

Министерство просвещения Российской Федерации

МАОУ «Гимназия №1» г. Тюмени

“ДРЕВО ЖИЗНИ”

Исследовательская работа

**«ПРИМЕНЕНИЕ ГАЗОГИДРАТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ
РАЗДЕЛЕНИЯ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
МИНЕРАЛИЗОВАННЫХ ВОД»**

Выполнил: Аверин Роман Михайлович

Ученик 10 класса

Руководитель: Плетнева Клавдия Андреевна

Младший научный сотрудник ИКЗ ТюмНЦ СО РАН

Содержание

Введение	3
Глава 1. Литературный обзор	5
1.1. Газовые смеси: природный газ и попутный нефтяной газ	5
1.2. Технологии разделения газовых смесей.....	5
1.3. Газогидратные технологии разделения газовых смесей.....	6
1.4. Проблемы газогидратных технологий разделения газовых смесей	8
Глава 2. Материалы и методы	10
2.1. Использование ПО CSMHyd для расчета равновесных условий гидратообразования природных газов.....	10
2.2. Материалы.....	10
2.3. Лабораторная установка гидратообразования природного газа	11
2.4. Методика проведения эксперимента	11
Глава 3. Результаты и обсуждения.....	13
3.1. Расчет равновесных условий в ПО CSMHyd	13
3.2. Экспериментальные исследования равновесных условий	14
3.3. Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных	16
Заключение.....	18
Список литературы.....	19

Введение

Спрос на использование природного газа в качестве экологичного топлива с каждым годом растет. Однако для использования добываемых газообразных углеводородов необходимо проведение этапов очистки и разделения. На сегодняшний день существуют несколько различных технологий разделения газовых смесей: мембранный, (ад-)абсорбционный и криогенный; которые имеют ряд недостатков, таких как высокая стоимость, необходимость утилизации реагентов, требования по поддержанию аномально низких температур и т.д. Газогидратные технологии разделения газовых смесей, основанные на различии в равновесные условия существования гидратов отдельных газов, активно изучаются последние 20 лет. Данный метод требует создания контакта воды и газовой смеси при давлениях 3-5 МПа и температурах от 268 до 278 К.

Основной проблемой для различных газогидратных технологий является вопрос определения источника воды, которая является структурообразующим компонентом газовых гидратов. С целью снижения стоимости конечного продукта возможно рассмотреть использование природных источников воды, например, пластовых минерализованных или морских вод, что приведет к отсутствию затрат на этап водоподготовки. Однако, данные воды содержат в себе соли, которые в свою очередь смещают равновесие газовых гидратов. Таким образом, это может привести к увеличению капитальных затрат на создание установки (упрочнение конструкции сосуда высокого давления), при этом будет способствовать уменьшению затрат на оперативные затраты (отсутствие этапа очистки воды) и требует экспериментального подтверждения.

Разработка данной технологии главным образом принесет пользу компаниям нефтегазового сектора.

Цель работы – Исследовать и сравнить равновесные условия образования гидратов различных компонент природного газа и ПНГ для разработки газогидратных технологий разделения газовых смесей с использованием минеральных вод.

Задачи:

1. Провести расчет равновесных условий гидратообразования индивидуальных газов в ПО CSMHud в присутствии и без добавок солей;
2. Провести экспериментальные исследования по определению равновесных условий гидратообразования индивидуальных газов в присутствии и без добавок солей;
3. Провести анализ полученных данных в ходе расчёта в ПО и в ходе проведения экспериментов.

Объект исследования:

Газовые гидраты метана и углекислого газа.

Предмет исследования:

Равновесные условия гидратообразования CH_4 и CO_2 в дистиллированной и минерализованной воде (3 мас.% NaCl).

Гипотеза исследования:

Использование минерализованных вод для газогидратного разделения газовых смесей возможно без значительного снижения эффективности, что позволит сократить затраты на водоподготовку и повысить экономическую целесообразность технологии.

Глава 1. Литературный обзор

1.1. Газовые смеси: природный газ и попутный нефтяной газ

Природный газ (ПГ) на сегодняшний день считается самым экономичным и экологичным видом топлива [1,2]. ПГ, добываемый в газовых месторождениях, представляет собой смесь различных индивидуальных углеводородных газов: метан, этан, пропан, бутан, пентан; а также не углеводородных: водород, сероводород, углекислый газ, азот, гелий [3]. Для газонефтяных месторождений характерно высокое содержание газа в нефти, такой газ еще называют попутным нефтяным газом (ПНГ). В ПНГ содержится существенное количество более тяжелых углеводородов, таких как пропан, бутан и так далее [4], поэтому сфера его применения гораздо шире [5].

Кроме того, существуют месторождения с повышенным содержанием углекислого газа, который приводит к появлению локальных участков коррозии в трубопроводе [6-8]. В данном случае при отделении углекислого газа важен не только сам процесс удаления, но также его утилизация. Примером работы с таким месторождением является газовое месторождение Слейпнир, где был использован метод обратной закачки углекислого газа в пласт [9].

Таким образом, использование ПГ или ПНГ в том виде, в котором они добываются, невозможно. Перед использованием газа любым потребителем, требуется проведение этапов очистки от тяжелых углеводородов, а в ряде случаев (в зависимости от цели потребления газа) требуется выделение конкретных газовых компонент.

1.2. Технологии разделения газовых смесей

В промышленности применяется несколько методов разделения газовых смесей: абсорбционный, адсорбционный, мембранный и криогенный [10-12]. Технология разделения подбирается в зависимости от газов, которые необходимо разделять, и требуемой степени очистки. Несмотря на широкое применение данных методов, они обладают существенными недостатками, которые отображены в таблице 1 [7]. В связи с этим проблема создания нового перспективного метода разделения газовых смесей остается актуальной. Один из таких методов, разрабатываемых на сегодняшний день, является газогидратная технология разделения газов [13].

Проведя анализ (табл. 1), можно сделать вывод, что процесс разделения газов с помощью гидратов является экологичным, так как для образования гидратов нужны только газ и вода/водный раствор с содержанием добавок, который может быть повторно использован.

Таблица 1. Сравнительные характеристики методов разделения газовых смесей.

Метод	Газогидратный	Мембранный	Криогенный	Абсорбционный / адсорбционный	
Хар-ка					
Материалы	Вода / водный раствор с добавками	Мембраны	например, сжиженный азот	Сорбенты	
Температура, К	От 268 до 278	От 278 до 293	До 110	293	От 293 до 313
Давление, МПа	До 5	От 1 до 10	От 0,1 до 3	От 0,1 до 0,5	От 2 до 8
Требования по газу	Удаление дисперсных примесей / Оптимизация Р,Т	Удаление дисперсных примесей / Подбор мембраны в зависимости от отделяемой компоненты	Удаление дисперсных примесей, осушка, предварительное охлаждение смеси / Охлаждение газовой смеси вплоть до температуры сжижения	Удаление дисперсных примесей, предварительное охлаждение газа / Подбор сорбента	
Степень очистки %	До 99	До 99	До 99	До 99	
Экологичность	Экологично так как в процессе участвуют только вода и разделяемый газ	Неэкологично по причине необходимости утилизации мембран	Большое потребление ресурсов для возможности работы с очень низкими температурами	Неэкологично по причине необходимости утилизации сорбентов	

1.3. Газогидратные технологии разделения газовых смесей

Способ разделения газовых смесей путем образования газовых гидратов основан на равновесных условиях существования гидратов различных газов. Гидраты ПГ представляют собой кристаллическую решетку, сформированную молекулами воды с помощью водородных связей, в которую заключены молекулы газа [14]. Формирование газогидратов возможно при определенных условиях – низкой температуре и высоком давлении. *Каждый газовый компонент имеет свои индивидуальные условия гидратообразования (рис. 1).*

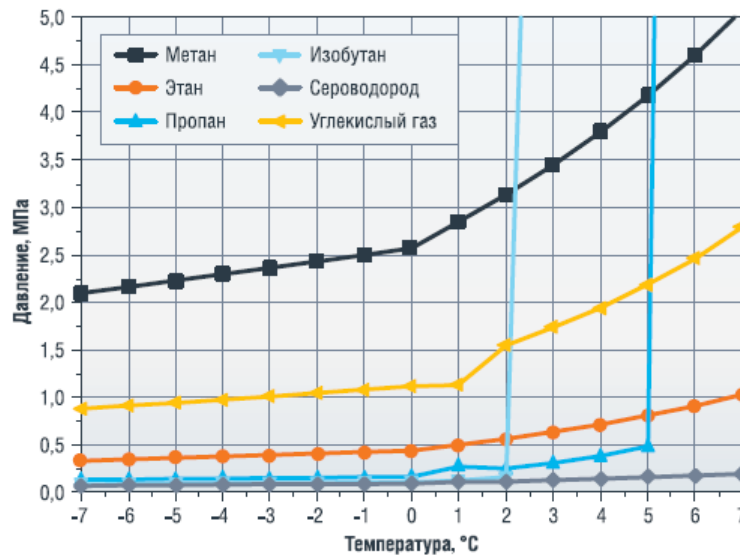


Рис. 1. Фазовые диаграммы различных компонентов ПГ (CSMHyd) [14]

Лидером в исследованиях газогидратных технологий разделения газовых смесей является Япония. Приоритетное направление для них — это технологии отделения углекислого газа с целью его дальнейшей утилизации.

Концепция использования газогидратных технологий разделения газовых смесей изучается учеными уже более двадцати лет, однако наиболее часто в исследованиях использовать двухкомпонентные газовые смеси [15]. На рис. 2 представлена схема, отображающая принцип и фундаментальную концепцию разделения газовой смеси на основе газовых гидратов [16]. На стадии образования газогидрата условия T и P выбираются таким образом, что ГАЗ-2, который образует гидрат при более низком давлении переходит в твердую фазу газогидрата. Газовая фаза, которая теперь содержит больше ГАЗ-1, легко отделяется от газогидрата. Затем гидрат подвергается стадии диссоциации путем сброса давления и нагрева с образованием воды и ГАЗ-2. В реальном применении возможно, что оба компонента перейдут в гидратную фазу и в таких случаях может потребоваться несколько стадий образования и диссоциации газогидратов.

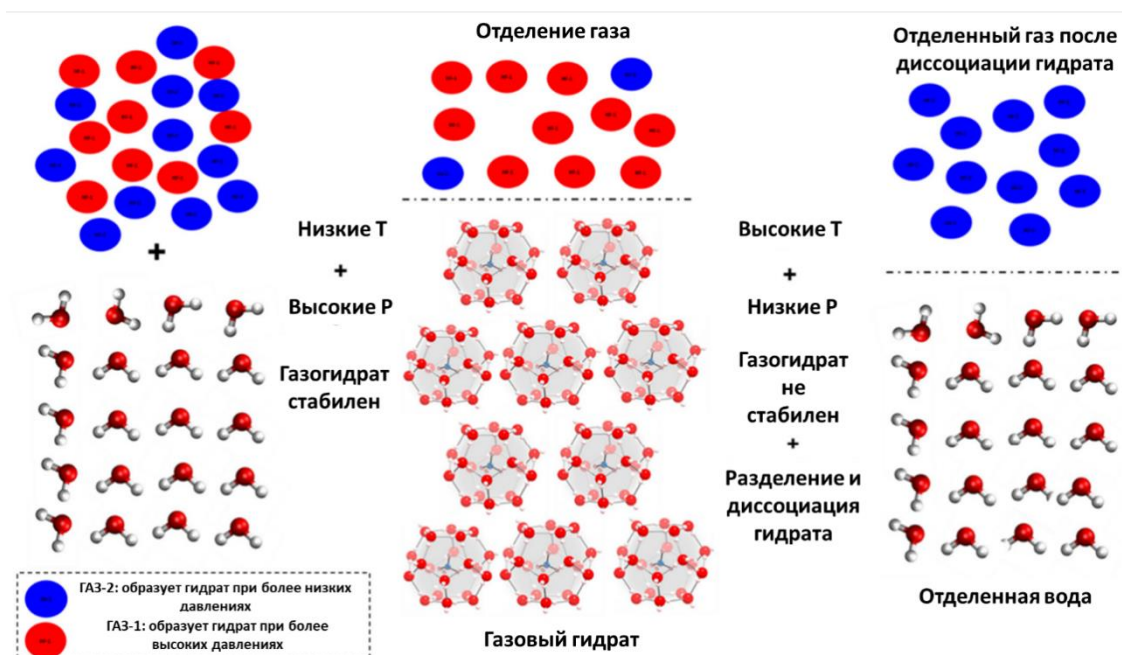


Рис. 2. Схема принципа разделения газовой смеси на основе газовых гидратов [16]

1.4. Проблемы газогидратных технологий разделения газовых смесей

На сегодняшний день газогидратные технологии разделения газовых смесей не используются в промышленном масштабе, а научные работы главным образом носят лабораторный масштаб. Можно выделить несколько основных причин, препятствующих масштабированию:

- Низкие скорости роста газового гидрата и степени перехода воды в гидрат;
- Отсутствие существующих устройств и нормативных документов;
- Требование наличия больших объемов воды.

Первая проблема активно на сегодняшний день исследуется учеными всего мира [17]. Методы решения делятся на механические (использование, например, перемешивающих устройств) и химические (использование, например, кинетических промоторов).

Что касается проблемы отсутствия устройств и нормативных документов — это наиболее сложный вопрос, решить который может только при совместной работе государства, промышленности и науки.

Последняя проблема, касающаяся требованиям по воде, исходит из определения газовых гидратов. Вода составляет около 80% от массы газового гидрата [14]. Таким образом, для осуществления подобной технологии требуется поиск источника воды. Источниками могут выступать морская вода, речная вода, пластовая вода и т.д. Их использование позволит снизить капитальные затраты на проведение дополнительных этапов очистки воды. Однако, эти воды включают в себя соли, являющиеся

термодинамическими ингибиторами – веществами, приводящими к смещению кривой фазового состояния в область больших давлений и меньших температур [14]. Использование засоленных вод в газогидратных технологиях может одновременно снизить затраты на очистку воды, в то же время изменить условия гидратообразования. Таким образом, целью данной работы является определение равновесных условий образования гидратов углекислого газа и метана, как компонент природного газа и ПНГ, в соленых водах для разработки газогидратных технологий разделения газовых смесей.

Глава 2. Материалы и методы

2.1. Использование ПО CSMHyd для расчета равновесных условий гидратообразования природных газов

В ходе работы было использовано программное обеспечение CSMHYD для математического прогнозирования фазовой кривой существования гидратов углекислого газа и метана в чистой воде и в водном растворе хлорида натрия с концентрацией 3 мас.%. CSMHYD — это код, который используется для определения стабильности газовых гидратов в недрах. Он определяет стабильность газовых гидратов на основе анализа трёхфазного равновесия, учитывающего температуру, давление, солёность и газовый состав (рис. 3-1). При запуске есть возможность выбрать единицы измерения для температуры и давления: Фаренгейты и psi соответственно, либо Кельвины и кПа (рис. 3-2). После выбора единиц измерения перед нами появляется функционал программы с различными опциями, основная из которых это определение равновесных условий гидратообразования (рис. 3-3). Далее пользователь переходит к выбору условий расчета равновесных давлений: в чистой воде, либо в присутствии ингибитора (рис. 3-4). После выбора всех опций и введения данных по температуре программа рассчитывает результаты по равновесным давлениям, а также выводит рассчитанный состав гидрата по компонентам газа (рис. 3-5,6).

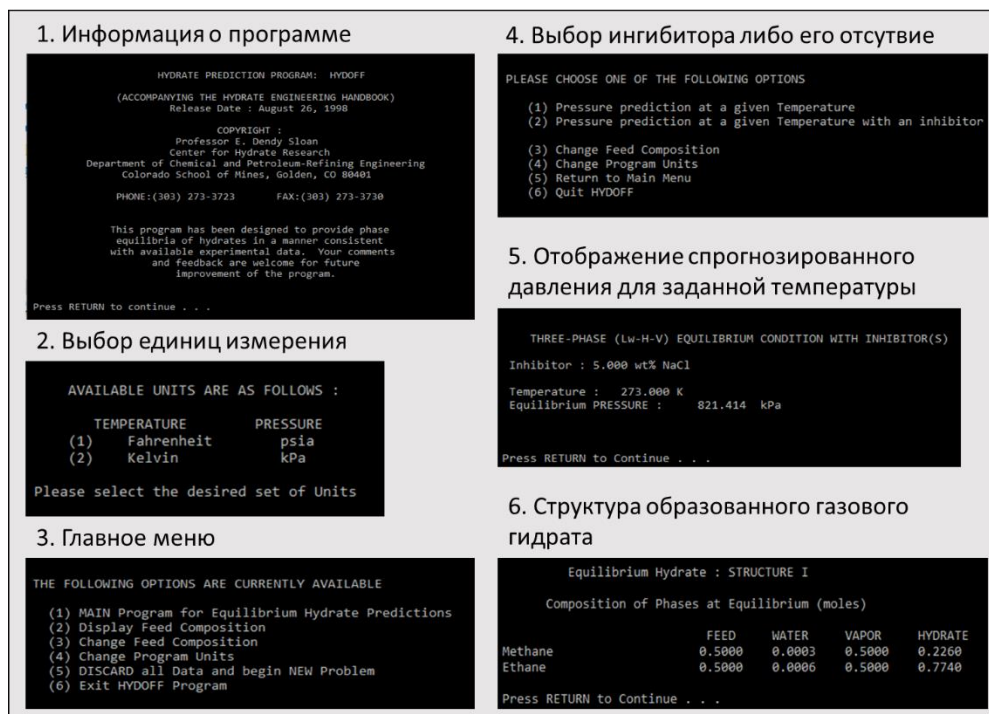


Рис.3. Принтскрины программного обеспечения CSMHyd

2.2. Материалы

Экспериментальная часть работы представляла собой проведение экспериментов по определению равновесных условий гидратообразования углекислого газа и метана в

дистиллированной воде и в водном растворе хлорида натрия с концентрацией 3 мас.%. Материалы представлены в табл. 2.

Табл. 2. Материалы, использованные в ходе выполнения работы

Материал	Поставщик	Чистота
Дистиллированная вода, H ₂ O	получена в лаборатории	-
Хлорид натрия, NaCl	АО «ЛенРеактив»	99,8 мас. %
Метан, CH ₄	МГЗ	99,9 об. %
Углекислый газ, CO ₂	МГЗ	99,9 об. %

2.3. Лабораторная установка гидратообразования природного газа

В ходе проведения эксперимента была использована лабораторная установка по гидратообразованию ПГ, состоящая из реактора высокого давления, выполненного из нержавеющей стали, объемом 60 см³ (2), двух термопар (тип КТХА, погрешность ±0,2 градуса) (5), манометра высокого давления (ДМ5002М, погрешность ±16 кПа) (6), программируемого криостата (КРИО-ВТ-05-02) (7), ванна которого была заполнена пропиленгликолем (3) и баллона с газом (1). Данные с термопар и манометра записывались с помощью блока аналого-цифровой преобразователя (АЦП) (8) на персональный компьютер (ПК) (9) каждые 10 секунд (рис. 4). Использование данной лабораторной установки отражено в работе [18].



Рис. 4. Схема лабораторной установки гидратообразования ПГ

2.4. Методика проведения эксперимента

В ходе проведения исследования равновесных условий гидратов природных газов были проведены эксперименты, включающие в себя процесс формирования гидратов ПГ и последующее определение равновесных условий их существования.

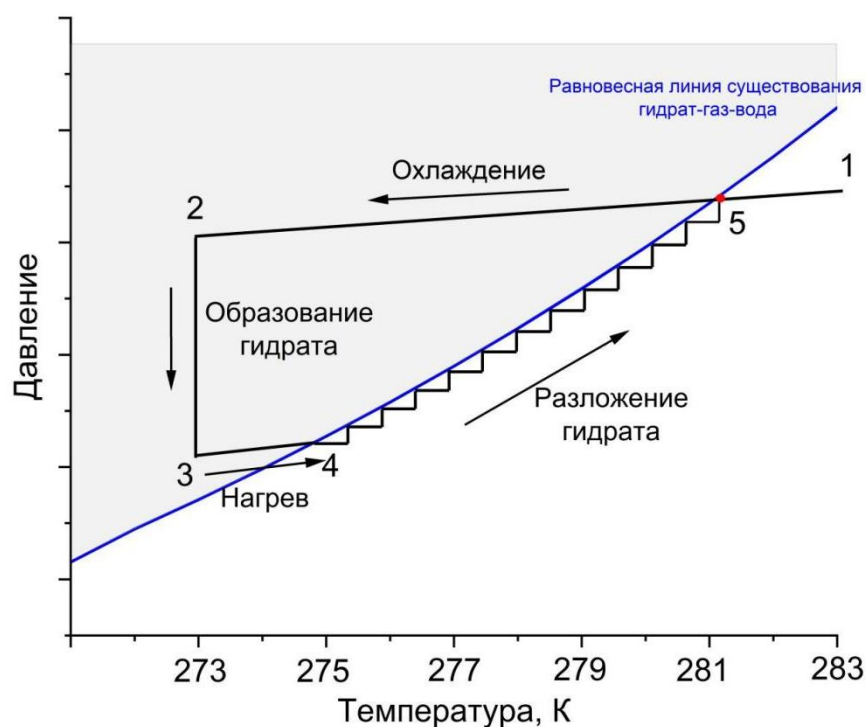


Рис.5 – погрузка реактора с образцом в термостат при 283 К (не менее 60 минут); 1 – напуск газа и начало охлаждения; 2 – старт роста газогидрата; 3 – начало этапа нагрева системы; 4 – пересечение равновесной кривой; 5 – найденная точка равновесных условий гидратообразования

На рис. 5 представлена схема проведения эксперимента. Начальным этапом был погружен реактор с образцом в термостат при температуре в 283 К на промежуток времени не менее 60 минут. Затем в реактор напускали газ до некоторого начального давления. После напуска газа начинается охлаждение и падение температуры с давлением. Достигнув зоны стабильности существования газового гидрата, начинается его формирование.

После формирования газогидрата, начинается этап определения равновесных условий гидратообразования метана. В образцах без содержания NaCl использован метод «позападного нагрева» [19] (позападное нагревание образца гидрата, каждый раз ожидая выхода давления на равновесие). В образцах с содержанием NaCl использован «изохорный метод определения равновесных условий образования гидрата с нагревом с постоянной скоростью» [19, 20].

Глава 3. Результаты и обсуждения

3.1. Расчет равновесных условий в ПО CSMHyd

В ходе проведения исследований в ПО CSMHyd были рассчитаны равновесные кривые «CH₄ – гидрат метана – вода» и «CO₂ – гидрат углекислого газа – вода» в диапазоне температур от 273 К до 285 К.

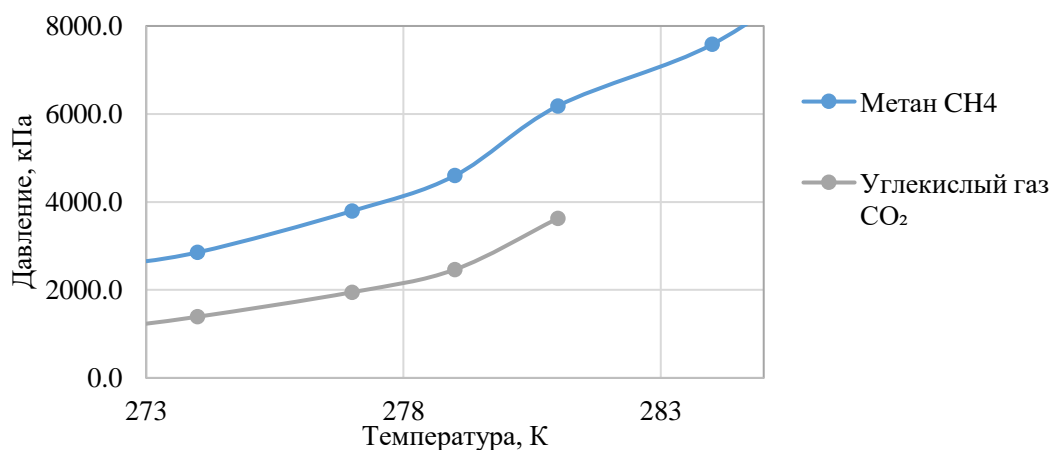


Рис. 6. График равновесных условий гидратообразования индивидуальных газов полученные с помощью CSMHyd

Из представленных данных на рис. 6 видно, что при температуре 277 К «окно» существования гидратов углекислого газа и отсутствия гидратов метана составляет 1845 кПа; при этом при температуре 281 К – 2555 кПа.

Также в ПО CSMHyd были рассчитаны равновесные кривые «CH₄– гидрат метана – водный раствор NaCl 3 мас. %» и «CO₂– гидрат углекислого газа – водный раствор NaCl 3 мас. %» в диапазоне температур от 273 К до 285 К (рисунок 8).

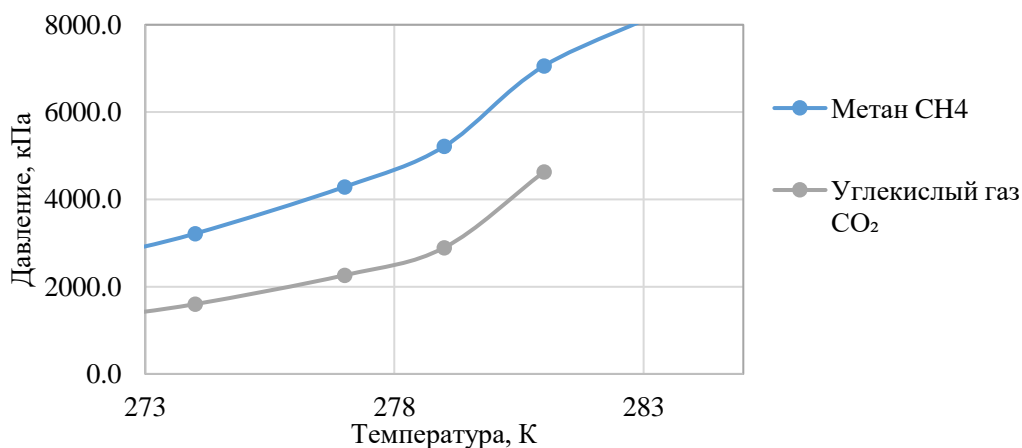


Рис. 7. График равновесных условий гидратообразования индивидуальных газов в присутствии солей NaCl (концентрация 3 мас. %) полученные с помощью CSMHyd

Из представленных данных на рис. 7 видно, что при температуре 277 К «окно» существования гидратов углекислого газа и отсутствия гидратов метана составляет 2025

кПа; при этом при температуре 281 К – 2426 кПа, что указывает на сокращение данной области при использовании добавок солей хлорида натрия.

3.2. Экспериментальные исследования равновесных условий

В ходе проведения исследований были проведены циклы образования и диссоциации гидрата CH_4 в дистиллированной воде. На основании данных, представленных на рис. 8 видно, что при определении равновесных условий гидратообразования CH_4 в дистиллированной воде экспериментальные данные совпали с данными с раздела 3.1. Отклонение экспериментальных данных от рассчитанной равновесной кривой обусловлено приборной погрешностью. Полученные данные согласуются с известными литературными данными [14].

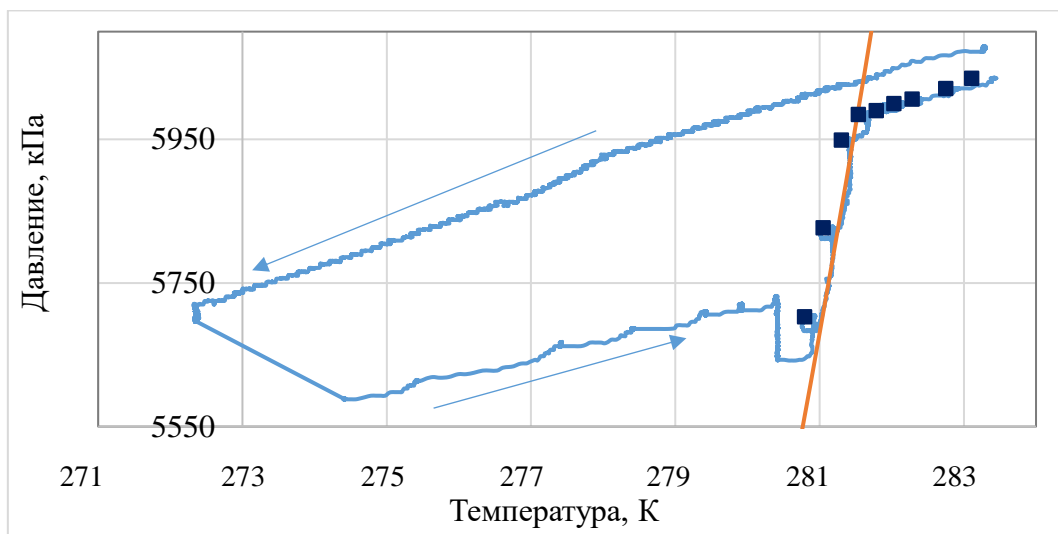


Рис. 8. Зависимость давления от температуры в ходе образования и диссоциации гидрата CH_4 в дистиллированной воде (синяя кривая – экспериментальные данные; оранжевая кривая – расчетная кривая в CSMHyd; синие точки – экспериментальные данные)

Аналогично проведено для CO_2 в дистиллированной воде. На основании данных, представленных на рис. 9 видно, что при определении равновесных условий гидратообразования CO_2 в дистиллированной воде экспериментальные данные не совпали с данными с раздела 3.1., при этом прослеживается явное отклонение полученных данных на 0,2 градуса. Данное отклонение может быть объяснено приборной погрешностью, а также тем, что CO_2 сильно растворяется в воде, и часть газа, которая выделяется при диссоциации газового гидрата, переходит в водорастворенное состояние.

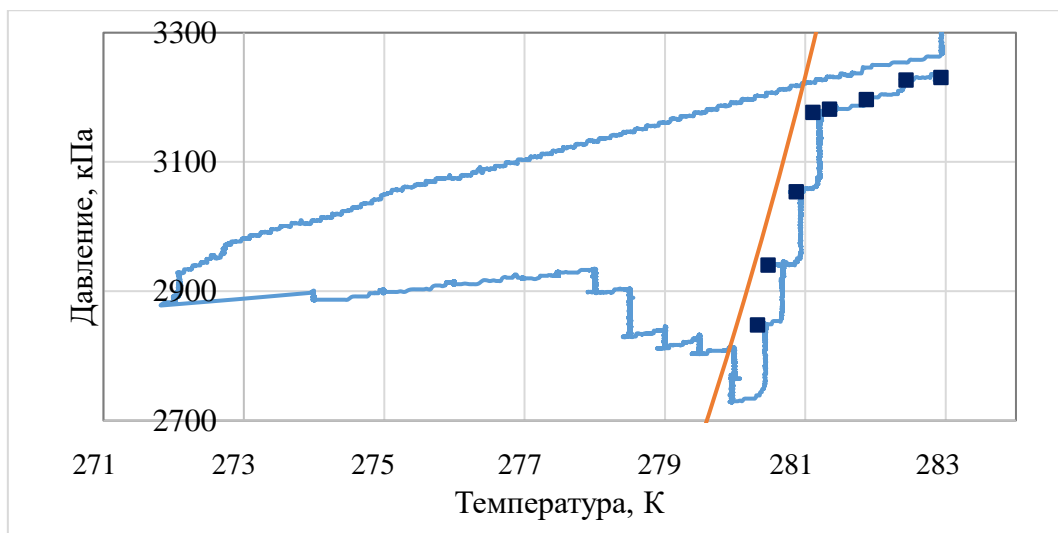


Рис. 9. Зависимость давления от температуры в ходе образования и диссоциации гидрата CO_2 в дистиллированной воде (легенда аналогична рис. 9)

Аналогично проведено для CH_4 в присутствии солей NaCl (3 мас.%). На основании данных представленных на рис. 10 видно, что при определении равновесных условий гидратообразования CH_4 в присутствии солей NaCl (3 мас.%) экспериментальные данные совпали с данными с раздела 3.1. Наклон экспериментальных данных объясняется тем, что в гидратную структуру включаются только молекулы воды, в то время как молекулы соли отторгаются, а их концентрация в воде увеличивается. Таким образом, в момент начала нагрева концентрация водного раствора составляет не 3 мас.%, а больше.

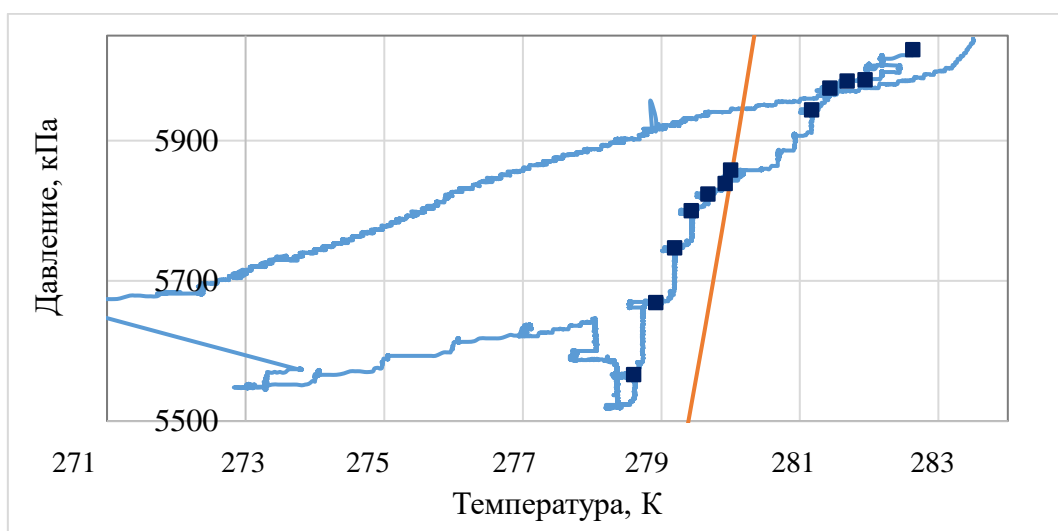


Рис. 10. Зависимость давления от температуры в ходе образования и диссоциации гидрата CH_4 в присутствии солей NaCl (3 мас.%) (легенда аналогична рис. 9)

Аналогично проведено для CO_2 в присутствии солей NaCl (3 мас.%). На основании данных представленных на рис. 11 видно, что при определении равновесных условий гидратообразования CO_2 в присутствии солей NaCl (3 мас.%) экспериментальные данные не совпали с данными с раздела 3.1. При этом прослеживается явное отклонение

полученных данных на 0,2 градуса. Отклонение может быть объяснено аналогично описанному ранее.

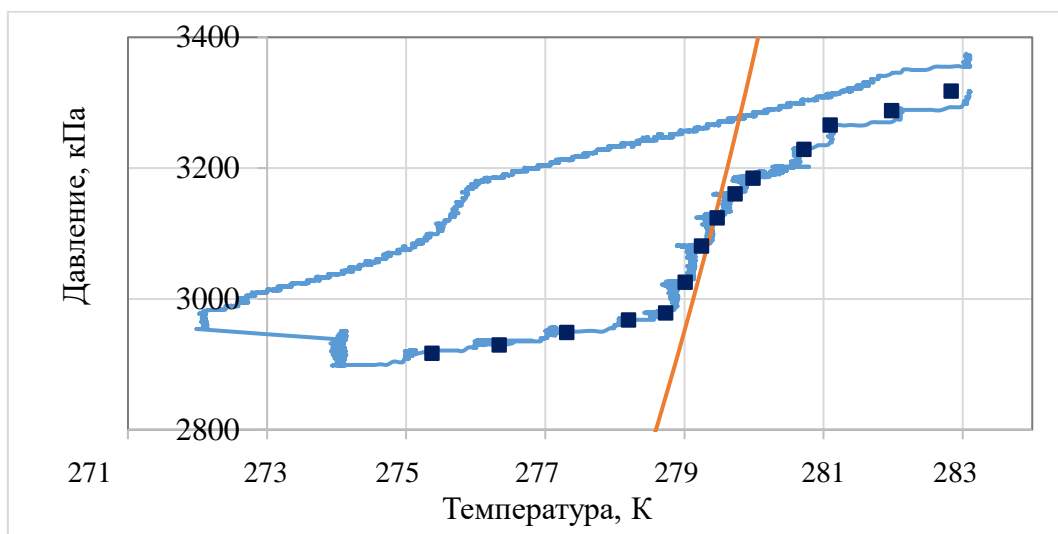


Рисунок 11. Зависимость давления от температуры в ходе образования и диссоциации гидрата CO_2 в присутствии солей NaCl (концентрация 3 мас.%) (легенда аналогична рис. 9)

3.3. Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных

Проводя анализ полученных экспериментальных и расчетных данных, можно сделать вывод о том, что использование ПО CSMHyd позволяет хорошо прогнозировать равновесную кривую для газов, слабо растворимых в воде. Так, из табл. 3 видно, что экспериментальные давления для метана хорошо сходятся с давлениями расчётными для метана, что нельзя сказать о данных по углекислому газу.

Табл. 3. Равновесные давления экспериментальные и расчетные.

Газ – вода / водный раствор	Температура, К	Давление по CSMHyd, кПа	Давление по эксперименту, кПа	«Окно» $\Delta=P_1-P_2$, кПа
Метан – вода (P_1)	281,5	5977	5985	2808
Углекислый газ – вода (P_2)	281	3232	3177	
Метан – водный раствор NaCl 3 мас.% (P_1)	280	5844	5858	2668
Углекислый газ – водный раствор NaCl 3 мас.% (P_2)	280	3371	3190	

В табл. 3 также представлены данные по размеру «окна», в котором могут существовать гидраты углекислого газа, но не могут существовать гидраты метана. Определено, что при использовании дистиллированной воды «окно» имеет размер 2808

кПа, в то время как при использовании раствора NaCl 3 мас.% – 2668 кПа, то есть сокращается на 130 кПа, что не является критичным. Таким образом, полученные результаты не противоречат существующим работам о возможности реализации газогидратной технологии разделения газовых смесей [21, 22], а также дополняет существующие данные о возможности применения не очищенных вод с целью увеличения экономической эффективности технологии.

Кроме того, были изучены нормативные акты по требованиям к сосудам, работающим под высокими давлениями. Согласно ГОСТ 34233-2017 толщина стенки сосуда, работающего под давлением, напрямую зависит от расчетного внутреннего давления внутри сосуда. На основании данных, полученных экспериментально, давление внутри сосуда по разделению газовых смесей на основе метана и углекислого газа должно находиться в диапазоне от 3177 до 5985 кПа с использованием дистиллированной воды при температуре 281 К, и от 3190 до 5858 кПа для раствора NaCl (3 мас.%) при температуре 280 К.

Проведя расчеты, предполагающие использование стали с допустимым напряжением около 167 МПа и диаметром сосуда 600 мм, получим для давления 5 МПа толщина стенки составляет 9,4 мм.

Были проведены также расчеты по экономии оперативных затрат на очистке воды [23]. Средняя стоимость очистки воды (по данным промышленности):

- Фильтрация и обессоливание – от 0,5 до 2 руб./м³.
- Дистилляция – около 3–5 руб./м³.

Если установка потребляет 100 000 м³ воды в год, то экономия составит 200 000 – 400 000 руб./год.

Также были изучены возможные капитальные затраты на модернизацию оборудования [24]. Использование минеральных вод может потребовать адаптации существующего оборудования из-за изменения условий процесса и возможного повышения коррозионной активности среды:

Антикоррозионные покрытия: Стоимость может составлять от 1 000 до 5 000 рублей за квадратный метр, в зависимости от типа покрытия и условий эксплуатации.

Коррозионностойкие материалы: Замена стандартных материалов на коррозионностойкие (например, нержавеющую сталь) может увеличить стоимость оборудования на 20–50%.

Заключение

Газогидратные технологии разделения газовых смесей, основанные на различии в равновесных условиях существования гидратов отдельных газов, могут стать перспективным конкурентом уже существующим технологиям. Основной проблемой для различных газогидратных технологий является вопрос определения источника воды. С целью снижения стоимости конечного продукта возможно рассмотреть использование неочищенных природных источников воды, например, пластовых минерализованных или морских вод, что приведет к отсутствию затрат на этап водоподготовки.

В ходе работы были исследованы и сравнены равновесные условия образования гидратов метана и углекислого газа для разработки газогидратных технологий разделения газовых смесей с использованием минеральных вод.

Были определены равновесные условия гидратообразования метана и углекислого газа в ПО CSMHud в присутствии и без добавок солей.

Кроме того, были экспериментально исследованы равновесные условия гидратообразования метана и углекислого газа в присутствии и без добавок солей на лабораторном оборудовании гидратной лаборатории ИКЗ ТюмНЦ СО РАН.

В ходе проведения сравнительного анализа расчетных и экспериментальных данных было выявлено, что ПО CSMHud с высоким уровнем точности предсказывает равновесные условия для слаборастворимых в воде газов. Так, экспериментально определенные данные для метана хорошо совпали с данными расчетными, что нельзя сказать о данных для углекислого газа. Кроме того, определены области, в которых могут существовать гидраты углекислого газа и отсутствуют гидраты метана в дистиллированной и минерализованной (NaCl 3 мас.%) – 2808 кПа и 2668 кПа, соответственно. Был сделан вывод о незначительном снижении данной области при использовании минерализованных растворов, однако в дальнейшем требуется проведение исследований с большим количеством добавок солей и другими газовыми компонентами. Таким образом, полученные результаты являются дополнением существующих данных о возможности применения не очищенных вод с целью увеличения экономической эффективности технологии.

Кроме того, проведен анализ капитальных и оперативных затрат, где показано возможное снижение стоимости технологии за счет отказа от очистки воды, а также возможное увеличение стоимости за счет необходимости осуществления модернизации оборудования.

Список литературы

1. Yin Z. Methane hydrates: A future clean energy resource / Z. Yin, P. Linga / Chinese Journal of Chemical Engineering. – 2019. – № 27, vol. 9. – P. 2026–2036.
2. Ибрагимов Ш.Ш. Природный газ как экологичный вид топлива для автомобиля / Международный научный журнал «ВЕСТНИК НАУКИ». – 2023. – № 5. – (62). – Т.3.
3. Wikipedia: [сайт]. - URL :<https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%80%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D1%8B%D0%B9%D0%B3%D0%B0%D0%B7> (дата обращения: 13.02.2025). - Текст : электронный.
4. Neftegaz.RU: деловой журнал: [сайт]. - URL: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/aktualno/621996-komponentnyy-sostav-poputnogo-neftyanogo-gaza/> (дата обращения: 05.02.2025). - Текст : электронный.
5. AVFinfo.Ru : статьи и заметки инженера нефтегазового комплекса : [сайт]. - URL <http://www.avfinfo.ru/engineering/e-02/> (дата обращения: 05.02.2025). - Текст электронный.
6. Оценка влияния состава добываемых сред и эксплуатационных условий на коррозию газопромыслового оборудования / В. В. Полников, А. Р. Хафизов, В. В. Чеботарев, А. А. Мугатабарова // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2020. – № 1(123). – С. 81-94.
7. Митина, В. С. Обустройство месторождений со сверхвысоким содержанием сероводорода и углекислого газа / В. С. Митина // Актуальные вопросы и инновационные решения в нефтегазовой отрасли : сборник трудов 2-ой всероссийской научно-практической конференции (весенняя сессия), Самара, 14–16 апреля 2021 года. – Москва: Издательство "Перо", 2021. – С. 207-214.
8. Gambelli, A. M. Hydrate formation as a method for natural gas separation into single compounds: a brief analysis of the process potential / A. M. Gambelli, F. Rossi // Arabian Journal of Geosciences. – 2021. – Vol. 14, No. 10.
9. Wikipedia: [сайт]. - URL :[https://ru.wikipedia.org/wiki/Слейпнир_\(газовое_месторождение\)#:~:text=Особенность%20газового%20месторождения%20Слейпнир%20является,четыре%20раза%20выше%20обычных%20показателей](https://ru.wikipedia.org/wiki/Слейпнир_(газовое_месторождение)#:~:text=Особенность%20газового%20месторождения%20Слейпнир%20является,четыре%20раза%20выше%20обычных%20показателей) (дата обращения: 13.02.2025). - Текст : электронный.
10. Akhmetshina A.I. Permeability and selectivity of acid gases in supported conventional and novel imidazolium-based ionic liquid membranes / A.I. Akhmetshina, O.R.

Gumerova, A.A. Atlaskin, A.N. Petukhov/ Separation and Purification Technology. – 2017. – № 176. – P. 92–106.

11. Belmabkhout Y. Amine-bearing mesoporous silica for CO₂ and H₂S removal from natural gas and biogas / Y. Belmabkhout, G. De Weireld, A. Sayari/ Langmuir. – 2009. – № 25. – P. 13275–13278.

12. Maqsood K. Cryogenic carbon dioxide separation from natural gas: a review based on conventional and novel emerging technologies / K. Maqsood, A. Mullick, A. Ali / Reviews in Chemical Engineering. – 2014. – № 30, vol. 5. – P. 453–477.

13. Neftegaz.RU: деловой журнал: [сайт]. - URL: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/gazopodgotovka/791581-perspektivy-primeneniya-gazogidratnykh-tekhnologiy-dlya-razdeleniya-gazovykh-smesey/> (дата обращения: 05.02.2025). - Текст : электронный.

14. Sloan E. D. Clathrate Hydrates of Natural Gases Third Edition / Sloan E.D., Koh C. – Boca Raton: CRC Press, 2008. 721 p.

15. Eslamimanesh, Mohammadi, Richon, Naidoo, Ramjugernath. Application of gas hydrate formation in separation processes: A review of experimental studies // The Journal of Chemical Thermodynamics. – 2012. – V. 46. – P. 62-71.

16. Khan, M.; Warriar, P.; Peters, C.; Koh, C. Hydrate-Based Separation for Industrial Gas Mixtures // Energies. – 2022. – 15, 966.

17. Review of methods and applications for promoting gas hydrate formation process / Z. Xia, Q. Zhao, Z. Chen [et al.] // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2022. – Vol. 101. – P. 104528.

18. Formation of Methane Hydrate in Frozen Powdered Soy Lecithin Solutions / K. A. Pletneva, A. A. Kibkalo, P. Zhingel [et al.] // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. – 2023. – Vol. 59, No. 4. – P. 692-698.

19. Madygulov M. Sh., Vlasov V.A. Kinetics of methane hydrate formation from stirred aqueous NaCl solutions // Chemical Engineering Research and Design. – 2024. – V. 202. – P. 267-271.

20. Manteghian M., Safavi S. M. M., Mohammadi A. The equilibrium conditions, hydrate formation and dissociation rate and storage capacity of ethylene hydrate in presence of 1,4-dioxane // Chemical Engineering Journal. – 2013. – V. 217. – P. 379-384.

21. Post-combustion CO₂ capture and separation in flue gas based on hydrate technology: A review / Zucheng Cheng [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2022. – V. 154. – 111806.

22. Eslamimanesh, Mohammadi, Richon, Naidoo, Ramjugernath. Application of gas hydrate formation in separation processes: A review of experimental studies // The Journal of Chemical Thermodynamics. – 2012. – V. 46. – P. 62-71.

23. WATER.RU: кампания по производству систем промышленной водоподготовки и фильтров: [сайт]. - URL: https://www.water.ru/catalog/promyshlennaja_vodopodgotovka/?ysclid=m734xa9pgl634740025 / (дата обращения: 13.02.2025). - Текст : электронный.

24. ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ: комплектные поставки технологического оборудования [сайт]. - URL <https://engsystems.ru/oborudovanie/oborudovanie-dlya-kompleksnoy-neftepodgotovki/?ysclid=m735418glr731879805/> (дата обращения: 13.02.2025). - Текст : электронный.