

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
Кафедра механики многофазных систем

РЕКОМЕНДОВАНО К ЗАЩИТЕ В ГЭК
И ПРОВЕРЕНО НА ОБЪЕМ
ЗАИМСТВОВАНИЯ

И.о. заведующего кафедрой
к.ф.-м.н.

 П.Ю. Михайлов
16.06. 2017 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

03.04.02 Физика

Магистерская программа «Техническая физика в нефтегазовых технологиях»

Выполнил работу:
студент 2 курса
очной
формы обучения



Рогозин
Андрей
Вячеславович

Научный руководитель:
к.ф.-м. н., доцент



Ширшова
Альбина
Вольфовна

Рецензент:
Директор
ООО «АМКОР»



Латыпов
Роман
Рамилевич

г. Тюмень 2017

СОДЕРЖАНИЕ

АННОТАЦИЯ.....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР	
1.1. Структура и свойства кристаллов газогидратов.....	6
1.2. Образование гидратов в свободном объёме.....	8
1.3. Газовые гидраты в природе	10
1.4. Влияние ингибиторов на процесс гидратообразования.....	13
1.5. Фильтрационно-ёмкостные свойства пласта. Закон Дарси	14
Цель и задачи дипломной работы.....	16
ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА	
2.1. Экспериментальное исследование гидратообразования в монодисперсной искусственной пористой среде (МПС) и в объёмной воде	17
2.1.1. Блок-схема и принцип работы экспериментальной установки....	17
2.1.2. Подготовка исследуемого реагента	19
2.1.3. Проведение эксперимента.....	21
2.2. Экспериментальное исследование фильтрационных свойств МПС...22	
2.2.1. Описание экспериментальной установки.....	22
2.2.2. Проведение эксперимента	23
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ	
3.1. Экспериментальные результаты исследования газогидратообразования в МПС и в объёмной воде.....	26
3.1.1. Результаты исследования газогидратообразования на основе Р-Т метода.....	26
3.1.2. Время релаксации и обработка результатов измерений с помощью кривых релаксации	27

3.1.3. Фотографии полученных газовых гидратов.....	32
3.2. Исследование фильтрационных свойств искусственной монодисперсной пористой среды при участии кинетических ингибиторов гидратообразования.....	35
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	42
СПИСОК ИСТОЧНИКОВ.....	43
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	46

АННОТАЦИЯ

В данной работе рассматриваются вопросы, связанные с необходимостью исследования газогидратообразования в пористых структурах. Целью работы являлось экспериментальное изучение процессов образования газогидрата в искусственной монодисперсной пористой среде (МПС). Большое внимание было уделено экспериментальному исследованию кинетики газогидратообразования в объёмной воде и в искусственной монодисперсной пористой среде, а также анализу результатов в воде и МПС. Одним из этапов данной работы также было исследование влияния возможных последствий некоторых кинетических ингибиторов на фильтрационные свойства монодисперсной пористой среды.

В первой главе отражена теоретическая составляющая работы, в частности, здесь описывалась структура и свойства газовых гидратов, их образование в свободном объёме, а также были описаны некоторые фильтрационно-емкостные свойства пласта.

Во второй главе была представлена методика проведения эксперимента исследования гидратообразования в монодисперсной искусственной пористой среде (МПС) и в объёмной воде, а именно было описано следующее: блок-схема экспериментальной установки, ее принцип действия, подготовка исследуемого реагента и проведение эксперимента. Аналогично была представлена также и установка по исследованию фильтрационных свойств МПС.

Третья глава посвящена обработке и анализу экспериментальных данных. Например, был выполнен сравнительный анализ результатов газогидратообразования в воде и в искусственной монодисперсной пористой среде: построены кривые изменения давления от времени для МПС и объёмной воды с помощью Р-Т метода, сформирован график зависимости скорости роста газогидрата от номера цикла в воде и МПС, а также определено время релаксации.

ВВЕДЕНИЕ

К концу XX века, по мере истощения ресурсов природных газов, и одновременно, расширения областей их применения и увеличения их значимости в мировом народном хозяйстве, почти повсеместно усилилось внимание к изучению нетрадиционных резервов ресурсов газа. Одним из таких перспективных источников являются природные газогидраты, которым принадлежат самые крупные потенциальные ресурсы среди альтернативных ресурсов газа. Поэтому в последнее время значительно возрос интерес к изучению свойств газовых гидратов. Отметим, что их общая изученность одна из самых низких среди нетрадиционных видов газового сырья.

Большой интерес представляют теоретические и экспериментальные исследования термодинамики и кинетики роста-диссоциации газогидратов в пористых системах, максимально приближенных к реальным средам. Большинство имеющихся теоретических и экспериментальных исследований таких сложных систем направлены на разработку методик образования, накопления и изучения гидратосодержащих образцов различных твердых дисперсных пород.

Актуальна задача разработки методов разложения газогидрата и аккумуляцию газа в достаточном объеме, в связи с катастрофическими газопроявлениями (взрывов, пожарах, выбросов бурового раствора) при бурении в многолетних мёрзлых породах.

Таким образом, перед исследователями стоят две задачи: найти эффективные методы борьбы с гидратами и научиться получать газовые гидраты с заданными характеристиками для различных технических целей.

ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

1.1. Структура и свойства кристаллов газовых гидратов

Газовые гидраты – твердые кристаллические соединения, образующиеся при определённых термобарических условиях из воды и газа. Они входят в более крупный класс химических соединений, известных под названием «клатратов». Клатратами называют соединения, в которых молекулы одного вещества заключены внутри структур, образованных молекулами другого вещества.

Для образования газогидрата необходимы следующие условия:

1. благоприятные термобарические условия;
2. наличие гидратообразующего вещества;
3. достаточное количество воды.

Ускоренному образованию газовых гидратов способствуют явления:

1. Турбулентность - образование газовых гидратов активно протекает на участках с высокими скоростями потока среды.;

2. Центры кристаллизации представляют собой точки, в которых имеются благоприятные условия для фазового превращения, в данном случае – образования твердой фазы из жидкой;

3. Свободная вода. Наличие свободной воды не является обязательным условием для гидратообразования, однако интенсивность в присутствии воды значительно возрастает.

Процесс образования газовых гидратов начинается с формирования центров кристаллизации на поверхности раздела газ-вода. Рост кристалла может происходить как в объёме воды, содержащей растворённый газ, так и в объёме газа, содержащего пары воды. При этом возможно образование трёх типов кристаллов:

1. Массивные кристаллы формируются путём последовательной сорбции молекул газа и воды на растущей поверхности кристалла;

2. Вискерные кристаллы образуются за счёт циклической диффузии молекул газа и воды к основанию растущего кристалла;

3. Гель – кристаллы возникают в объёме воды из растворённого в ней газа, при достижении условий гидратообразования.

К теплофизическим свойствам гидратов относят теплоту гидратообразования (энтальпию диссоциации) и другие энтальпийные характеристики, а также теплоёмкости (C_p и C_v), коэффициенты теплопроводности и температуропроводности. [3, с. 63].

К энтальпийным характеристикам относят теплоту гидрата, энтальпию десорбции гостевых молекул, энтальпию (гипотетическую) процесса перехода незаполненной гидратной решетки в лед, а также некоторые другие.

Стандартная молярная энтальпия разложения - это энтальпия разложения ΔH^0 индивидуального газового гидрата на гидратообразователь (газ или жидкость) и лед (или воду) при $T_0 = 273,15^\circ\text{K}$ и $P_0 = 0,1013$ МПа.

Определение теплоёмкости производится по аддитивной схеме. При этом теплоёмкость C_p (или C_v , так как $C_p \approx C_v$) разбивается на вклады от теплоёмкости незаполненной решетки клатрата и теплоёмкости включенных молекул.

Считается справедливым следующее соотношение (Дж/(моль·К)):

$$C = nC_{\text{незан}} + C_M, \quad (1.1)$$

где n – гидратное число; $C_{\text{незан}}$ – теплоёмкость незаполненной решетки; C_M – среднемолярная теплоёмкость включенных молекул:

$$C_M = \sum_i C_{Mi} x_i, \quad (1.2)$$

где C_{Mi} – молярная теплоёмкость i -го компонента гидратообразователя в гидратной фазе; x_i – молярная доля i -го, включенного в гидрат, компонента ($\sum x_i = 1$). Весьма существенно, что при достаточно высоких температурах в качестве C_{Mi} можно

использовать величину $\approx 1,5 R$ для одноатомных газов, величину $\approx 2,5R$ для двухатомных молекул, а для многоатомных молекул использовать их молярные теплоёмкости в идеальном газовом состоянии.

Удельная теплоёмкость пересчитывается из молярной теплоемкости по следующей формуле (Дж/(кг·К)):

$$C_{уд} = \frac{C}{(M + 0,018n)}, \quad (1.3)$$

где M – средняя молярная масса газа, входящего в состав гидрата, кг/моль. При этом погрешность расчета удельной теплоёмкости оказывается порядка 5%.

1.2. Образование гидратов в свободном объеме

Первые экспериментальные исследования кинетики образования газовых гидратов выполнил в 1961 г. В. Кнокс. Скорости образования гидрата пропана были определены им по размерам образующихся гидратных кристаллов в реакторе с магнитной мешалкой.

Для свободного объема возможны три случая зародышеобразования и роста кристаллов газовых гидратов:

- а) на поверхности раздела вода (лед) – газ;
- б) в объёме свободного газа, насыщенного парами воды;
- в) в объёме газонасыщенной жидкой воды.

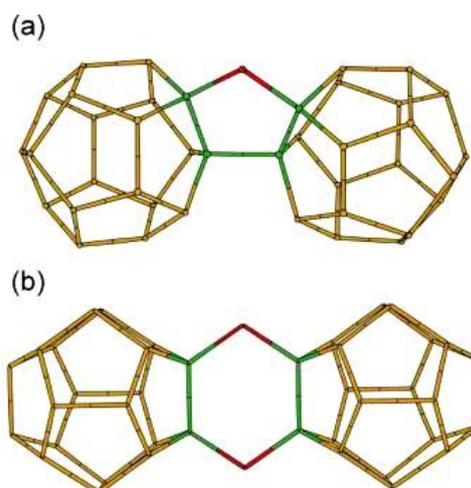


Рисунок 1.1 – Типы димерных кластеров-зародышей кристаллов гидрата КС-1 из пентагондодекаэдров - предшественников малых полостей данной структуры, соединенных пятиугольником (а) и шестиугольником (б)

Построена простая и универсальная модель образования зародышевых кластеров клатратных кристаллов, применимая в частности к клатратным гидратам (рис. 1.1). Отличительной особенностью данной модели является образование в растворе вокруг молекул-гостей кластеров из молекул воды – предшественников полостей определенного типа в кристалле гидрата.

Иная модель нуклеации основана на представлениях об автоабсорбции воды (модель Л. Полинга) и предполагает априори существование в жидкой воде клатратоподобных ассоциатов молекул, внутри которых располагаются адсорбированные молекулы воды («гости»).

В кинетике гидратообразования, как правило, выделяют две фазы. Первая фаза подразумевает нуклеацию, а вторая фаза описывает фактический рост гидрата, который начинается после того, как сформируется зародыш.

В воде, подвергшейся гидратообразованию, значительно быстрее вновь образуются зародыши газовых гидратов, по сравнению с водой, не испытавшей воздействия гидратообразования или льдообразования. Это подтверждается опытами Ю.Ф. Макогона. Результаты его исследований показали, что нуклеация значительно ускоряется, если используется вода, уже подвергавшаяся

гидратообразованию. Этот факт объясняется своеобразной структурной памятью воды [5, с. 208].

Опыты по кинетике гидратообразования свидетельствуют о том, что гидратообразование слаборастворимых газов может происходить во всем объеме воды, если достигнута определенная степень пересыщения. Большинство работ, посвященных кинетике гидратообразования в системе вода-газ, проводится при положительной температуре. Кинетика образования газовых гидратов при $T < 273,15$ К исследована менее детально. [7, с. 12].

В работе А.Г. Гройсмана газовые гидраты получали в результате контактирования тонкой ледяной пыли (пудры) с газом-гидратообразователем в условиях гидратообразования. Они исследовали кинетику гидратообразования, фиксируя изменение теплофизических свойств образцов. Процесс перехода льда в гидрат характеризуется уменьшением скорости во времени. Предполагается, что причиной преобразования льда в гидрат служит диффузия [8, с. 75].

Л. Штерн изучал образование и структуру гидратов различных газов при помощи сканирующей электронной микроскопии. Гидрат был образован из мелкокристаллического льда структуры с характерным размером частиц в десятки микрон. Однако после теплового сжатия структура гидратов становится монолитной [9, с. 301].

Таким образом, экспериментальное изучение образования газовых гидратов в свободном объеме началось в 60-х годах XX века. Были получены экспериментальные данные, характеризующие механизм гидратообразования.

1.3. Газовые гидраты в природе

Возможность существования газогидратных залежей в природных условиях была показана в работах И. Н. Стрижова, М.П. Мохнаткина, а также в исследованиях, выполненных Ю.Ф. Макогоном в 1969 г. [10, с. 157].

Российскими специалистами было экспериментально установлено ранее неизвестное свойство природных газов образовывать в земной коре при

определенных термодинамических условиях залежи в твердом газогидратном состоянии [12, с.29]. Авторами открытия являются советские учёные: Ю.Ф. Макогон, Ф.А. Требин, В.Г. Васильев, Н.В. Черский, А.А. Трофимук.

В результате началось активное изучение этого явления во всем мире. В дальнейшем газогидраты были обнаружены под многолетнемёрзлыми породами в северных районах России, Аляски и Канады [13, 14, с. 70-79]. К настоящему времени газогидраты по данным геофизических исследований обнаружены в 200 районах, расположенных вдоль восточного и западного побережий Северной и Южной Америки, Евразийского континента, в Австралии, Индии, Японии, под Чёрным, Каспийским и Средиземным морями, озером Байкал. Из некоторых вышеуказанных районов были извлечены на поверхность образцы природных газовых гидратов (рис. 1.2).



Рисунок 1.2. Известные и предварительно оценённые залежи природных газовых гидратов

Большая часть гидратов сосредоточена, по-видимому, на материковых окраинах, где глубина вод составляет примерно 500 метров. В этих зонах вода

выносит органический материал и содержит питательные вещества для бактерий, в результате жизнедеятельности из которых выделяется метан.

Обычная глубина залегания природных газогидратов – 100-500 метров ниже морского дна, хотя иногда их находят и на морском дне. В районах с развитой многолетней мерзлотой они могут присутствовать и на меньших глубинах, так как температура на поверхности ниже. Большая часть данных о нахождении гидратов получена косвенным путём посредством сейсмических исследований, по результатам измерений во время бурения, по изменению минерализации поровой воды.



Рисунок 1.3 – Содержание углерода в известных мировых запасах углеводородов

Запасы газовых гидратов значительны, при этом часть из них расположена вблизи основных потребительских рынков. Возможность существования газовых гидратов, а также их свойства стали известны сравнительно недавно, поэтому вопрос относительно общей ресурсной базы пока еще остается открытым.

1.4. Влияние ингибиторов на процесс гидратообразования

В процессах добычи, подготовки и транспорта газа твердые газовые гидраты вызывают серьезные проблемы. Традиционным и основным методом борьбы с гидратообразованием в газовой промышленности является использование ингибиторов гидратообразования, таких, как метанол и гликоль [15, с.11]. Смешивают их в качестве компонентов с дистиллированной водой или хлористым кальцием. Непосредственно воздействуя на гидраты, ингибиторы снижают над ними давление водяных паров, способствуя постепенному разложению.

В конце прошлого века были разработаны принципиально новые ингибиторы гидратообразования кинетического действия, представляющие собой водорастворимые полимеры, в структуру которых входят атомы азота и кислорода [16, с. 25].

Ингибиторы гидратообразования подразделяются на три класса:

1) традиционные термодинамические ингибиторы – вещества, растворимые в воде, меняющие ее активность и смещающие трехфазное равновесие газ – водная фаза – газовые гидраты в сторону более низких температур;

2) кинетические ингибиторы гидратообразования, прекращающие на время процесс образования гидратов;

3) реагенты, практически предотвращающие (или резко замедляющие) отложение гидратов за счет частичной блокировки жидкой водной фазы, предотвращают прямой контакт газ – вода, обеспечивая тем самым многофазный транспорт продукции скважин в режиме гидратообразования.

В настоящее время на действующих месторождениях Крайнего Севера России в качестве ингибитора гидратообразования используется практически только метанол. Наибольшая эффективность метанола может быть в применении его в качестве предупреждения гидратообразования [17, с. 2].

Также для борьбы с газовыми гидратами применяются электролиты. Было установлено, что эффективным антигидратным реагентом является раствор хлористого кальция и водные растворы хлористого лития. Вместе с добываемыми

жидкостями на поверхности выносятся пластовые воды, содержащие растворенные соли. Замечено, что пластовые воды встречаются с достаточно низкой температурой замерзания. Этим мы можем сказать, что пластовые воды могут являться электролитами и вполне играть роль ингибиторов гидратообразования. Помимо электролитов применение имеют и такие антигидратные ингибиторы как этиленгликоль, диэтиленгликоль и триэтиленгликоль. По качествам гликоли сильные, но являются дорогостоящими, зато могут применяться повторно, так как при использовании отработанный раствор регенерирует.

Ингибиторы кинетического типа относятся к области нефтегазовой промышленности и могут иметь применение при добыче, подготовке и транспортировке природных газов. Принцип их действия основан на замедлении нуклеации и роста гидрата [18, с.34]. Использование в составе кинетического ингибитора реагентов обеспечивает экологическую безопасность ингибитора гидратообразования и окружающей среды, а низкие концентрации кинетических ингибиторов снижают расходы на хранение и логистику. Такие ингибиторы обладают низкой скоростью коррозии и совместимы с пластовыми флюидами [19, с.120].

1.5. Фильтрационно-ёмкостные свойства пласта. Закон Дарси

Свойства горной породы вмещать и пропускать через себя жидкость называются фильтрационно-ёмкостными свойствами. Нефтяной пласт представляет собой горную породу, пропитанную нефтью, газом и водой.

Фильтрационные и коллекторские свойства пород нефтяных пластов характеризуются следующими основными показателями [20, с.296]:

1. пористостью;
2. проницаемостью;
3. капиллярными свойствами;
4. удельной поверхностью;
5. механическими свойствами.

В гидродинамике рассматривается не движение отдельной частицы или слоя воды, а всей массы воды — фильтрационного потока — условного потока жидкости через пористую среду по сообщающимся порам и трещинам. Движение жидкости параллельно-струйчатого типа подчиняется линейному закону Дарси.

Закон Дарси устанавливает линейную зависимость между объемным расходом жидкости или газа и гидравлическим градиентом (уклоном, перепадом давления) в пористых средах [23, с. 88].

$$Q = \frac{kS\Delta P}{\mu L}, \quad (1.4)$$

где Q – объемный расход жидкости, $\text{м}^3/\text{с}$

k – коэффициент проницаемости среды, м^2

$S = \pi r^2$ – площадь поперечного сечения образца, м^2

ΔP – разность давлений, Па

μ – динамическая вязкость жидкости, $\text{Па} \times \text{с}$

L – длина фильтрующей части породы, м

В законе Дарси k — коэффициент проницаемости, характеризует среду и жидкость одновременно (зависит от размера частиц, от их формы и степени шероховатости, пористости среды, вязкости жидкости). Для жидкости коэффициент проницаемости при помощи формулы определяется так:

$$k = \frac{Q\mu L}{S\Delta P}, \quad (1.5)$$

Цель и задачи дипломной работы

Цель:

Экспериментальное изучение процессов образования газогидрата в искусственной монодисперсной пористой среде (МПС).

Задачи:

1. Провести экспериментальное исследования кинетики газогидратообразования в объёмной воде и в МПС
2. Выполнить сравнительный анализ результатов газогидратообразования в воде и в МПС
3. Исследовать влияние возможных последствий кинетических ингибиторов на фильтрационные свойства МПС

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

2.1. Методика проведения эксперимента гидратообразования в МПС

2.1.1. Блок-схема и принцип работы экспериментальной установки

Эксперименты по исследованию гидратообразования в пористых системах проводились на стенде кафедры «Механики многофазных систем» ТюмГУ для получения газовых гидратов в искусственной монодисперсной пористой среде, на рисунке 2.1 представлена блок-схема экспериментальной установки.

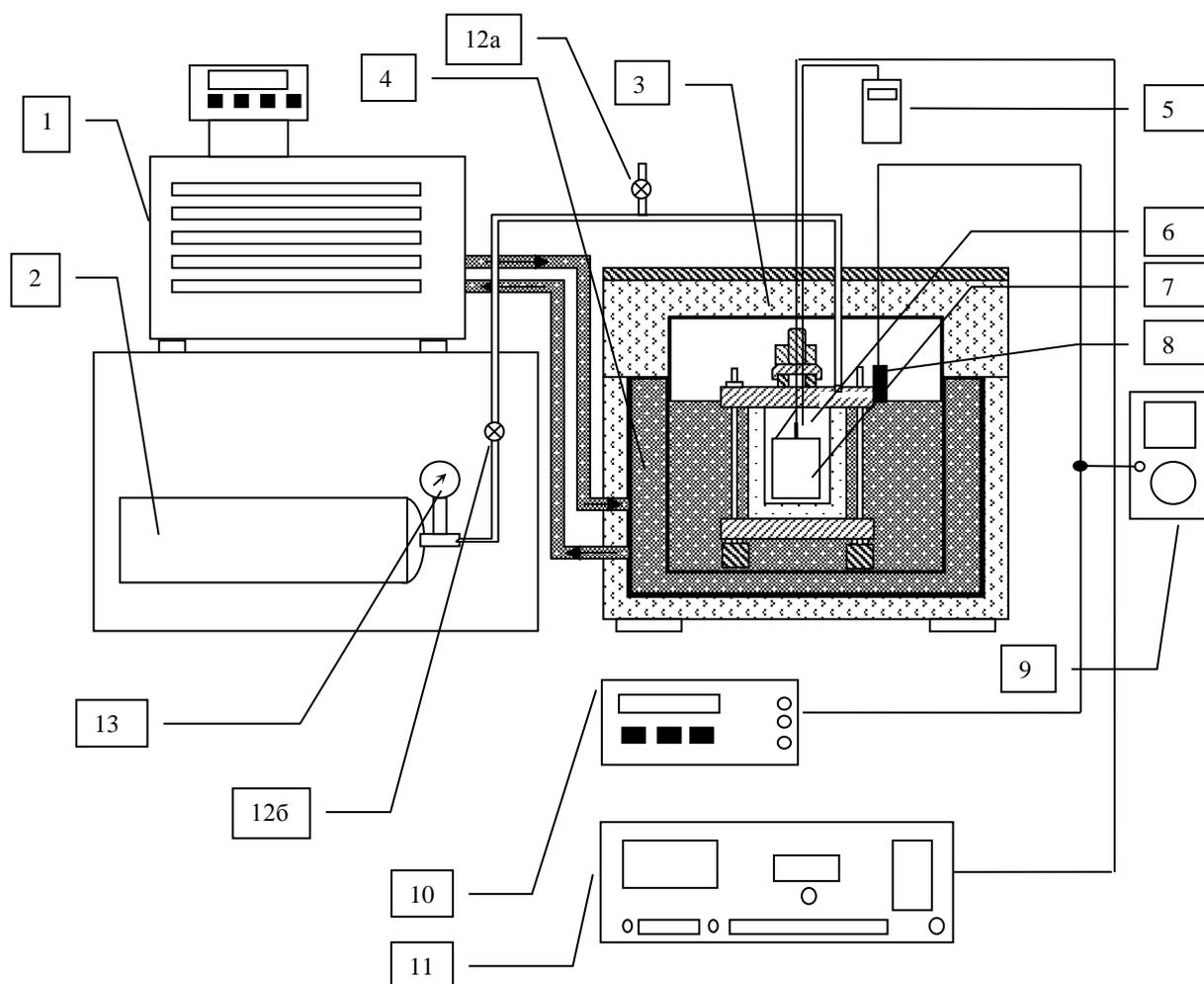


Рисунок 2.1 – Общая схема установки

Условные обозначения: 1 – термостат KRIO-VT-01, 2 – баллон с газом, 3 – крышка теплообменника, 4 – первый контур теплообменника, 5 – термистр, 6 – реактор, 7 – цилиндрический конденсатор, 8 – датчик давления, 9 – мультиметр, 10 – источник тока для датчика давления, 11 – куметр, 12a, 12б – игольчатые вентили для контроля давления, 13 – редуктор.

Для образования гидратов в ячейке реактора необходимо поддерживать определённый диапазон температур и давлений. Для изменения и поддержания температуры используется термостат *KRIO-VT-01* (1). Давление поддерживается при помощи баллона и вентилях (2, 12а, 12б). Контроль давления осуществляется датчиком, который крепится к реактору на отдельном патрубке. Схема подключения приведена на рис.2.2. Контроль температуры производится при помощи термистора (5).

Основным элементом установки является реактор высокого давления, где при контролируемых условиях образуются или диссоциируют газогидраты. Он представляет собой ячейку, изготовленную из плексигласа, в которую помещен цилиндрический конденсатор, позволяющий измерять диэлектрические параметры газогидрата. Ячейка имеет форму цилиндра с объемом около 294 см^3 . Толщина её стенки составляет 12 мм, что даёт возможность работать при давлениях до 1,6 МПа. Цилиндрический конденсатор имеет следующие геометрические размеры, показанные на рис. 2.2 и объем около 88 см^3 . В него помещается реагент (МПС) и закачивается газ (пропан).

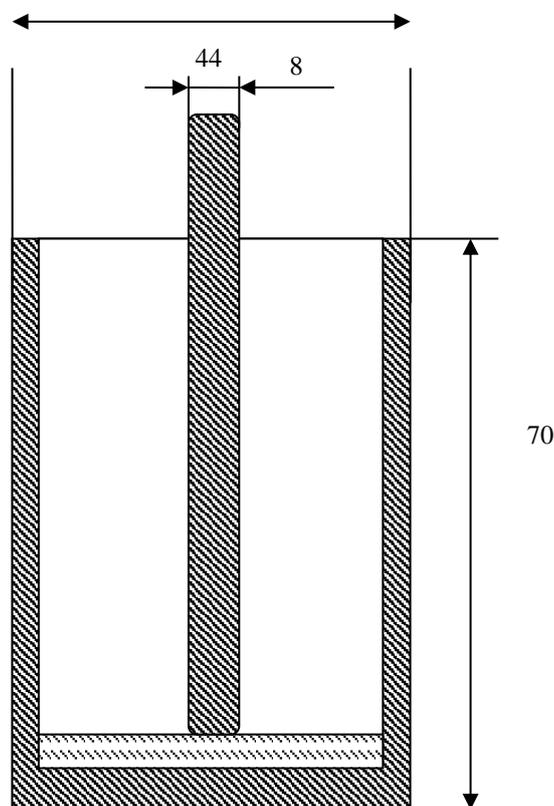


Рисунок 2.2 – Геометрические размеры конденсатора

Ячейка герметизируется фланцевым соединением. Контроль давления в реакторе осуществляется датчиком давления. С помощью вентиля (12а) можно понизить давление в реакторе или же полностью стравить газ, не прибегая к демонтажу реактора. Контроль температуры производится при помощи термистора Checktemp 1, встроенного в реактор. Для изменения и поддержания температуры используется термостат KRIO-VT-01. Конструктивной особенностью установки является возможность поддержания постоянного давления на протяжении большого промежутка времени. Поэтому в конструкции используются фитинговые соединения.

2.1.2. Подготовка исследуемого реагента

Перед тем как поместить исследуемый реагент в цилиндрический конденсатор (рис. 2.3), взвешивали его сухой вес. Затем высыпали нужное количество реагента в конденсатор и залили водой, чтобы его чуть скрыло. Подождали немного, пересыпали реагент в стеклянную ёмкость и взвесили его влажный вес. Это делалось для того, чтобы определить влажность исследуемого реагента по формуле:

$$\Phi = \frac{m(\text{вл}) - m(\text{сух})}{m(\text{сух})} \times 100\%, \quad (2.1)$$

где Φ - влажность

$m(\text{вл})$ - масса влажного вещества

$m(\text{сух})$ - масса сухого вещества

Влажность оказалась равной 14,8%.



Рисунок 2.3 – Цилиндрический конденсатор

Затем измерили пористость нашей среды используя формулу:

$$K_{\text{п}} = \frac{m(\text{воды})}{\rho(\text{воды}) \cdot V(\text{пор})} \cdot 100\%, \quad (2.2)$$

где $K_{\text{п}}$ - пористость

$m(\text{воды})$ - масса воды

$\rho(\text{воды})$ - плотность воды

$V(\text{пор})$ - объём пор образца

Пористость МПС равна 21,3%.

После того как измерили влажность и пористость, переложили реагент (а в нашем случае это стеклянные шарики) назад в цилиндрический конденсатор.

2.1.3. Проведение эксперимента

В реактор помещалось определённое количество стеклянных шариков (искусственная монодисперсная среда). Перед подачей газа система остужалась до наступления отрицательной температуры в реакторе до -10°C и оставалась на сутки, чтобы в конденсаторе с исследуемым реагентом образовался лёд. Затем образец насыщали газом, при давлении, выше давления насыщения, термостат выставляли на температуру до $2-4^{\circ}\text{C}$, и поддерживали постоянно на протяжении всего опыта.

В ходе эксперимента фиксировались значения давления, добротности, ёмкости от времени и контролировалась температура в реакторе с помощью термистора. Замеры производились до тех пор, пока давления не устанавливалось, это значения считаем равновесным. Стабильность протекания процесса гидратообразования обеспечивалась поддержанием в реакторе определенных термобарических условий. В частности, в наших экспериментах температура устанавливалась постоянной (2°C - МПС), (-4°C - объемная вода), а давление циклически подкачивалось до некоторого максимального значения.

О протекании процесса гидратообразования обычно судят по изменению массы гидратообразующего газа в объёме баллона. Изменение массы предположительно рассчитывается и контролируется с помощью электронных весов. В виду условий протекания процесса, выбранных нами, невозможно взвешивание реактора, поэтому о начале образования гидрата судим по значительному падению давления и по скачку ёмкости и добротности колебательного контура.

2.2. Экспериментальное исследование фильтрационных свойств МПС

2.2.1. Описание экспериментальной установки

Для проведения экспериментов по определению коэффициента проницаемости веществ и изучения фильтрационных свойств была сконструирована установка, позволяющая прокачивать и пропускать через образец пористой среды различные жидкости с постоянной скоростью и давлением. Принципиальная схема установки представлена на рисунке 2.4.

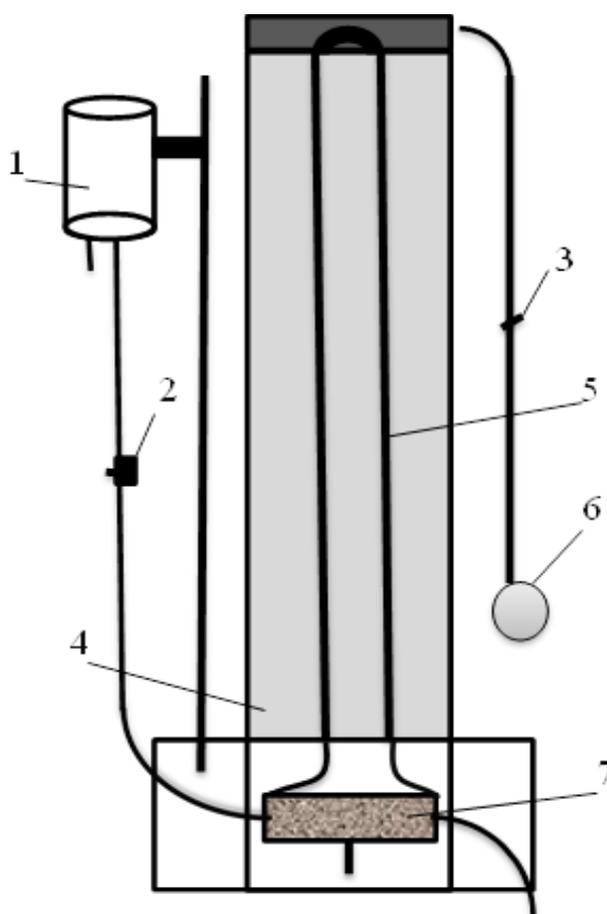


Рисунок 2.4 – Блок-схема фильтрационной установки

1 – резервуар для подачи жидкости, 2 – вентиль для регулирования скорости фильтрации, 3 – вентиль установки давления, 4 – стойка, 5 – манометр (мм вод.ст.), 6 – груша для закачки воздуха, 7 – камера для исследования образцов твердой фазы (в нашем случае модель пористой среды – стеклянные шарики)

Внешний вид установки изображён на рисунке 2.5.

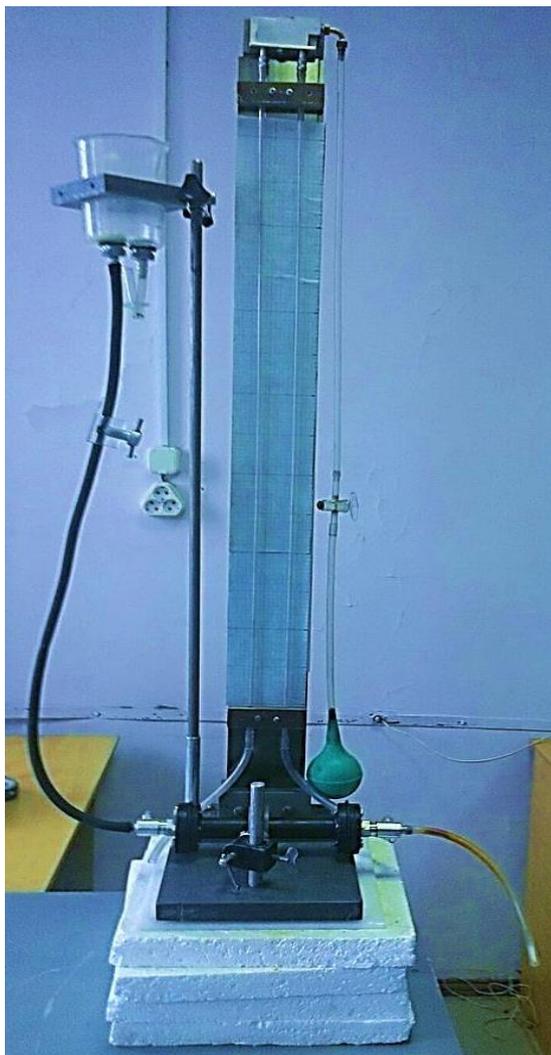


Рисунок 2.5. Фотография фильтрационной установки

2.2.2. Проведение эксперимента

1. Готовим реагент, засыпаем в камеру для исследования образцов твердой фазы (7).
2. Готовим растворы, в качестве образцов жидкой фазы были выбраны растворы неол, натриевый сульфатол и СВ-102, полученные путем смешивания с дистиллированной водой (растворы трёхпроцентные).
3. Заливаем в резервуар для подачи жидкости (1).
4. Далее по шлангу подается раствор в камеру с пористой средой.

5. Устанавливаем давление на столбе с помощью вентиля (2), для установки разности давлений открываем вентиль установки давления (3), сжимаем грушу для закачки воздуха (6), имеющую отверстие для запуска воздуха, при установке нужной планки давления плавно разжимаем грушу, закрываем вентиль.
- 5*. Перед установкой давления необходимо выкачать воздух, что делается при помощи груши и вентиля установки давления.
6. После этого раствор поступает в камеру, происходит процесс фильтрации, жидкость попадает в мензурку.
7. При установке течения производим замер объемного расхода, т.е. засекаем время и устанавливаем постоянный объём (в нашем случае равен 150 мл).
8. При каждом проведении эксперимента объем остается неизменным, при каждом замере меняем разность давлений, производим замер времени, соответствующего определенной разнице давлений.

Поскольку продуктивными коллекторами являются горные породы, содержащие поры и способные вмещать и фильтровать флюиды (нефть, газ, воду), такие как, к примеру, песчаники и алевролиты[26], то в качестве твердой фазы, помещаемой в камеру, была взята модель искусственной монодисперсной пористой среды. Монодисперсная среда представляет собой стеклянные шарики диаметром в 1 мм, пористость среды, рассчитанная по формуле (2.2), равна 25,3%. Изображение искусственной среды представлено на рисунке 2.4.

В качестве жидкой фазы были исследованы трёхпроцентные растворы, содержащие ингибиторы. В качестве кинетических ингибиторов гидратообразования были выбраны: неол, натриевый сульфатол, СВ-102. Наибольший интерес представляют именно эти ингибиторы, поскольку ранее на экспериментальной установке производились исследования газогидратообразования с учетом вышеуказанных кинематических

ингибиторов. Замеры проводились при комнатной температуре, ориентировочно равной 20-25 °С.



Рисунок 2.4 – Изображение искусственной монодисперсной пористой среды

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

3.1. Экспериментальные результаты исследования

газогидратообразования в МПС и в объёмной воде

3.1.1. Результаты исследования газогидратообразования на основе Р-Т метода

Был проведен ряд экспериментов, в результате которых был получен газовый гидрат в объёмной воде и во втором случае газогидрат в МПС. Основной упор в данной главе будет сделан на анализ результатов, полученных на воде и на МПС, а также на их сравнении.

По ходу эксперимента производилось наблюдение за изменением давления газа в реакторе и температуры в исследуемом образце, что позволяло проследить динамику изменения термобарических условий во времени. Во всех экспериментах по гидратообразованию наблюдалось закономерное изменение (падение) давления до равновесного значения. Результатом экспериментальных измерений в объёмной воде являются кривые изменения давления от времени, которые представлены на рисунке 3.1. При этом температура в реакторе и частота на протяжении всего эксперимента были постоянными $T = -4^{\circ}\text{C}$ и частоте $f = 450 \text{ кГц}$.

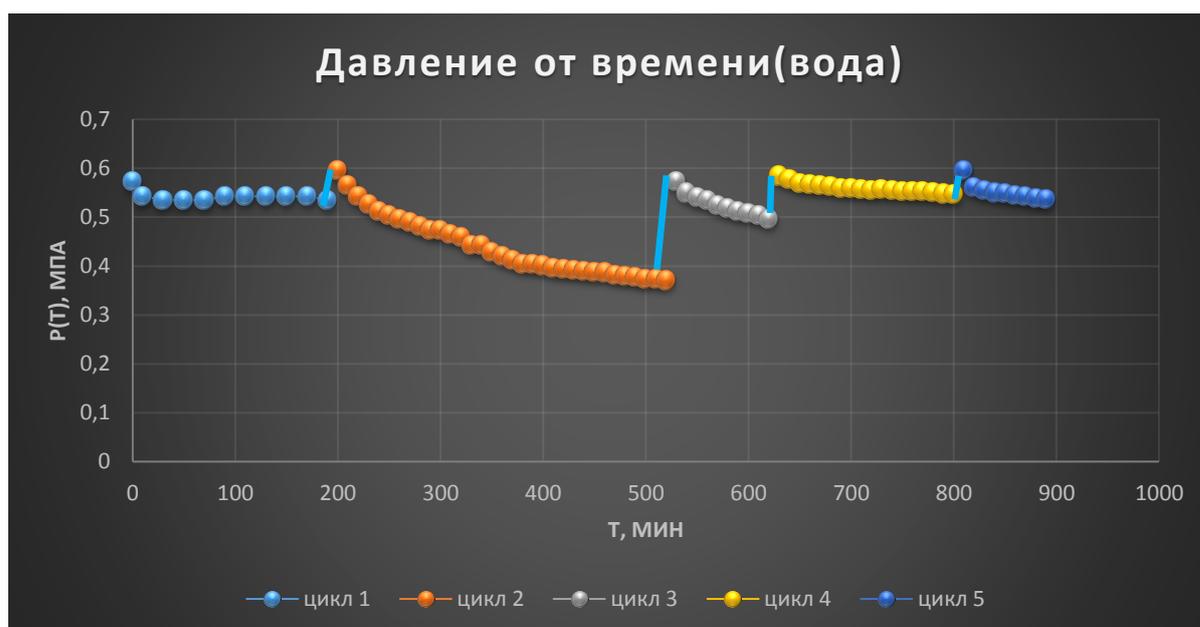


Рисунок 3.1 – График зависимости давления газогидратообразования от времени в объёмной воде за 5 циклов

Аналогичные измерения были произведены и для МПС. На следующем рисунке представлены графики зависимости давления от времени для четырех циклов при гидратообразовании в МПС. Температура в реакторе в этом эксперименте достигла постоянного значения $T=2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

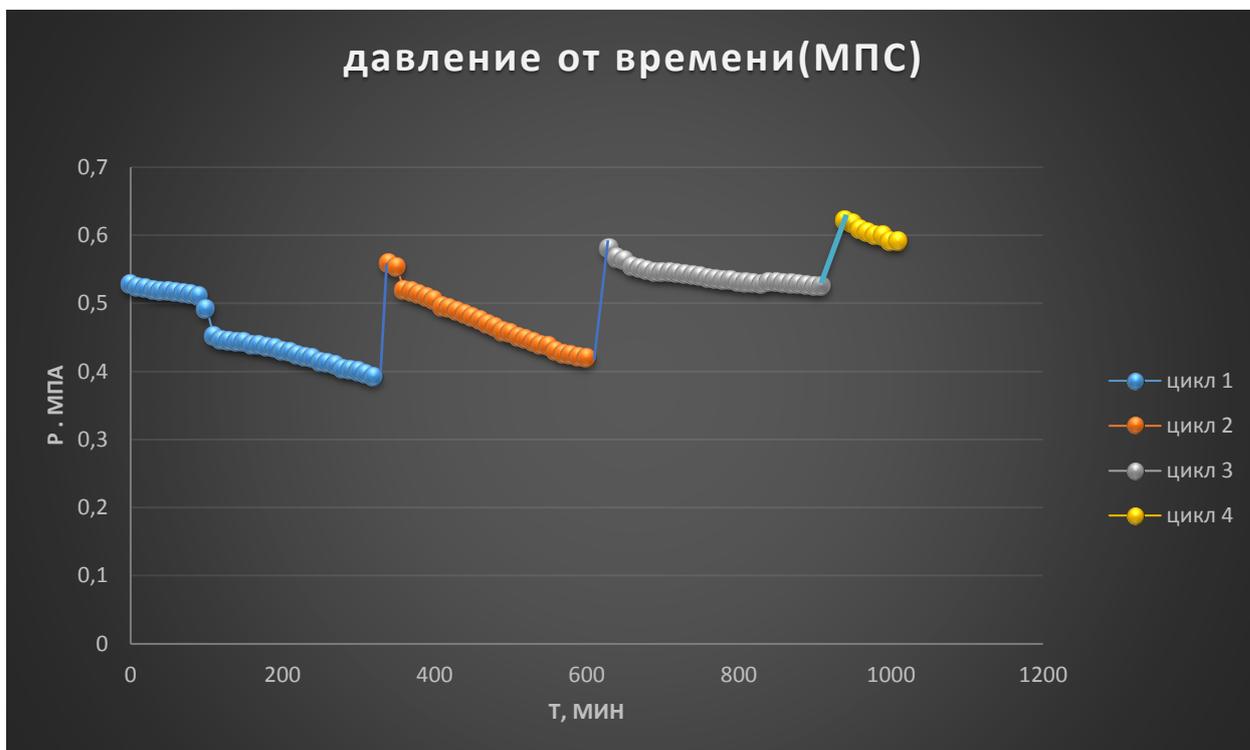


Рисунок 3.2 – График зависимости давления газогидратообразования от времени в МПС за 4 цикла

3.1.2. Время релаксации и обработка результатов измерений с помощью кривых релаксации

Результатом экспериментальных измерений P-T методом являются кривые изменения давления от времени. Рассмотрим каждый цикл в отдельности.

Функциональная зависимость падения давления в реакторе при росте газогидрата в пористой среде выглядит следующим образом:

$$P(t) = P_1(t) + P_2(t) , \quad (3.1)$$

где $P_1(t)$ – слагаемое, характеризующее изменение давления за счет роста газогидрата из водной фазы, $P_2(t)$ – слагаемое, характеризующее изменение давления за счет растворения газа в пористой среде.

$$P_1(t) = \varphi \cdot P_B(t), \quad (3.2)$$

$$P_2(t) = (1 - \varphi) \cdot P_{\text{мпс}}(t), \quad (3.3)$$

где φ – объемное содержание воды в поровом пространстве МПС (в долях единицы), $P_B(t)$ – изменение давления при газогидратообразовании в воде, $P_{\text{мпс}}(t)$ – изменение давления при растворении газа в пористой среде.

P_B и $P_{\text{мпс}}$ являются функцией времени и находятся из эксперимента.

Проводя эксперимент по газогидратообразованию на воде, нами были получены циклические кривые падения давления. Функциональная зависимость, описывающая падение в каждом цикле, будет иметь следующий вид:

$$P_B(t) = P_{\text{нас}}^B + (P_{\text{max}} - P_{\text{нас}}^B) \exp(-t/\tau_B), \quad (3.4)$$

где $P_{\text{нас}}^B$ – давление насыщения (равновесия) для воды, P_{max} – максимальное давление в цикле, τ_B – время релаксации, за которое давление упадет в e раз, характеризующее скорость газогидратообразования.

Видно, что при подстановке начальных и конечных условий, выполняются следующие равенства:

$$\begin{aligned} \text{при } t=0, P_B(t) &= P_{\text{max}}; \\ \text{при } t=\infty, P_B(t) &= P_{\text{нас}} \end{aligned} \quad (3.5)$$

Тогда, из уравнения (3.4) получим:

$$\exp(-t/\tau_B) = \frac{(P_i(t) - P_{\text{нас}}^B)}{(P_{\text{max}} - P_{\text{нас}}^B)}, \quad (3.6)$$

где $P_i(t)$ – давление, соответствующее данному моменту времени.

Получив график в координатах $\exp(-t/\tau_B)$ от t , построим экспоненциальную линию тренда и определим время релаксации τ_B .

Аналогичной функциональной зависимостью описывается процесс растворения газа в МПС:

$$P_H(t) = P_{\text{нас}}^H + (P_{\text{max}} - P_{\text{нас}}^H)\exp(-t/\tau_H) \quad (3.7)$$

Таким же способом вычисляем время релаксации $\tau_{\text{мпс}}$:

$$\exp(-t/\tau_{\text{мпс}}) = \frac{(P_i(t) - P_{\text{нас}}^{\text{мпс}})}{(P_{\text{max}} - P_{\text{нас}}^{\text{мпс}})}. \quad (3.8)$$

Результаты получившего времени релаксации для каждого цикла МПС и объёмной воды представлены в таблице 3.1 и 3.2, а также приведены на одном графике на рисунке 3.3

Таблица 3.1

Время релаксации для объёмной воды

№ цикла	β	τ , мин	τ , часы
2	0,015	66,66667	1,111111
3	0,007	142,8571	2,380952
4	0,006	166,6667	2,777778
5	0,004	250	4,166667

Таблица 3.2

Время релаксации для МПС

№ цикла	β	τ , мин	τ , часы
1	0,001	1000	16,66667
2	0,003	333,3333	5,555556
3	0,003	333,3333	5,555556
4	0,006	166,6667	2,777778
5	0,008	125	2,083333

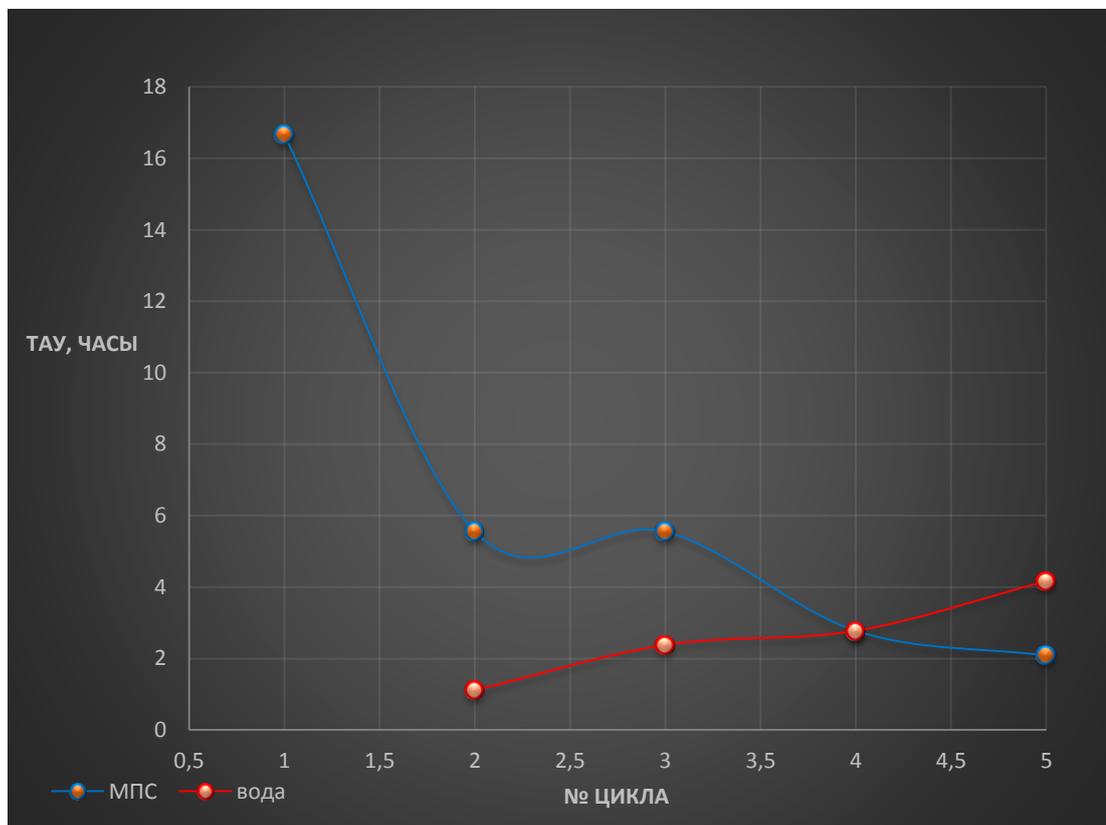


Рисунок 3.3 – Зависимость времени релаксации от номера цикла для объемной воды и МПС

На рисунке 3.4 для примера представлен график релаксации зависимости приведенного давления газа от времени при $T=-4^{\circ}\text{C}$ для одного из циклов в объемной воде.

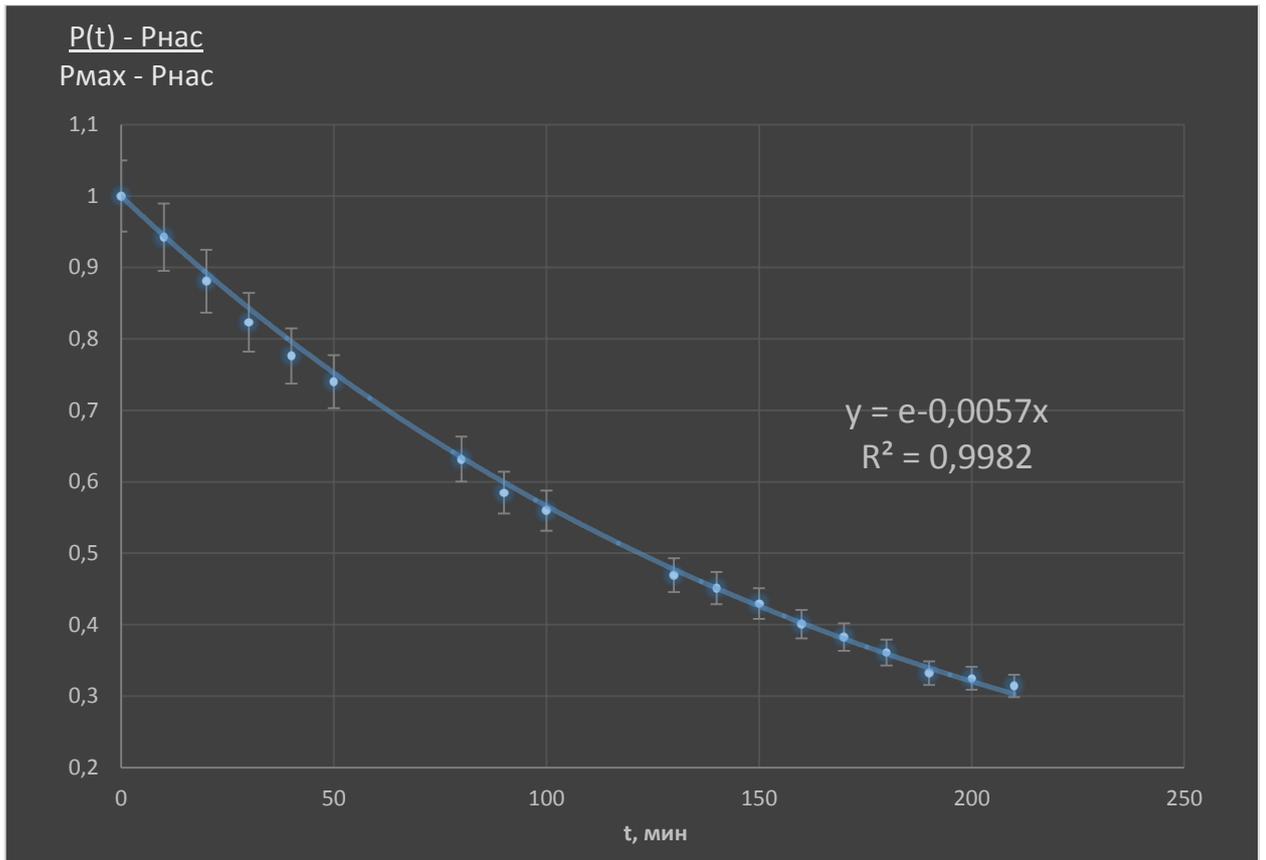


Рисунок 3.4 – График релаксации зависимости приведенного давления газа от времени при $T = -4^{\circ}\text{C}$ (объемная вода, 3-й цикл)

Аппроксимируя эту зависимость экспонентой, можно найти β -величину, обратную времени релаксации-кинетический коэффициент роста газогидрата для каждого цикла. Аналогичным образом аппроксимируются результаты всех циклов для воды и для МПС. Результатом является зависимость скорости роста газогидрата от номера цикла для воды и пористой среды (рис. 3.5).

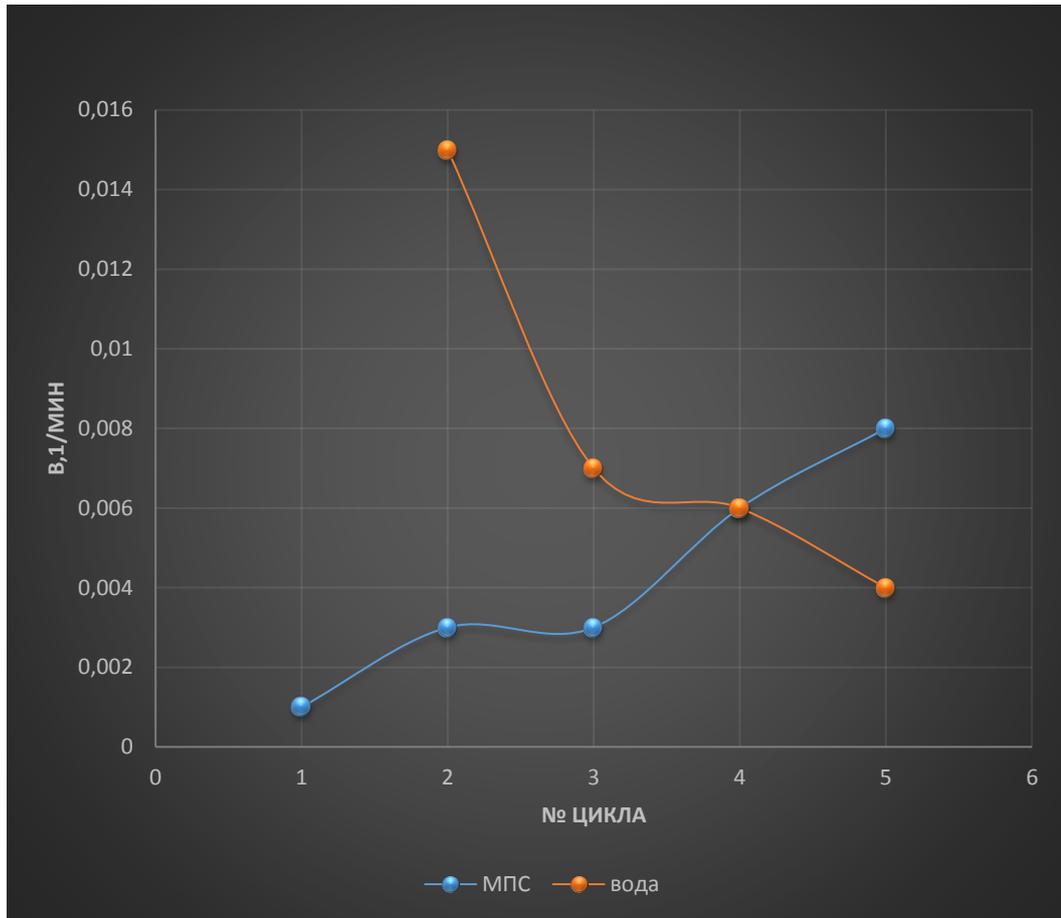


Рисунок 3.5 – Зависимость скорости роста газогидрата от номера цикла для объемной воды и МПС

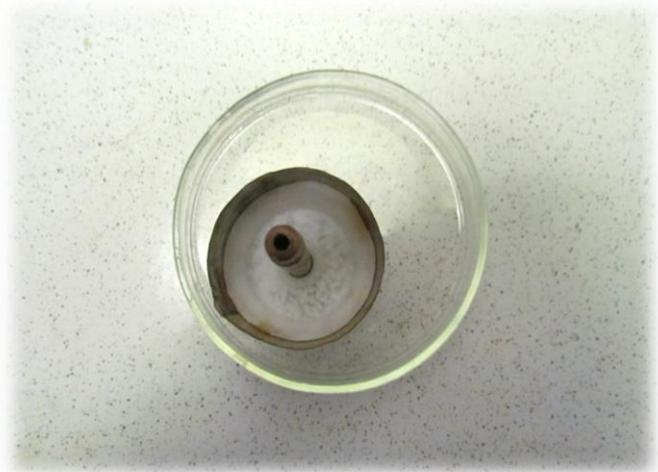
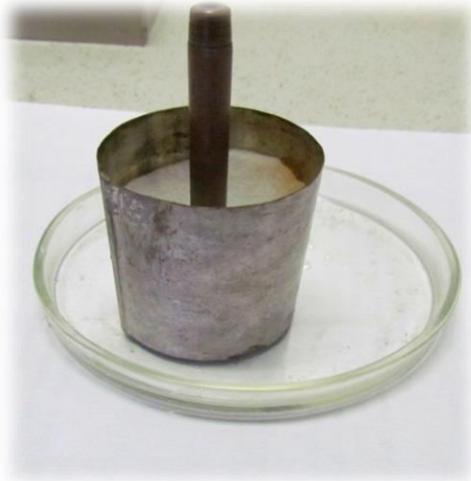
Таким образом, мы показали, что скорость роста газогидрата в модельной пористой среде (МПС) увеличивается с увеличением цикла, а в объёмной воде уменьшается вследствие образования слоя на поверхности воды газогидрата, который препятствует проникновению газа в воду.

3.1.3. Фотографии полученных газогидратов в объемной воде и МПС

На следующих рисунках будут представлены фотографии полученных газогидратов в объемной воде и монодисперсной пористой среде.



Рисунки 3.6, 3.7, 3.8 – фотографии газогидрата в объёмной воде



Рисунки 3.9, 3.10, 3.11, 3.12 – фотографии газогидрата в МПС

3.2. Исследование фильтрационных свойств искусственной монодисперсной пористой среды при участии кинетических ингибиторов гидратообразования

Проведен сравнительный анализ следующих кинетических ингибиторов гидратообразования (КИГ): неонол, натриевый сульфанола, СВ-102. Так как доля использования ингибиторов в борьбе с газогидратами возросла, появилась необходимость определения возможных последствий применения ингибиторов низкой дозировки. Поскольку реагент после разделения и очистки сырья попадает в систему поддержания пластового давления и невольно оказывается в пласте вместе с попутной водой, поэтому встает вопрос о влиянии раствора (реагента и воды) на возможное ухудшение фильтрационных свойств при утилизации попутно добываемой воды.[25, с. 90]

Для проведения испытаний были выбраны ранее изученные нами три реагента: неонол, натриевый сульфанола, СВ-102. Поскольку реагент попадает в область попутной воды, нами были приготовлены три трёхпроцентных раствора, содержащих один из ингибиторов. Были проведены испытания на экспериментальной установке (рис. 2.4), способной пропускать через образец породы, в нашем случае монодисперсную пористую среду, различные жидкости с определенной скоростью и перепадом давления. Из хода эксперимента выявлена зависимость объёмного расхода раствора от перепада давлений. На следующих рисунках будут показаны графики зависимости объёмного расхода от перепада давления при фильтрации вышеуказанных ингибиторов.

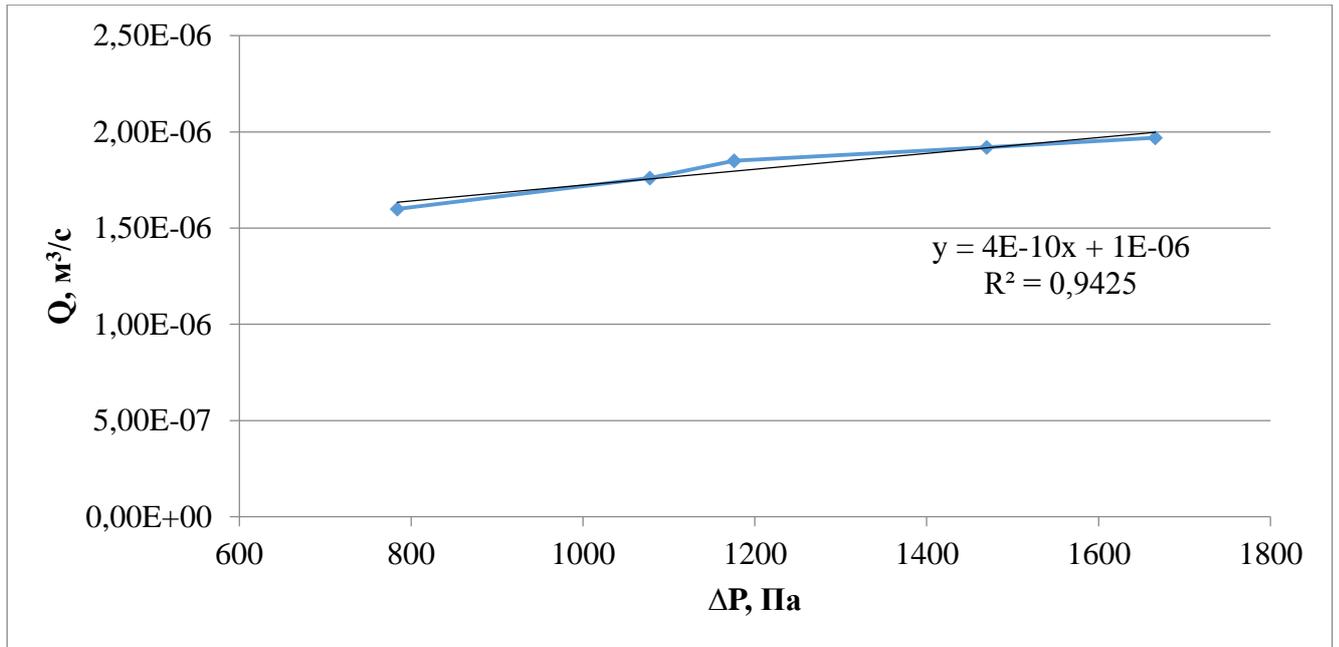


Рисунок 3.13 – Зависимость объемного расхода от перепада давления при фильтрации дистиллированной воды

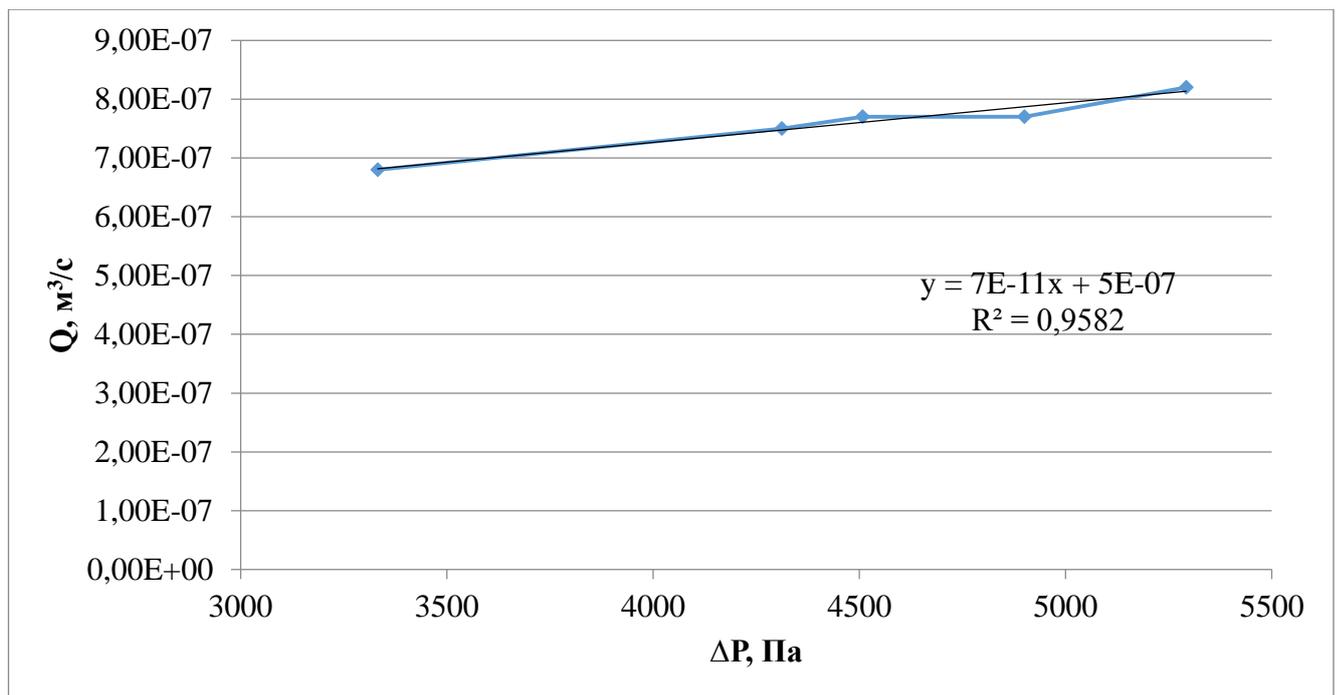


Рисунок 3.14. – Зависимость объемного расхода от перепада давления при фильтрации водного раствора неанола АФ 9-12 (3%)

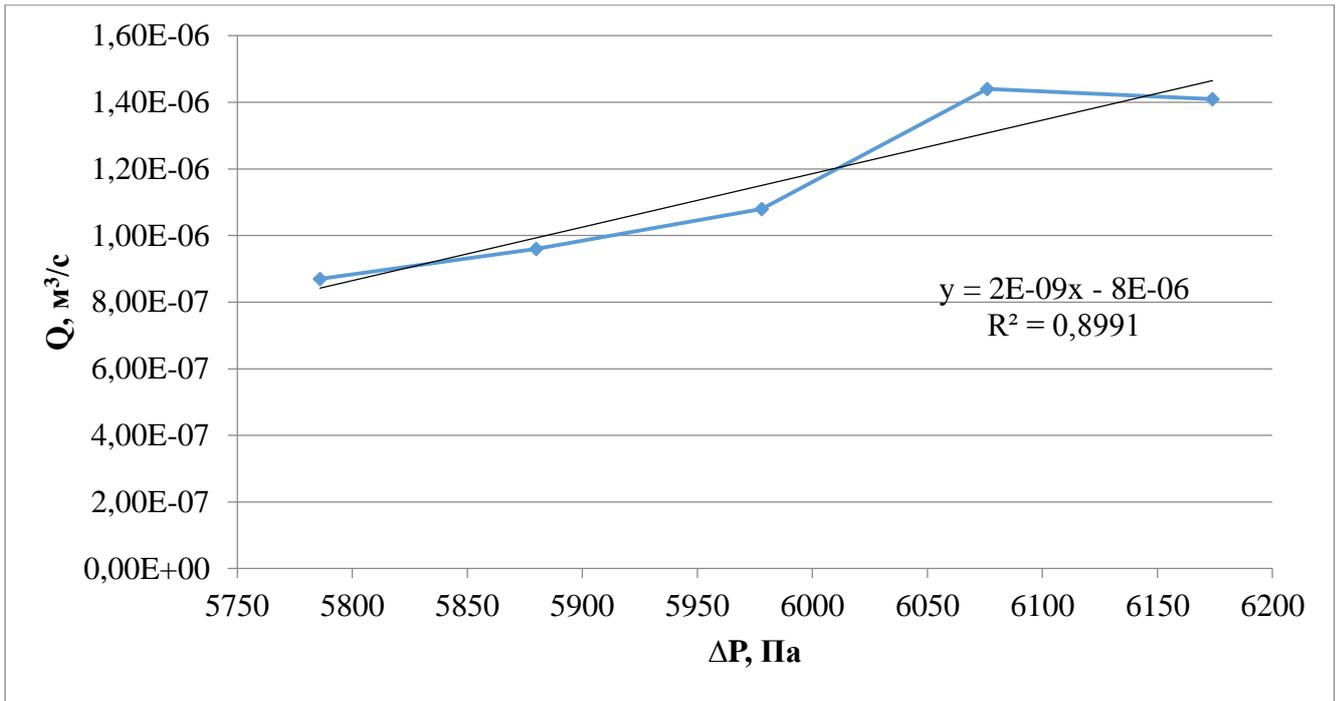


Рисунок 3.15 – Зависимость объемного расхода от перепада давления при фильтрации водного раствора натриевого сульфанола (3%)

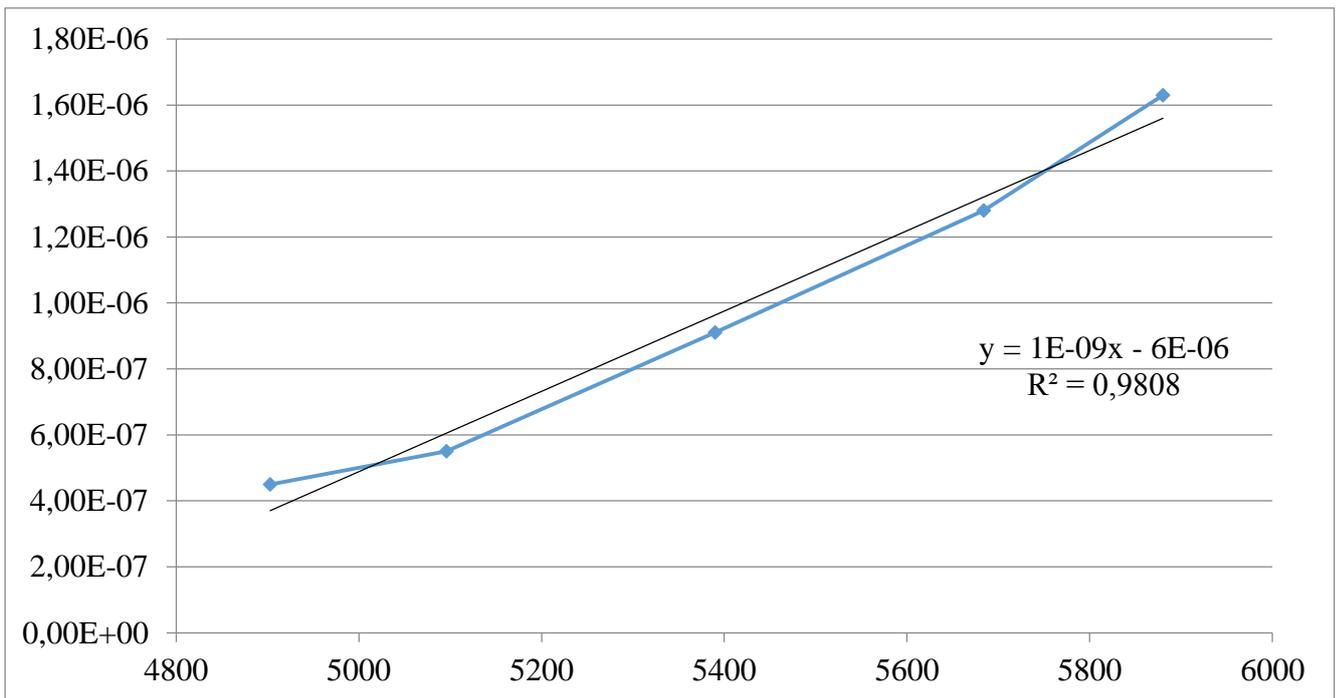


Рисунок 3.16 – Зависимость объемного расхода от перепада давления при фильтрации водного раствора СВ-102(3%)

Закон Дарси устанавливает линейную зависимость между объемным расходом жидкости или газа и перепадом давления в пористых средах. Закон является эмпирическим и вполне адекватно описывает характер фильтрации жидкости через пористую среду. Поскольку полученные значения в эксперименте несут пропорциональный характер, был введен коэффициент системной ошибки на разность давления, который позволил построить зависимости из начала координат (рис. 3.17-3.20)

Таблица 3.3

Поправочные коэффициенты для КИГ

Вещество	Поправочный коэффициент, Па
Дистиллированная вода	$P^* = -2500$
Раствор (дистилл.вода +неонол, 3%)	$P^* = -7140$
Раствор (дистилл.вода +натриевый сульфано́л, 3%)	$P^* = 4000$
Раствор (дистилл.вода +СВ-102, 3%)	$P^* = 4500$

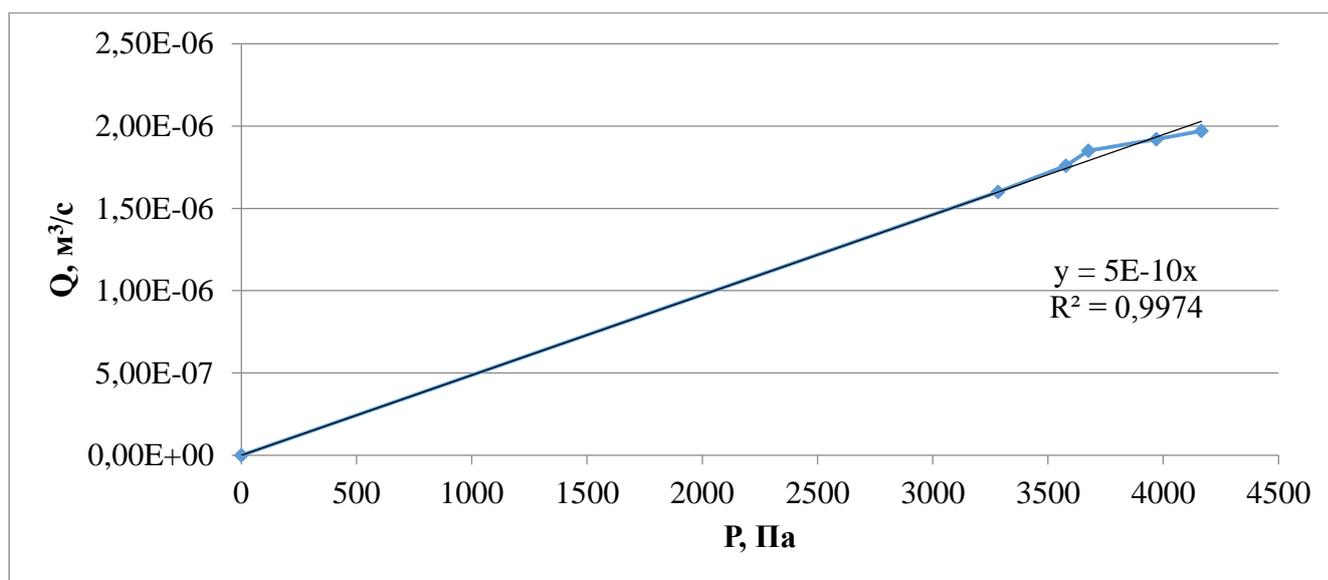


Рисунок 3.17 - Зависимость объемного расхода от перепада давления при фильтрации дистиллированной воды с учетом коэффициента

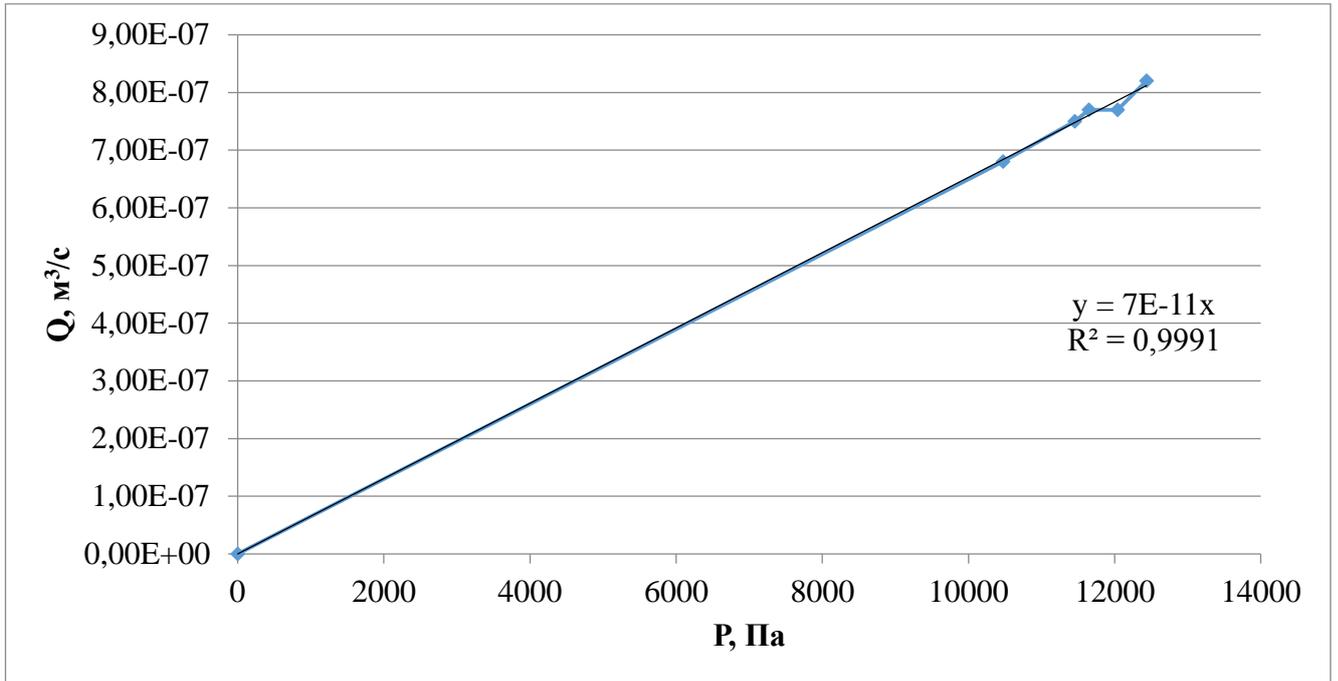


Рисунок 3.18 – Зависимость объемного расхода от перепада давления при фильтрации водного раствора неанола АФ 9-12 (3%) с учетом коэффициента

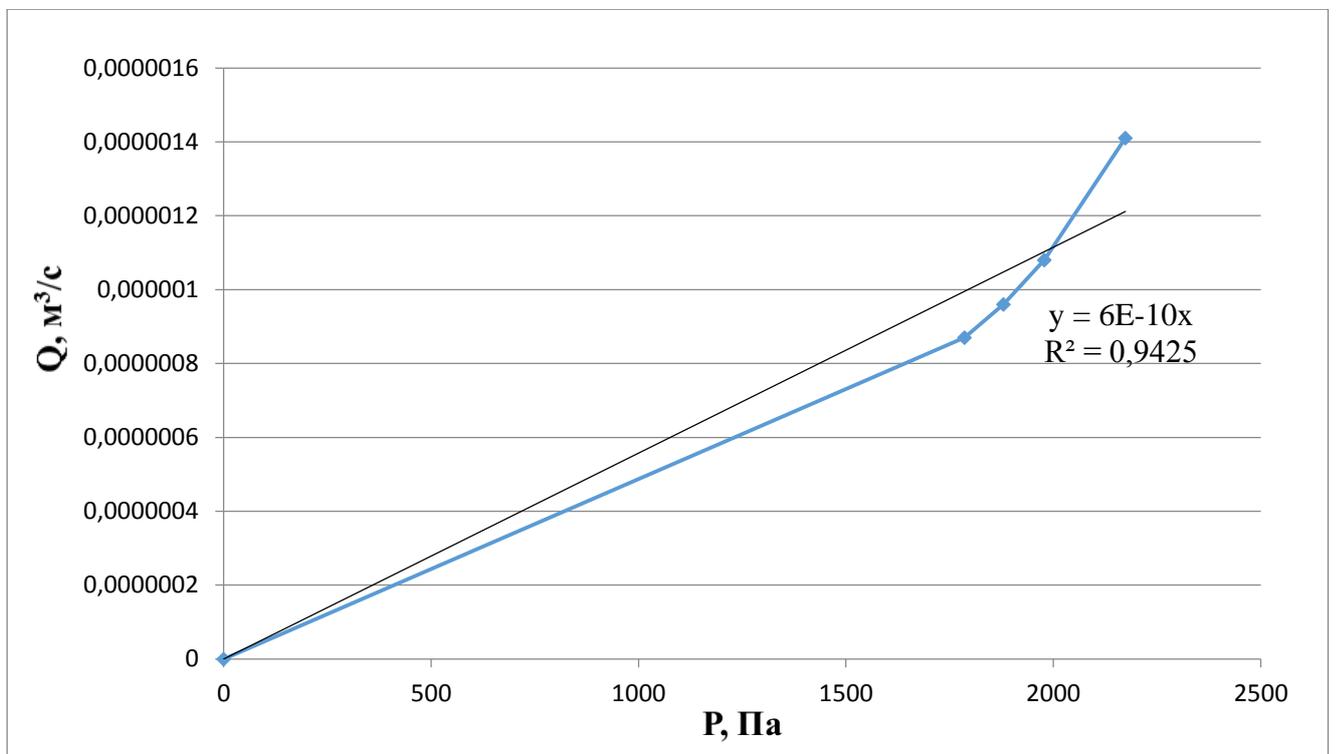


Рисунок 3.19 – Зависимость объемного расхода от перепада давления при фильтрации водного раствора натриевого сульфанола (3%) с учетом коэффициента

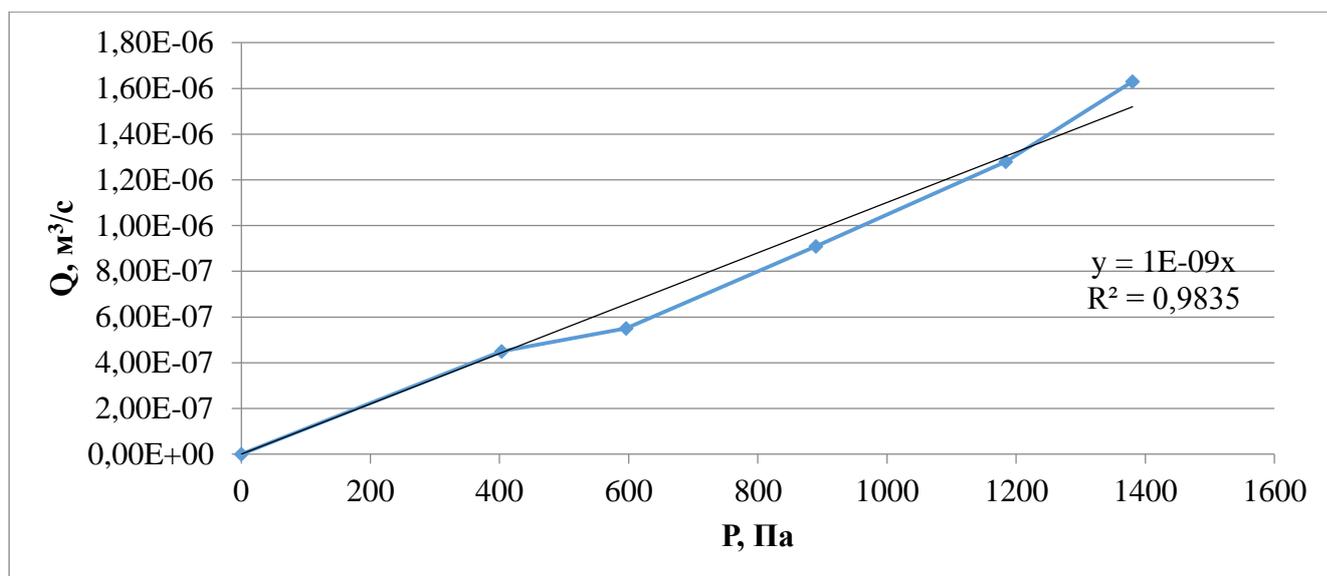


Рисунок 3.20 – Зависимость объемного расхода от перепада давления при фильтрации водного раствора СВ-102 (3%) с учетом коэффициента

Методика расчёта коэффициентов

Из полученных уравнений $y=ax+b$ на графиках рассчитываем коэффициенты проницаемости. Учитывая уравнение Дарси (1.5), можем представить уравнение в виде:

$$Q = a\Delta P + C, \quad (3.9)$$

где $a = \frac{kS}{L\mu}$

Соответственно коэффициент проницаемости будет равен $k = \frac{a\mu L}{S}$. Для удобства расчётов, был введён постоянный коэффициент $A = \frac{S}{L\mu} = 2$. Поэтому мы можем записать, что $k = \frac{a}{2}$. Ниже представлены величины коэффициентов.

Таблица 3.4

Результаты расчётов коэффициентов проницаемости, полученных из графиков с учётом поправочных коэффициентов

Вещество	Коэффициент проницаемости k , 10^{-10} м^2	Коэффициент проницаемости k , Дарси	Достоверность аппроксимации R^2
Дистиллированная вода	2,50	253,3	0,9974
Раствор (дистилл.вода +неонол, 3%)	0,35	35,2	0,9991
Раствор (дистилл.вода +натриевый сульфанола, 3%)	3	301,4	0,9425
Раствор (дистилл.вода +СВ-102, 3%)	5	507,5	0,9835

Показано, что ингибиторы типа натриевый сульфанола и СВ-102 имеют коэффициент проницаемости выше, чем у воды, и поэтому улучшают фильтрационные свойства (особенно можем выделить ингибитор СВ-102, у которого коэффициент проницаемости в 2 раза выше, чем у воды). Значение k раствора неонола АФ 9-12 ниже, чем у воды в 7 раз, следовательно, он ухудшает фильтрационные свойства пористой среды и использование данного ингибитора нецелесообразно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы было проведено экспериментальное изучение процессов образования газогидрата в искусственной монодисперсной пористой среде (МПС) и в объемной воде, выполнен их сравнительный анализ результатов. Также была проведена серия экспериментов по изучению свойств кинетических ингибиторов гидратообразования (КИГ), а также оценка возможных последствий воздействия КИГ на фильтрационные свойства пласта при утилизации их вместе с попутно-добываемой водой.

Нами выполнен ряд поставленных задач, а именно:

1) Исследованы процессы гидратообразования (ГГ) в искусственной монодисперсной пористой среде (стеклянных шариках) диаметром 1 мм и в объемной воде.

2) Построены кривые изменения давления от времени для МПС и объемной воды с помощью Р-Т метода.

3) Построен график зависимости скорости роста газогидрата от номера цикла. Выявлено, что скорость роста газогидрата в модельной пористой среде (МПС) увеличивается с увеличением цикла, а в объемной воде уменьшается.

4) Были проведены экспериментальные исследования зависимости объемного расхода от перепада давления для воды и водных растворов ингибиторов гидратообразования. Используя уравнение Дарси, рассчитаны соответствующие коэффициенты проницаемости k .

5) Показано, что ингибиторы типа натриевый сульфанол и СВ-102 имеют коэффициент проницаемости выше, чем у воды, и поэтому улучшают фильтрационные свойства (особенно можем выделить ингибитор СВ-102, у которого коэффициент проницаемости в 2 раза выше, чем у воды). Значение k раствора неонол АФ 9-12 ниже, чем у воды в 7 раз, следовательно, он ухудшает фильтрационные свойства пористой среды и использование данного ингибитора нецелесообразно.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Макогон Ю.Ф. Газогидраты. История изучения и перспективы освоения // Геология и полезные ископаемые Мирового океана, №2, 2010.
2. Дядин Ю.А., Гушин А.Л. Газовые гидраты. // Соросовский образовательный журнал, №3, 1998, с. 55–64.
3. Соловьёв В. А. Природные газовые гидраты как потенциальное полезное ископаемое. // Российский химический журнал, т. 48, №3, 2003, с. 59-69.
4. Von Stackelberg, M. Feste gashydrate. Naturwissenschaften, 36, 1994, с. 327-333.
5. Макогон Ю.Ф. Гидраты природных газов. М.: Недра, 1974, с.208.
6. Истомин В.А., Якушев В.С., Махонина Н.А. и др. Самоконсервация газовых гидратов // Газовые гидраты, 2006, с.36-46.
7. Barrer R.M., Edge A.V.J. Gas hydrates containing argon, krypton, and xenon: kinetics and energetics of formation and equilibria. Proc. R. Soc. Lond. A300, 1967, с. 1-24.
8. Макогон Ю. Ф. Природные газовые гидраты: распространение, модели образования, ресурсы. // Российский химический журнал, т. 48, №3, 2003, с. 70-79.
9. Бык С.Ш., Макогон Ю.Ф., Фомина В.И. Газовые гидраты. - М., Химия, 1980, с. 157.
10. Stern L., Circone S., Kirby S, Durham W. SEM imaging of gas hydrate formation process and growth textures, and comparison to natural hydrates of marine and permafrost origin // Proceeding of the 5th International Conference on Gas Hydrates, Trondheim, Norway, 2005, с. 300-309.
11. Enveros A.I., Heathman J., Ralstin J. Impermeation of porous media by forming hydrates in situ // Journal of petroleum technology, Septemder, 1971, с. 1059-1066.
12. Федосеев С.М., Ларионов В.Р. Исследование гидратообразования в пористой среде // Газовые гидраты, 2006, с. 28-31.

13. Чувилин Е.М., Козлова Е.В. Исследования формирования мерзлых гидратосодержащих пород // Криосфера Земли, т. 9, №1, . 2009, с. 73-80.

14. Макогон Ю. Ф. Природные газовые гидраты: распространение, модели образования, ресурсы. // Российский химический журнал, т. 48, №3, 2003, с.70-79.

15. Макогон Ю.Ф. Природные газогидраты: открытие и перспективы // Газовая промышленность, №5, 2001, с. 10-16.

16. Макогон Ю.Ф. Условия образования гидратов при транспорте газа // ВНИИЭ газпром, 1969, с.10-17.

17. Бык С.Ш., Макогон Ю.Ф., Фомина В.И. Газовые гидраты. М.: Химия, 1980. 296 с.

18. Инербаев Т. М. и др. Динамические, термодинамические и механические свойства газовых гидратов структуры I и II. // Российский химический журнал, т. 48, №3, 2003, с. 19-27.

19. Грунвальд А.В. Использование метанола в газовой промышленности в качестве ингибитора гидратообразования и прогноз его потребления до 2030 г. //Нефтегазовое дело, 2007 – 2с.

20. Бык С.Ш. Исследование условий образования гидратов природного газа // Газовая промышленность, №7, 1957, с. 33 – 35.

21. Сравнение эффективности ингибиторов гидратообразования кинетического типа и опыт их промышленного применения Фаресов А.В. Пономарёв А.И. Круглов Е.А. Баряев А.П. Нефтегазовое дело. Вести газовой науки- № 2 (26) / 2016 «Актуальные проблемы добычи газа» 2016 – 117-122 с.

22. Бык С.Ш., Макогон Ю.Ф., Фомина В.И. Газовые гидраты. М.: Недра, 1980, с. 296.

23. Гриценко А.И., Истомина И.А., Кульков А.Н., Сулейманов Р.С. Сбор и промысловая подготовка газа на северных месторождениях России – М.: ОАО «Издательство Недра», 1999 – 473с.

24. Штайн А.В., Семихин В.И. (ТюмГУ), Кутушев А.Г., Тимерзянова И.И. (ТюмГАСУ). Теплофизика, гидродинамика, теплотехника – выпуск №3 ТМНМС //

Сидементационно-оптический метод дисперсного анализ магнитных жидкостей, 2008, 227 – 233 с.

25. Фаресов А.В., Пономарев А.И. Исследование эффективности ингибиторов гидратообразования кинетического типа // Нефтегазовое дело. 2013. Т.11, № 4. 86-95 с.

26. Цюрюпа Н. Н. Курс коллоидной химии. СПб.: Химия, 1995.

27. Фаресов А.В., Пономарев А.И. Исследование эффективности ингибиторов гидратообразования кинетического типа // Нефтегазовое дело. 2013. Т.11, № 4. 86-95 с.

28. Гурьева О.М. Гидратообразования при захоронении CO_2 в криолитозоне, Москва – 2011, с. 66 – 69.

29. Леонтьев Н.Е. Основы теории фильтрации: Учебное пособие. – М.: Издательство ЦПИ при механико-математическом факультете МГУ, 2009. – 88с.

30. Фатыхов М.А., Багаутдинов Н.Я. Разработка методики определения и экспериментальные исследования диэлектрических параметров газового гидрата в области высоких частот // Нефтегазовое дело, 2006.

31. Сморгин Г.И. Теория и методы получения искусственного льда //Новосибирск: Наука. Сиб. Отд-ние, 1988. С.282.

32. Parrish W.R., Prausnitz J.M. Dissociation pressures of gas hydrates formed by gas mixtures // Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop, 1972. V.11. № 1. P.26–35.

33. Munk J., Skjold-Jorgensen S., Rasmussen P. Computations of the formation of gas hydrates // Chem. Eng. Sci., 1988. V.43. № 10. P.2661–2672.

34. Якуцени В.П. Газогидраты- нетрадиционное газовое сырьё, их образование, свойства, распространение и геологические ресурсы // Нефтегазовая геология. Теория и практика, 2013- 2 стр.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Исходные данные эксперимента №1 (объёмная вода)

время	$t_{\text{реак}}$		$T_{\text{терм}}, ^\circ\text{C}$	P		
	mV	$^\circ\text{C}$		mA	MPa	
						1 цикл
12:40		-6,5	-2	9,7	0,573452	
13:00		-8,5		9,3	0,542908	
13:20		-6,1		9,2	0,535272	
13:40		-4,4		9,2	0,535272	
14:00		-3,3		9,2	0,535272	
14:20		-2,2		9,3	0,542908	
14:40		-1,4		9,3	0,542908	
15:00		-1		9,3	0,542908	
15:20		-0,4		9,3	0,542908	
15:40		0		9,3	0,542908	
16:00		0,1		9,2	0,535272	
						2 цикл
12:40				10	0,59636	
12:50				9,6	0,565816	
13:00			-4	9,3	0,542908	
13:10				9,1	0,527636	
13:20				8,9	0,512364	
13:30				8,8	0,504728	
13:40				8,7	0,497092	
13:50				8,6	0,489456	
14:00				8,5	0,48182	
14:10				8,4	0,474184	
14:20				8,4	0,474184	
14:30				8,3	0,466548	
14:40				8,2	0,458912	
14:50				8	0,44364	
15:00				8	0,44364	

15:10				7,8	0,428368	
15:20				7,7	0,420732	
15:30				7,6	0,413096	
15:40				7,5	0,40546	
15:50				7,48	0,403933	
16:00				7,45	0,401642	
16:10				7,37	0,395533	
16:20				7,36	0,39477	
16:30				7,32	0,391715	
16:40				7,31	0,390952	
16:50				7,27	0,387897	
17:00				7,26	0,387134	
17:10				7,2	0,382552	
17:20				7,17	0,380261	
17:30				7,13	0,377207	
17:40				7,09	0,374152	
17:50				7,09	0,374152	
18:00				7,05	0,371098	
						3 цикл
13:10		3,7		9,7	0,573452	
13:30		7,6		9,4	0,550544	
13:50		6,4		9,27	0,540617	
14:10		5,8		9,2	0,535272	
14:30		5,3		9,06	0,524582	
14:50		4,8		8,99	0,519236	
15:10		4,6		8,9	0,512364	
15:30		4,3		8,86	0,50931	
15:50		4,2		8,8	0,504728	
16:10		4,2		8,7	0,497092	
						4 цикл
12:30		5,9		9,85	0,584906	
12:50		4,9		9,76	0,578034	
13:10		3,7		9,65	0,569634	
13:20				9,63	0,568107	

13:30				9,6	0,565816	
13:40				9,58	0,564289	
13:50				9,53	0,560471	
14:00				9,51	0,558944	
14:10				9,49	0,557416	
14:20				9,47	0,555889	
14:30				9,5	0,55818	
14:40				9,46	0,555126	
14:50				9,45	0,554362	
15:00				9,44	0,553598	
15:10				9,44	0,553598	
15:30				9,42	0,552071	
15:50				9,37	0,548253	
16:00				9,36	0,54749	
						5 цикл
14:00				10	0,59636	
14:15				9,54	0,561234	
14:20				9,46	0,555126	
14:30				9,4	0,550544	
14:40				9,38	0,549017	
15:00				9,34	0,545962	
15:20				9,31	0,543672	
15:40				9,26	0,539854	
16:00				9,22	0,536799	

Исходные данные эксперимента №2 (искусственная монодисперсная пористая среда)

	T _{терм.} , °C	P		t, мин	дельта t	
		mA	MPa			
06.03.2017	-2					
11:55		3,57	0,105365	0	0	
13:30		9,10	0,527636	10	10	
13:40		9,10	0,527636	20	10	
13:50		9,05	0,523818	30	10	
14:00		9,04	0,523054	40	10	
14:10		9,00	0,52	50	10	

14:20		8,98	0,518473	60	10	
14:30		8,98	0,518473	70	10	
14:40		8,96	0,516946	80	10	
14:50		8,94	0,515418	90	10	
15:00		8,91	0,513128	100	10	
15:10		8,88	0,510837	110	10	
15:20		8,63	0,491747	120	10	
15:30	0	8,12	0,452803	130	10	
15:40		8,04	0,446694	140	10	
15:50		8,02	0,445167	150	10	
16:00		8,00	0,44364	160	10	
16:10		7,99	0,442876	170	10	
16:20		7,95	0,439822	180	10	
16:30		7,94	0,439058	190	10	
16:40		7,90	0,436004	200	10	
16:50		7,88	0,434477	210	10	
17:00		7,83	0,430659	220	10	
17:10		7,80	0,428368	230	10	
17:20		7,75	0,42455	240	10	
17:30		7,71	0,421496	250	10	
17:40		7,69	0,419968	260	10	
17:50		7,62	0,414623	270	10	
18:00		7,60	0,413096	280	10	
18:10		7,55	0,409278	290	10	
18:20		7,48	0,403933	300	10	
18:30		7,46	0,402406	310	10	
18:40		7,43	0,400115	320	10	
18:50		7,38	0,396297	330	10	
19:00	1	7,32	0,391715	340	10	
7.03.						2 цикл
11:55	2	6,37	0,319173	0	0	
12:30		9,52	0,559707	10	10	
12:40		9,44	0,553598	20	10	
13:30		9,00	0,52	30	10	
13:40		8,97	0,517709	40	10	
13:50		8,91	0,513128	50	10	
14:00		8,87	0,510073	60	10	
14:10		8,80	0,504728	70	10	
14:20		8,68	0,495565	80	10	
14:30		8,64	0,49251	90	10	
14:40		8,59	0,488692	100	10	
14:50		8,53	0,484111	110	10	
15:00		8,47	0,479529	120	10	
15:10		8,42	0,475711	130	10	
15:20		8,34	0,469602	140	10	

15:30		8,28	0,465021	150	10	
15:40		8,20	0,458912	160	10	
15:50		8,17	0,456621	170	10	
16:00		8,10	0,451276	180	10	
16:10		8,06	0,448222	190	10	
16:20		8,00	0,44364	200	10	
16:30		7,94	0,439058	210	10	
16:40		7,92	0,437531	220	10	
16:50		7,83	0,430659	230	10	
17:00		7,77	0,426077	240	10	
17:10		7,75	0,42455	250	10	
17:20		7,70	0,420732	260	10	
17:30		7,69	0,419968	270	10	
10.03.						3 цикл
11:05		7,02	0,368807	0	0	
11:25		9,80	0,581088	20	20	
11:35		9,62	0,567343	30	10	
11:45		9,56	0,562762	40	10	
12:00		9,46	0,555126	50	15	
12:10		9,42	0,552071	60	10	
12:20		9,38	0,549017	70	10	
12:30		9,35	0,546726	80	10	
12:40		9,35	0,546726	90	10	
12:50		9,34	0,545962	100	10	
13:00		9,32	0,544435	110	10	
13:10		9,30	0,542908	120	10	
13:20		9,28	0,541381	130	10	
13:30		9,26	0,539854	140	10	
13:40		9,23	0,537563	150	10	
13:50		9,21	0,536036	160	10	
14:00		9,19	0,534508	170	10	
14:10		9,18	0,533745	180	10	
14:20		9,15	0,531454	190	10	
14:30		9,14	0,53069	200	10	
14:40		9,13	0,529927	210	10	
14:50		9,10	0,527636	220	10	
15:00		9,15	0,531454	230	10	
15:10		9,15	0,531454	240	10	
15:20		9,13	0,529927	250	10	
15:30		9,12	0,529163	260	10	
15:40		9,10	0,527636	270	10	
15:50		9,09	0,526872	280	10	
16:00		9,08	0,526109	290	10	
16:10		9,08	0,526109	300	10	
						4 цикл

16:20		10,34	0,622322	0	0	
16:30		10,28	0,617741	10	10	
16:40		10,17	0,609341	20	10	
16:50		10,10	0,603996	30	10	
17:00		10,05	0,600178	40	10	
17:10		10,04	0,599414	50	10	
17:20		9,93	0,591015	60	10	
17:30		9,93	0,591015	70	10	
11.мар						
11:40		9,42	0,552071	0	0	

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Исследование фильтрационных свойств рассматриваемых КИГ в
искусственной монодисперсной пористой среде

Рисунок 3.13

ΔP , мм в.ст.	ΔP , Па	Q , $10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$
80	784	1,6
110	1078	1,76
120	1176	1,85
150	1470	1,92
170	1666	1,97

Рисунок 3.14

ΔP , мм вод.ст.	ΔP , Па	Q , $10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$
340	3332	0,68
440	4312	0,75
460	4508	0,77
500	4900	0,77
540	5292	0,82

Рисунок 3.15

ΔP , мм вод.ст.	ΔP , Па	$Q, 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$
590	5786	0,87
600	5880	0,96
610	5978	1,08
620	6076	1,44
630	6174	1,41

Рисунок 3.16

ΔP , мм вод.ст.	ΔP , Па	$Q, 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$
500	4903	0,45
520	5096	0,55
550	5390	0,91
580	5684	1,28
600	5880	1,63