривалості існування малих бульбашок газу у воді.

П'ятий *розділ* роботи присвячено дослідженю впливу різноманітних факторів на швидкість утворення газових гідратів. Зокрема розглянуто вплив температури газу, температури рідини, тиску в системі «рідина-газ», розміру бульбашок, концентрації поверхнево активних речовин та складу газу.

Встановлено, що існує два періоди гідратоутворення, які зумовлені різними теплообмінними процесами. Перший період, зумовлений нагріванням газу в бульбашці, характеризується високою швидкістю гідратоутворення, проте має малу тривалість. Після нього спостерігається період відносно повільного гідратоутворення, який відбувається внаслідок відтоку теплоти з міжфазної поверхні в глиб рідини.

Показано особливості впливу температури газу на швидкість кристалізації газогідрату, зокрема встановлено, що інтенсифікація гідратоутворення при зниженні температури газу має свою межу, яка зумовлена утворенням льоду на міжфазній поверхні. Встановлено, що підвищення тиску активізує одразу два періоди гідратоутворення і тому є важливим інтенсифіуючим фактором.

Аналіз впливу розміру бульбашок на швидкість гідратоутворення показав необхідність застосування бульбашок мінімального розміру, які мають максимальну сумарну міжфазну поверхню. Встановлена роль поверхнево-активних речовин в механізмі інтенсифікації гідратоутворення. Визначена залежність швидкості кристалізації газогідратів від виду газу-гідратоутворювача.

У *шостому* *розділі* дисертації викладені прикладні основи проектування барботажних апаратів для синтезу газових гідратів та наведено результати експериментальних досліджень роботи такого апарату.

Для оптимізації процесів синтезу газових гідратів на міжфазній поверхні автором запропоновано безрозмірний коефіцієнт, який відображає ідеальне

співвідношення між теплообмінними і масообмінними процесами, які відбуваються при кристалізації газових гідратів. Цей коефіцієнт дозволяє на стадії проектування обирати оптимальні термобаричні умови залежно від конструктивних особливостей технологічного апарату.

Автором розроблена, запатентована та зібрана барботажна установка для отримання гідрату пропану. В ході проведення експериментальних досліджень була доведена можливість кристалізації газогідрату з високим газовмістом. Отримано важливу інформацію про хід процесу гідратоутворення на різних стадіях. Досліджено вплив термобаричних умов, часу проведення реакції та вплив концентрації поверхнево активних речовин на газовміст отриманого гідрату. Порівняння результатів розрахунку швидкості гідратоутворення з фактичними значеннями показало добре співпадіння результатів.

Сьомий розділ дисертації присвячено дослідженню процесів дисоціації газогідратного масиву в умовах поверхневого підведення теплоти.

Для визначення температурного режиму газогідратного масиву автором розроблена і зібрана дослідна установка, схему і принцип дії якої наведено в дисертаційній роботі. На основі результатів експериментальних досліджень встановлено аналітичні залежності для визначення розподілу температур та питомих стоків теплоти у газогідратному масиві. Розроблено математичну модель дисоціації газогідрату при поверхневому підведенні теплоти.

Для опису подібності температурних полів біля поверхні та у глибині дисоціюючого газогідрату автором запропоновано критерій дисоціації та розраховано його типові значення для газогідратів різних газів.

Встановлено, що головною причиною самоконсервації газогідратів в нерівноважних умовах є охолодження внутрішніх шарів газогідратного масиву внаслідок його часткової дисоціації. Визначено розрахункові залежності для опису теплових процесів при самоконсервації газогідратів. Досліджено вплив початкової концентрації газових гідратів на його теплотехнічні характеристики. Показано практичне застосування отриманих залежностей для проектування гідратосховищ.

У *восьмому розділі* дисертаційної роботи досліджено вплив багатомодового надвисокочастотного електромагнітного випромінення на процес дисоціації газових гідратів та запропоновано практичне застосування даного явища для руйнування газогідратних пробок в газопроводах.

Проаналізовано відомі способи руйнування газогідратних пробок в газопроводах і зокрема, метод застосування надвисокочастотного випромінення в 1-но модовому режимі. Зроблено висновок про можливість збільшення

потужності надвисокочастотного електромагнітного випромінення за рахунок застосування багатомодового режиму його транспортування по газопроводам.

На розробленій установці виконано дослідження впливу багатомодового режиму електромагнітних хвиль на процес дисоціації гідрату пропану. Встановлено, що об'ємні теплові джерела які виникають усередині гідрату пропану під дією надвисокочастотного випромінення у 1,74 рази більші ніж у льоді та снігові. Також суттєво більшим є ККД використання енергії, підведеної до магнетрона.

Розроблено математичну модель дисоціації газогідратних пробок за допомогою багатомодового надвисокочастотного випромінення, в основі якого рівняння тепlopровідності Фур'є в циліндричній системі координат з джерелами та стоками теплоти. Результати порівняння 1-но та 2-х модового режимів застосування електромагнітних хвиль для руйнування газогідратної пробки в однакових умовах показало, що запропонований варіант приблизно у 1,5 рази ефективніший за 1-но модовий.

Основні наукові положення і висновки дисертації

Значимим для науки є те, що автором для вирішення важливої науково-технічної проблеми підвищення ефективності кристалізації та дисоціації газових гідратів, використано комплексний підхід, який дозволив на основі теоретичних і експериментальних досліджень визначити вплив чинників на інтенсивність тепломасообмінних процесів на міжфазній поверхні.

Такий підхід забезпечив отримання наступних практичних результатів. Розроблена методологія урахування дифузійних процесів перенесення маси та енергії біля міжфазної поверхні газової бульбашки в умовах кристалізації газогідратів, що дозволяє розраховувати технологічні режими їх синтезу.

Експериментальним шляхом доведено ключову роль газогідратної кірки, яка утворюється на міжфазній поверхні, в сповільненні масообмінних процесів під час гідратоутворення. З метою інтенсифікації процесу гідратоутворення автором виконано дослідження різноманітних засобів руйнування цієї плівки та встановлено, що найбільшої інтенсифікації можна досягти застосовуючи ефект осциляцій газових бульбашок.

Наведені автором результати теоретичних та експериментальних досліджень резонансних явищ в газових бульбашках показують можливість значного (в 40-60 разів) збільшення площині міжфазної поверхні газових бульбашок. Практичне застосування цієї технології може суттєво прискорити тепломасообмінні процеси в різноманітних барботажних апаратах.

Запропонована методика теплотехнічного розрахунку барботажного апарату для синтезу газових гідратів. На основі аналізу численних дослідних

даних встановлено комплексний вплив термобаричних умов та концентрації поверхнево-активних речовин на газовміст синтезованого газогідрату.

Автором розроблено теплофізичні основи механізму дисоціації газових гідратів, та встановлено причину ефекту самоконсервації, який відіграє ключову роль в транспортуванні та зберіганні газових гідратів у нерівноважних умовах.

Значний практичний інтерес мають дослідження дисоціації газогідрату під впливом багатомодового надвисокочастотного електромагнітного випромінення. Їх практичне застосування для руйнування газогідратних відкладень в газопроводах та іншому обладнанні дозволяє щонайменше в 1,5 рази підвищити інтенсивність дисоціації газогідрату.

Зміст дисертації та її завершеність в цілому

Дисертація містить вісім розділів, загальні висновки, список використаних джерел, додатки. Робота викладена технічно-грамотною і зрозумілою мовою з фотографіями, графіками, схемами і рисунками, які підтверджують вирішення поставлених завдань. Оцінюючи викладення матеріалу можна зробити висновок, що всі поставлені завдання в першому розділі дисертації вирішенні в наступних розділах і знайшли повне відображення в висновках. За обсягом виконаних досліджень роботу можна вважати завершеною, яка має наукову новизну та практичну значимість.

Зміст автореферату дисертації відповідає змісту дисертації.

Повнота викладення основних результатів дисертаційної роботи у опублікованих наукових роботах

Основні наукові розробки та досягнення, зроблені здобувачем в ході роботи над дисертацією, достатньо повно представлені в опублікованих у спеціалізованих виданнях наукових працях. За темою дисертаційної роботи надруковано 43 праці (з них 14 самостійних), зокрема монографій – 2, статей – 30 (9 в зарубіжних виданнях), 2-х патентів України та тез конференцій. Результати роботи доповідалися і пройшли обговорення на девяти міжнародних конференціях.

Матеріали кандидатської дисертації автора "Регулювання відпуску теплоти в централізованих системах тепlopостачання в період «зрізки» температурного графіка" за спеціальністю 05.23.03 – вентиляція, освітлення та теплогазопостачання не використовувалися при написанні цієї докторської дисертаційної роботи.

Зауваження по дисертаційній роботі

За змістом дисертаційної роботи слід зробити такі зауваження:

1. У розділі "Перелік умовних позначень" ст.28 не вказана одиниця вимірювання величини концентрації "С".

2. У розділі 1.1 дисертації автором було приділено занадто багато уваги аналізу структур газогідратів ГС-ІІ та ТС-І, які не характерні для газів метанового ряду.

3. В дисертаційній роботі подекуди автор застосовує одиниці вимірювання величин, які не характерні для системи СІ, наприклад бари (ст.48, 49).

4. Запропонована автором математична модель (розділ 2) передбачає можливість конденсації у середині газової фази. Яке відношення це має до гідратоутворення?

5. Основну увагу при досліженні тепломасообміну автор приділяє процесу для одиночної бульбашки (розділ 3). Однак не висвітлено питання як отримані залежності трансформуються при русі колективу бульбашок в двофазному потоці, при їх взаємному впливі одна на одну.

6. Автор практично не наводить термобаричних параметрів так званих «невдалих» дослідів, (4-й розділ, ст. 171) при яких газогідрат утворюється не лише практично миттєво (!), але ще й у сухому вигляді «сніжинок». Можливо їх можна розглядати навпаки, як «вдалі» для створення технології отримання газогідратів.

7. У розділі 5 подекуди автор застосовує одиниці вимірювання тиску бари, які не характерні для системи СІ, (ст. 207, 208, 209, 212).

8. У розділі 6 автором виконано дослідження впливу окремих факторів на процес гідратоутворення. Також варто було провести дослідження комплексного впливу різних параметрів для досягнення максимально ефективного результату в процесах гідратоутворення.

9. У розділі 7 бажано було б детальніше зупинитися на існуючих теоріях самоконсервації газових гідратів і пояснити чим власне вони нас не влаштовують.

10. В роботі (розділ 8) не представлено економічні переваги запропонованого автором способу руйнування газогідратних пробок за допомогою НВЧ ЕМ випромінення у порівнянні з відомими, наприклад з обігрівом газопроводу гарячою водою.

Проте, зазначені зауваження та пропозиції мають рекомендаційний характер і не впливають на загальну позитивну оцінку дисертації.

Загальний висновок по дисертаційній роботі

Дисертаційна робота «Розвиток теорії тепломасообмінних процесів при кристалізації та дисоціації газових гідратів» є закінченою науково-дослідною

працею, що містить вирішення важливої науково-технічної проблеми розроблення наукових основ тепломасообмінних процесів на яких ґрунтуються більшість газогідратних технологій.

Зміст роботи відповідає паспорту спеціальності 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

Дисертаційна робота Кутного Богдана Андрійовича «Розвиток теорії тепломасообмінних процесів при кристалізації та дисоціації газових гідратів» відповідає кваліфікаційним вимогам ДАК МОН України щодо докторських дисертацій (п. 9, 10, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України №567 від 24.07.2013 р.) за спеціальністю 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика, а її автор заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук.

Доктор технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут» Національної академії наук України

Кутовий В. О.

ЗАСВІДЧУЮ
Учений секретар
ННЦ ХФТі

до 2035 року (затверджено Ученім секретарем
ННЦ ХФТІ  
серпня 2017 р. №60-р) 07 09 2021 Р.

«Дослідження впливу термодинамічних параметрів
системах із газовими гідратами на ефективність газогідратних технологій»
(номер державної реєстрації 0115U002420), у який дисертант був виконавцем у
2015-2017 р.