

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА
доктора технічних наук, професора
ГАНЖІ Антона Миколайовича
на дисертацію КУТНОГО Богдана Андрійовича
«Розвиток теорії тепломасообмінних процесів при кристалізації та
дисоціації газових гідратів»,
представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова
теплоенергетика

Актуальність теми дослідження. Дисертаційне дослідження Кутного Богдана Андрійовича стосується актуальних питань створення енергозберігаючих газогідратних технологій. Газові гідрати розглядаються як одне з найбільш перспективних альтернативних джерел енергії світового рівня. Відповідно до цього одним із пріоритетних завдань європейські держави вважають дослідження способів отримання газу, його транспортування та зберігання у газогідратній формі. Над завданням розробки газогідратних технологій впродовж остатніх кількох десятиліть працюють зарубіжні та вітчизняні дослідники, проте найбільшого успіху на даний час вдалося досягти лише японським вченим, якими реалізовано проект використання газових гідратів у невеликому масштабі. Україна також має доступ до ГГ у шельфі Чорного моря, де міститься 50–60 трлн. м³ цього газу.

Разом з тим високі запити суспільства вимагають прискорення розвитку газогідратних технологій. Однак, практично відсутні дослідження, які б могли стати теоретичною основою розбудови ефективних газогідратних технологій.

Зважаючи на окреслене, дисертаційне дослідження Кутного Б.А., в якому вирішується завдання дослідження теплообмінних та масообмінних процесів при кристалізації та дисоціації газогідратів, є актуальним та своєчасним.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Вагомість дослідження підтверджена тим, що воно виконувалося в рамках науково-дослідної теми: «Дослідження впливу термодинамічних параметрів фазових переходів у системах із газовими гідратами на ефективність газогідратних технологій» (2017-2019рр., державний реєстраційний номер №0115U002420). 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).

Об'єктом дослідження є процеси синтезу та дисоціації газових гідратів, предметом – тепломасообмінні, фазовоперехідні та гідродинамічні процеси, які відбуваються під час синтезу та дисоціації газових гідратів. Їх формулування не викликає заперечень.

Достовірність та обґрунтованість наукових положень, висновків і результатів дисертації Кутного Б.А. забезпечується коректним застосуванням комплексу сучасних наукових підходів і методів досліджень, детально продуманою постановкою експериментів та їх статистичною обробкою. Рукопис дисертації написаний з використанням фахової термінології. Для тексту характерна цілісність і смислове завершеність. Отримані результати і висновки не викликають сумніву.

Вірогідність одержаних результатів, повнота їх викладу в опублікованих працях. У дисертації Кутного Б.А. вірогідність результатів досліджень підтверджена як кількістю виконаних експериментальних досліджень, так і наглядним матеріалом у вигляді рисунків і таблиць, а також статистичним аналізом отриманих даних.

Основні результати дисертаційних досліджень достатньо повно викладено в опублікованих 43 друкованих працях, в тому числі 21 статті у провідних фахових журналах та збірниках наукових праць, 2-х монографіях, 2-х авторських свідоцтвах, 9 публікаціях у матеріалах і тезах міжнародних конференцій.

Наукова новизна дослідження полягає в тому, що в дисертації вперше розроблено теплофізичну основу процесів кристалізації та дисоціації газових гідратів на міжфазній поверхні. Дисертантом удосконалено методику застосування надвисокочастотного випромінення для руйнування газогідратних пробок в газопроводах; виявлено теплофізичну основу ефекту самоконсервації газогідратів.

В дисертації досягнуто такі основні наукові результати:

- створено методику оцінки термодинамічних та тепломасообмінних параметрів одночної газової бульбашки в умовах гідратоутворення, що дозволило розробити коефіцієнт оптимізації синтезу газогідратів;
- визначено тепломасообмінні характеристики динаміки формування газових гідратів на міжфазній поверхні шляхом дифузії та при введенні додаткової енергії в зону гідратоутворення;
- встановлено функціональний взаємоз'язок між інтенсивністю дифузійних процесів на міжфазній поверхні газ-рідина та температурами і тисками в контактуючих середовищах з урахуванням гідродинамічних процесів на межі поділу фаз;
- встановлено комплексний вплив теплофізичних параметрів та концентрації поверхнево-активних речовин на газовміст синтезованого

газогідрату, що дозволяє прогнозувати його чисельні значення в технологічних процесах;

- отримано функціональні залежності для розрахунку інтенсивності дисоціації газового гідрату та запропоновано застосування критерію подібності стаціонарного теплообміну між газогідратом, як твердим тілом з постійнодіючими стоками теплоти та навколошнім середовищем;

- розроблено теорію дисоціації газогідратного масиву при поверхневому підведенні теплоти, яка дозволила пояснити ефект самоконсервації газогідратів;

- обґрунтовано концептуальні засади дисоціації газогідратного масиву під дією багатомодового надвисокочастотного електромагнітного випромінення.

Значущість висновків здобувача для науки і практики полягає в тому, що створено теоретичне підґрунтя для розвитку технологій. Які базуються на процесах синтезу та дисоціації газових гідратів.

Як позитивний момент варто підкреслити високий рівень практичного впровадження результатів досліджень, зокрема основні положення та висновки дисертаційної роботи Кутного Б.А. реалізовано в Полтавському відділенні бурових робіт Укрбургазу, у наукових розробках Полтавської гравіметричної обсерваторії інституту геофізики імені С. І. Субботіна НАН України, а також в навчальному процесі кафедри будівництва та енергоекспективних споруд Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу та кафедри теплогазопостачання, вентиляції та теплоенергетики Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка.

Обсяг і структура дисертації. Дисертація має чітку, логічно побудовану структуру, що складається зі вступу, 8 розділів, висновків до кожного розділу, загальних висновків, списку використаних джерел, 129 рисунків, 10 додатків. Загальний обсяг дисертації – 427 сторінок, з яких основна частина тексту складає 264 сторінки (11 авт. арк.), що відповідає вимогам до докторських дисертацій.

У вступі автор дисертаційного дослідження обґрунтував актуальність теми дисертації, окреслив мету, завдання, предмет та об'єкт дослідження, визначив наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, навів дані про зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами; охарактеризував методи дослідження, навів відомості про апробацію результатів дисертації.

У першому розділі дисертації (с. 39-97) проаналізовано сучасний стан досліджень в області тепло- і масообміну в газогідратних технологіях.

Дисертантом проаналізовано питання стабільності газових гідратів, їх структури, термодинамічні характеристики, термобаричні умови існування. Представлено погляди ряду західних та вітчизняних науковців щодо кінетики

процесів гідратоутворення. Розглянуто відомі технологічні схеми синтезу газових гідратів, визначено їх переваги та недоліки.

Слід звернути увагу, що значну частину опрацьованих Кутним Б.А. наукових праць, складають дослідження вчених провідних країн світу, а також матеріали конференцій за участі провідних фахівців даної галузі. На підставі здійсненого аналізу наукових джерел Кутний Б.А. виокремлює головні напрямки подальших наукових досліджень.

У п'ятому підпункті першого розділу дисертант детально проаналізував складові математичного моделювання процесів синтезу газових гідратів та цілком аргументовано довів доцільність застосування комплексу наукових методів для досягнення конкретних цілей та розв'язання дослідницьких завдань.

Другий розділ дисертації (с. 98-131) присвячено моделюванню процесів синтезу ГГ на міжфазній поверхні одиничної газової бульбашки. Розробку математичної моделі динаміки одиничної бульбашки проведено з урахуванням визначального впливу кінетики нерівноважних термодинамічних процесів на поведінку газової бульбашки.

Слід також відзначити, що дисертантом приділено значну увагу врахуванню впливу гідродинамічних, термодинамічних, тепло- і масообмінних процесів як на міжфазній поверхні, так і в газовій фазі, які відбуваються при гідратоутворенні в газовій бульбашці. Розроблена автором математична модель передбачає цілий ряд можливих фазовопереходів процесів, які можуть мати місце в різних термобаричних умовах для різних газів: кристалізація і дисоціація газогідратів, утворення і танення льоду, скраплення і випаровування газу.

Для її розв'язання розроблено методику розрахунку, алгоритм та комп'ютерну програму. Для ефективного використання, математичну модель доповнено емпіричними формулами які характеризують залежність теплофізичних параметрів рідини, газу і пари від температури.

У третьому розділі дисертації (с. 132-156) виконано апробацію математичної моделі не лише шляхом порівняння з відомими фазовопереходними процесами, але й шляхом підсилення амплітуди коливань бульбашок, яке дозволило зафіксувати ці коливання інструментальними засобами. Для виконання цих досліджень дисертантом була розроблена відповідна експериментальна установка.

До важливих наукових результатів Кутного Б.А. у цьому розділі слід віднести дослідження резонансних явищ у газових бульбашках та аналіз термодинамічних процесів всередині осцилюючої бульбашки з урахуванням процесів гідратоутворення, що відбуваються в хронологічному порядку.

Також заслуговує уваги отримання автором нової бульбашкової структури – мультибульбашки, яка виникає внаслідок явища резонансу. Опираючись на експериментальні дослідження автор доводить, що використання мультимульбашок дозволить у 40-60 разів збільшити площу міжфазної поверхні. Такі результати, разом з малими витратами енергії на створення цієї структури, мають важливе практичне значення для інтенсифікації тепломасообмінних процесів в різних технологіях.

Четвертий розділ дисертації (с. 157-193) містить результати експериментальних досліджень масообмінних процесів біля міжфазної поверхні в умовах гідратоутворення. Слід відзначити розроблену автором дослідну установку для визначення інтенсивності масообміну біля міжфазної поверхні в контролюваних термобаричних умовах, яка дозволила провести ряд важливих експериментальних досліджень та отримати кількісні характеристики процесу гідратоутворення.

Отримані результати переконливо доводять, утворена поверхні газогідратна кірка відіграє важливу роль у сповільненні процесів гідратоутворення, а її руйнування призводить до інтенсифікації процесу в десятки разів. Також автором досліджено вплив повільних та швидкісних мішалок на процес гідратоутворення та зроблено висновок про важливість застосування газових бульбашок для інтенсифікації синтезу газогідратів.

У **п'ятому розділі** дисертації (с. 194-235) досліджено впливу різноманітних факторів на швидкість утворення газових гідратів. Автором проаналізовано вплив таких параметрів, як: тиск і температура газу, його вид, температура рідини, розміри газових бульбашок, вплив поверхнево-активних речовин.

Встановлено, що зниження температури газу дозволяє суттєво інтенсифікувати процес синтезу газових гідратів, проте має свою межу внаслідок утворення льоду на міжфазній поверхні. Визначено товщину газогідратної кірки, яка утворюється на поверхні газової бульбашки. Досліджено механізм інтенсифікації гідратоутворення при додаванні у рідину поверхнево-активних речовин, та встановлено, що головну роль у цьому процесі відіграє збільшення площі міжфазної поверхні, яке відбувається внаслідок збільшення часу існування бульбашок розміром менше 1 мм.

Порівняння інтенсивності гідратоутворення різних вуглеводневих газів переконливо доводить подібність цих процесів та можливість застосування дослідних даних, які отримано на «важких» вуглеводнях (напр. пропан) для прогнозування гідратоутворюючих процесів при застосуванні метану. Це дозволяє значно спростити дослідне обладнання та підвищити рівень безпеки при дослідженні стиснених горючих газів.

Шостий розділ дисертації (с. 236-277) присвячено реалізації процесів гідратоутворення в барботажних установках. Автором проаналізовано теплообмінні процеси на зовнішній, внутрішній поверхні та в газовому середовищі бульбашок різного розміру, розглянуто масообмінні процеси між газом і рідиною.

Особливо слід відмітити запропонований автором коефіцієнт оптимізації синтезу газових гідратів, який дозволяє на стадії проектування визначити найкращі умови для здійснення процесу гідратоутворення.

Для перевірки отриманих залежностей автором була розроблена, запатентована і змонтована дослідна барботажна установка з щільстою насадкою. В процесі проведення дослідів була напрацьована оптимальна технологія швидкого отримання «сухого» гідрату пропану з високим газовмістом. Аналіз отриманих експериментальних даних дозволив встановити комплексний вплив тиску та концентрації поверхнево-активних речовин на газовміст отриманого гідрату пропану.

У **сьомому розділі** дисертації (с.278-323) наведено дослідження процесів дисоціації газогідрату при поверхневому підведенні теплоти. З метою визначення температурного режиму газогідратного масиву в умовах дисоціації автором проведено ряд експериментальних досліджень з підведенням теплоти до гідрату пропану. Результати обробки отриманих результатів дозволили встановити нелінійний характер розподілу температур у дисоціюючому газогідраті.

Дисертантом розроблені математичні моделі дисоціації газових гідратів при поверхневому підведенні теплоти, запропоновано критерій дисоціації та показано можливість його застосування для визначення температурного режиму газогідрату в умовах самоконсервації. Встановлено, що в основі ефекту самоконсервації газогідратів лежить їх поступова дисоціація, при якій відбувається зниження температури глибинних шарів газогідратного масиву.

Восьмий розділ дисертації (с. 324-367) присвячено дослідженню впливу об'ємних джерел теплоти на процес дисоціації газових гідратів. На основі аналізу теоретичних положень розповсюдження електромагнітних хвиль в хвилеводах круглого поперечного перерізу автором отримано залежності для визначення потужності багатомодового електромагнітного випромінення та його затухання в трубопроводах. Для визначення особливостей впливу багатомодового високочастотного електромагнітного випромінення на газогідрати автором була зібрана дослідна установка, проведено ряд експериментів та виконано аналіз отриманих експериментальних даних.

Для розрахунку руйнації газогідратних пробок в трубопроводах в умовах дії надвисокочастотного випромінення автором розроблено цифрову математичну модель, комп'ютерну програму та виконано ряд оціночних

розрахунків. Шляхом порівняння дисоціації газогідрату в одно- та багатомодовому режимі доведено перевагу останнього для руйнації газогідратних пробок в газовому обладнанні.

Висновки дисертації (с. 368-370) Кутного Б.А. відповідають меті й завданням дослідження, надають узагальнення наукових та практичних результатів, спрямованих на вирішення наукового завдання – розроблення теорії тепломасообмінних процесів при кристалізації та дисоціації газових гідратів.

Матеріали кандидатської дисертації не були використані у наукових положеннях докторської дисертації автора.

Відповідність автореферату дисертаційній роботі. Зміст автореферату дисертації розкриває основні положення і результати дисертаційної роботи, які є достовірними, мають наукову новизну та відповідають вимогам до докторських дисертацій.

Разом з тим проведений аналіз наукового доробку Кутного Богдана Андрійовича дозволяє зробити певні **зауваження**:

1. Незрозуміле пояснення до формули (1.8) на стор. 60 "Через відсутність функціонального зв'язку з частом формула (1.8) може застосовуватися лише для обробки експериментальних даних"

2. Неясно, з чим порівнювались результати аналізу точності рівнянь стану газу для умов гідратоутворення в % (табл. 1.6).

3. Викликає сумнів застосування припущення у моделі тепло- масообміну біля поверхні бульбашки нехтування її кривизною (стор. 106), хоча залежності (2.29) починає розглядатись кульова поверхня.

4. З тексту розділу 2 незрозуміло, яке диференційне рівняння є основним для розв'язання краєвої задачі методом кінцевих елементів (п.2.5, стор. 118).

5. Незрозуміло, як прийняті допущення математичної моделі у розділі 2 "бульбашка знаходиться у нескінченому об'ємі рідини" співвідноситься з утворенням мультибульбашок в експериментах розділу 3.

6. З тексту розділу 4 незрозуміло, як були враховані погрішності приладів вимірювання, приведені в ньому, на експериментальні залежності, і яка їх підсумкова погрішність.

7. З тексту п.6.2.3 на стор. 252 і далі неясно, що за критерій оптимізації мав автор, розглядаючи систему рівнянь тепло- і масообміну біля міжфазної поверхні. Де постановка задачі оптимізації? Яку роль має введений автором коефіцієнт оптимізації?

8. З тексту на стор. 260 незрозуміло, яким чином був проведений факторний аналіз, і яким чином було одержано найбільш оптимальну регресійну залежність.

9. Незрозуміло, яким чином було обґрунтовано значення коефіцієнту тепловіддачі біля поверхні гідрату $4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ (стор. 288).

10. Текст дисертації вміщує деякі стилістичні та орфографічні помилки.

Проте, зазначені зауваження мають рекомендаційний характер і не впливають на загальну позитивну оцінку дисертації. В цілому, робота є завершеним самостійним науковим дослідженням.

Висновок

На основі вивчення змісту дисертаційної роботи, автореферату та основних публікацій за темою досліджень вважаю, що дисертація є завершеною науковою працею автора, в якій поставлена та розв'язана важлива науково-практична проблема, що є вагомим внеском в розвиток теплоенергетичної галузі. Автор вперше розробив теплофізичну основу процесів кристалізації та дисоціації газових гідратів на міжфазній поверхні, удосконалив методику застосування надвисокочастотного випромінення для руйнування газогідратних пробок в газопроводах та виявив теплофізичну основу ефекту самоконсервації газогідратів. Загальна оцінка дисертаційної роботи позитивна, вона виконана на високому науковому рівні, має вагоме практичне значення.

За актуальністю, науковою новизною, теоретичним рівнем і практичним значенням дисертаційне дослідження «Розвиток теорії тепломасообмінних процесів при кристалізації та дисоціації газових гідратів» повністю відповідає вимогам п. 9, 10 та 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. №567, які пред'являються до докторських дисертацій, а його автор – Кутний Богдан Андрійович заслуговує на присвоєння йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

Офіційний опонент,
доктор технічних наук,
професор, завідувач кафедри теплотехніки
та енергоекспективних технологій
Національного технічного університету
«Харківський політехнічний інститут»

Антон ГАНЖА

