

**Бондаренко В.І., Сай К.С., Светкіна О.Ю.,
Максимова Е.О., Ганушевич К.А.**

**КІНЕТИЧНІ ТА ТЕРМОБАРИЧНІ ОСНОВИ
ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ФАЗОВИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ
ТЕХНОГЕННИХ ГАЗОГІДРАТІВ**

Монографія

**Дніпро
«ЛізуновПрес»
2020**

УДК 622.691:544.01

Друкується відповідно до рішення Вченої ради НТУ «Дніпровська політехніка» (протокол №6 від 25.06.2020 р.)

Рецензенти: А.Ю. Дреус, д-р техн. наук, проф.
О.Ю. Витязь, канд. техн. наук, доц.

Бондаренко В.І., Сай К.С., Светкіна О.Ю., Максимова Е.О., Ганушевич К.А. Кінетичні та термобаричні основи інтенсифікації фазових перетворень техногенних газогідратів. – Дніпро: ТОВ «ЛізуновПрес», 2020. – 160 с. (українською мовою).

ISBN 978-617-7659-06-7

У монографії викладено результати моделювання термобаричних умов процесу гідратоутворення, обґрунтовано термодинамічні та термохімічні характеристики фазових переходів. Проаналізовано і систематизовано літературні та інформаційні джерела відносно існуючих даних щодо закономірностей гідратоутворення, самоконсервації газогідратних структур, властивостей та особливостей фазових переходів. Проведено експериментальні дослідження встановлення закономірностей утворення газових гідратів із використанням інтенсифікаторів процесу гідратоутворення – активного перемішування водогазової суміші у реакторі, застосування ПАР, впливу магнітного поля й ультразвуку. Розроблено основні технологічні параметри і принципову схему установки з виробництва газогідратів безпосередньо у промислових умовах.

Друкується за авторською редакцією.

УДК 622.691:544.01

© Бондаренко В.І., Сай К.С., Светкіна О.Ю., 2020
© Максимова Е.О., Ганушевич К.А., 2020
ISBN 978-617-7659-06-7 © ТОВ «ЛізуновПрес», 2020

ЗМІСТ

ВСТУП	3
РОЗДІЛ 1. ПРИРОДА ФАЗОВИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ ТА ШЛЯХИ ЇХ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ В СИСТЕМІ «ГАЗ – ВОДА – ГАЗОГІДРАТ»	5
1. ОСОБЛИВОСТІ УМОВ ФАЗОВИХ РІВНОВАГ ПРИ ЗМІНІ ТЕРМОБАРИЧНИХ УМОВ, АНАЛОГІЧНИХ ПРИРОДНИМ	5
1.1. Актуальність досліджень фазових перетворень при вивченні процесу гідратуутворення	5
1.2. Фізичні властивості газових гідратів	9
1.3. Властивості води як гідратуутворювача	13
1.4. Формування умов фазових рівноваг стабільного існування газових гідратів	16
1.5. Термодинамічна стійкість однофазного стану газогідратів	17
1.6. Фазовий перехід 2-го роду. Дослідження процесу гідратуутворення з погляду теорії Еренфеста	20
1.7. Фазові перетворення метану при зміні термодинамічних параметрів	23
2. КІНЕТИЧНІ ТА ТЕРМОБАРИЧНІ АСПЕКТИ ГІДРАТУУТВОРЕННЯ. ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСУ	30
2.1. Головні передумови дослідження кінетичних і термобаричних особливостей гідратуутворення	30
2.2. Основні принципові положення щодо визначення термобаричних параметрів і кінетичних характеристик формування клатратних сполук	36
2.3. Аналіз дослідження кінетики утворення газових гідратів	38
2.4. Опис процесів гідратуутворення за допомогою рівняння Клапейрона-Клаузіуса	42
2.5. Перспективні шляхи інтенсифікації фазових перетворень газових гідратів	43
2.6. Аналіз та узагальнення літературних даних щодо застосування поверхнево-активних речовин при гідратуутворенні	49

**КІНЕТИЧНІ ТА ТЕРМОБАРИЧНІ ОСНОВИ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ
ФАЗОВИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ ТЕХНОГЕННИХ ГАЗОГІДРАТІВ**

3.	НОВИЙ НАПРЯМ УТИЛІЗАЦІЇ ГАЗУ МЕТАНУ ВУГІЛЬНИХ ШАХТ В ЕНЕРГЕТИЧНЕ ДЖЕРЕЛО	53
3.1.	Особливості утилізації газу вугільних шахт в Україні	53
3.2.	Обґрунтування доцільності утилізації шахтного метану дегазаційних свердловин	55
3.3.	Використання газогідратних технологій для переведення метану в газогідратний стан	57
	ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1	62
	РОЗДІЛ 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ФАЗОВИХ ПЕРЕХОДІВ У СИСТЕМІ «ШАХТНИЙ МЕТАН + ВОДНИЙ РОЗЧИН + ГАЗОГІДРАТ»	64
4.	МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ Й ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ КІНЕТИКИ ТА ПРИСКОРЕННЯ ГІДРАТОУТВОРЕННЯ	64
4.1.	Обґрунтування параметрів лабораторно- промислової установки «ГАЗОГІДРАТ-1»	64
4.2.	Матеріали та методи досліджень механізму гідратоутворення метану у присутності поверхнево-активних речовин	68
4.3.	Установка і методика отримання газових гідратів метану в лабораторних умовах. Дослідження швидкості гідратоутворення	70
5.	ЛАБОРАТОРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СКЛАДУ ГАЗОВИХ СУМІШЕЙ ДЕГАЗАЦІЙНИХ СВЕРДЛОВИН ВУГІЛЬНИХ ШАХТ НА ФАЗОВІ РІВНОВАГИ В СИСТЕМІ «ШАХТНИЙ МЕТАН + ВОДНИЙ РОЗЧИН + ГАЗОГІДРАТ» ПРИ ЗМІННИХ ТЕРМОБАРИЧНИХ УМОВАХ	75
5.1.	Обґрунтування способів прискорення та стабільного отримання газових гідратів	75
5.2.	Експериментальні дослідження параметрів кінетики формування газогідратів	76
6.	ЛАБОРАТОРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОМПОНЕНТІВ ВОДНОГО РОЗЧИНУ НА ФАЗОВІ РІВНОВАГИ СИСТЕМ З ГАЗОВИМИ ГІДРАТАМИ	83

**КІНЕТИЧНІ ТА ТЕРМОБАРИЧНІ ОСНОВИ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ
ФАЗОВИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ ТЕХНОГЕННИХ ГАЗОГІДРАТІВ**

6.1.	Постановка мети досліджень	83
6.2.	Залежність температури танення льоду від активності води	84
6.3.	Залежність температури кристалізації крапель розчину від активності води	86
6.4.	Швидкість утворення льодяних ядер у чистій воді	86
6.5.	Швидкість гомогенного утворення крижаних ядер у водному розчині	88
6.6.	Результати числового моделювання процесу кристалізації крапель водного розчину	90
7.	ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ ДОМІШОК РІЗНОМАНІТНОГО СКЛАДУ ТА КОНЦЕНТРАЦІЇ НА ІНТЕНСИВНІСТЬ ПРОЦЕСУ ГІДРАТОУТВОРЕННЯ	91
7.1.	Реакції гідратоутворення із застосуванням поверхнево-активних речовин	91
7.2.	Вибір та обґрунтування поверхнево-активних речовин для проведення досліджень	93
7.3.	Дослідження впливу поверхнево-активних речовин на інтенсивність гідратоутворення	97
7.3.1.	Методика експериментальних досліджень гідратоутворення під впливом поверхнево-активних речовин	97
7.3.2.	Результати експериментальних досліджень механізму утворення газових гідратів у присутності поверхнево-активних речовин	98
	ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2	106
	РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ ФОРМУВАННЯ ГАЗОГІДРАТІВ ПІД ВПЛИВОМ ФІЗИЧНИХ ПОЛІВ ТА ХІМІЧНИХ ДОМІШОК	108
8.	ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ФІЗИЧНИХ ПОЛІВ ТА УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ НА ФОРМУВАННЯ ГАЗОГІДРАТІВ МЕТАНУ	108

**КІНЕТИЧНІ ТА ТЕРМОБАРИЧНІ ОСНОВИ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ
ФАЗОВИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ ТЕХНОГЕННИХ ГАЗОГІДРАТІВ**

8.1.	Вплив електричного поля на процес гідратоутворення	108
8.2.	Вплив ультразвуку на прискорення часу формування газових гідратів	110
8.3.	Механізм дії надвисокочастотного (НВЧ) випромінювання на молекулу води	112
9.	ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ХІМІЧНИХ СПОЛУК ТА ТВЕРДИХ ДОМІШОК НА УТВОРЕННЯ ГАЗОВИХ ГІДРАТІВ МЕТАНУ	119
9.1.	Вплив мікропухирців і домішок перфтортриетиламіну (МД-3Ф) в електричному полі реактора для утворення газових гідратів. Отримання бульбашок	119
9.2.	Характер впливу хімічних домішок на швидкість гідратоутворення на прикладі вуглекислого газу	120
9.3.	Вплив механоактивованих частинок на кінетику утворення гідратів метану	121
9.3.1.	Методика отримання механоактивованих домішок та дослідження швидкості гідратоутворення у їх присутності	122
9.3.2.	Результати досліджень впливу механо- активованих домішок алюмосилікатів на швидкість газогідратоутворення	124
9.4.	Дослідження зміни розміру газогідратних частинок у системі «газ – вода – нафта» (за програмою досліджень гранту Fulbright, США)	134
	ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3	140
	ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАННИХ ДЖЕРЕЛ	142