

На правах рукописи

Лаврик Анна Юрьевна



**ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА
СОСТАВА ИНГИБИРУЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ
ЖИДКОСТИ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ГАЗОВЫХ СКВАЖИН
В УСЛОВИЯХ ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ**

*Специальность 2.8.2. Технология бурения и освоения
скважин*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2026

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент

Буслаев Георгий Викторович

Официальные оппоненты:

Федорова Наталья Григорьевна

доктор технических наук, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет», кафедра строительства нефтяных и газовых скважин, профессор;

Деминская Наталия Григорьевна

кандидат технических наук, доцент, филиал общества с ограниченной ответственностью «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть», Управление проектирования строительства скважин, руководитель направления разработки проектной документации

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Югорский государственный университет», г. Ханты-Мансийск.

Защита диссертации состоится **15 июля 2026 г. в 12:30** на заседании диссертационного совета ГУ.10 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 15 мая 2026 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ

диссертационного совета



БЛИНОВ

Павел Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Гидратообразование является причиной осложнений на различных этапах освоения газовых скважин. Формированию газовых гидратов способствуют высокие давления в скважине, низкие температуры, наличие криолитозоны и ряд других горно-геологических и технологических факторов.

Этап освоения газовых скважин характеризуется повышенными рисками гидратообразования. В процессе вызова притока и последующих газодинамических исследований пластовый газ с высоким давлением поступает в колонну насосно-компрессорных труб (НКТ), заполненную технологической жидкостью, и поднимается к устью скважины. Интенсивный рост давления при вызове притока и охлаждение газа вследствие дроссель-эффекта при его движении, а также контакт технологической жидкости с газом создают термобарические условия для образования газовых гидратов.

Осложнения, вызванные гидратообразованием на этапе освоения скважин, приводят к негативным последствиям – блокированию лифтовой колонны, искажению результатов исследований пласта (повышение неопределенности информации о дебите, температуре и давлении), аварийным остановкам и необходимости проведения операций по устранению газогидратных пробок. В результате причиняется значительный экономический ущерб вследствие длительных простоев оборудования.

Одним из основных методов предотвращения гидратообразования является применение ингибиторов. В настоящее время в качестве основного ингибитора на российских месторождениях используется метанол, который относится к классу термодинамических ингибиторов, смещающих термобарические условия возникновения гидратов в область более низких температур. Однако эффективная работа метанола как термодинамического ингибитора гидратообразования наблюдается лишь при его высоких концентрациях в водной фазе. Это влечёт за собой необходимость создания на кустовых площадках запасов ингибитора. Токсичность и пожароопасность метанола предъявляют повышенные требования к

безопасности технологических операций с ним. Необходимо отметить риск солеотложения при контакте с минерализованной пластовой водой. Другими недостатками метанола является его растворимость в природном газе, что приводит к уносу ингибитора и необходимости его регулярного завоза, а также применение энергозатратных схем регенерации водометанольного раствора.

В качестве альтернативы традиционным термодинамическим ингибиторам и, в частности, метанолу, рассматриваются кинетические ингибиторы, блокирующие рост активных центров газовых гидратов и увеличивающие период нуклеации гидратообразования.

В рамках данного исследования решается актуальная научно-техническая задача разработки нового состава технологической жидкости, обеспечивающей двойное (термодинамическое и кинетическое) ингибирование гидратообразования на этапе освоения газовых скважин.

Степень разработанности темы исследования

Проблема гидратообразования при освоении скважин является комплексной и междисциплинарной. Фундаментальные основы термодинамики и кинетики образования газовых гидратов, а также теоретические предпосылки для их подавления заложены в работах В. А. Истомина, Ю. Ф. Макогона, Э. А. Бондарева, Э. Б. Бухгалтера, Е. П. Запорожца, Н. В. Черского, М. А. Варфоломеева, Н. А. Шостака, О. В. Савенок, Г. В. Буслаева, Д. А. Рипмистера, Э. Д. Слоуна и К. А. Коха. Вопросы применения технологических жидкостей на этапах освоения скважин и совместимости с пластом исследовали такие ученые, как А. Г. Бурмистров, В. С. Якушев, Г. С. Лутошкин, А. Г. Мальшев, А. И. Волошин, А. А. Тройникова. Значительный вклад в разработку и совершенствование ингибиторов гидратообразования внесли Т. М. Бекиров, В. Г. Квон, М. А. Келланд. Вопросами бурения скважин в многолетнемерзлых породах занимались Б. Б. Кудряшов, З. А. Васильева, В. Ф. Буслаев.

Несмотря на значительный объем накопленных знаний, изученность темы создания ингибирующих технологических жидкостей для освоения скважин остаётся недостаточной. Существующие исследования, как правило, сосредоточены либо на

термодинамическом, либо на кинетическом подавлении гидратообразования, без комплексного учёта их совместного эффекта.

Объект исследования – процессы гидратообразования при освоении газовых скважин.

Предмет исследования – свойства многокомпонентной системы «метан – вода – ингибитор» и её фазовые переходы в условиях изменения давления и температуры.

Цель работы – повышение эффективности борьбы с образованием гидратов в НКТ при освоении скважин с использованием ингибирующей технологической жидкости.

Идея работы: разработка ингибирующей технологической жидкости, обеспечивающей изменение термобарических условий и увеличение периода нуклеации образования газовых гидратов.

Основные задачи исследования:

1. Выполнить обзор условий и механизмов зародышеобразования газовых гидратов на газовых месторождениях, а также методов предотвращения гидратообразования.

2. Разработать методику исследования ингибиторов гидратообразования, включающую комплексный подход к изучению свойств системы «метан – вода – ингибитор».

3. Провести экспериментальные исследования термодинамических и кинетических свойств ингибирующих жидкостей с плотностью 1050 кг/м³.

4. Разработать ингибирующую технологическую жидкость с плотностью 1050 кг/м³, обеспечивающую предотвращение образования гидратов в НКТ.

5. Разработать математическую модель, связывающую температуру и давление образования гидратов метана в присутствии различных ингибиторов.

6. Выработать рекомендации по применению состава ингибитора на месторождениях, осложненных возникновением газовых гидратов в процессе операций по освоению газовых скважин.

Научная новизна работы:

1. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность изменения термобарических условий формирования и увеличения периода нуклеации газовых гидратов за счёт механизма образования водородных связей между катионами аммония NH_4^+ и молекулами воды, что обеспечивает высокую концентрацию ионов в растворе заданной плотности, применяемом в качестве технологической жидкости при освоении скважин.

2. Получены коэффициенты полуэмпирической модели, основанной на уравнении Клапейрона-Клаузиуса, позволяющие уточнить условия формирования газовых гидратов метана и диапазон термобарических параметров применения технологической жидкости при освоении газовых скважин.

Соответствие паспорта специальности

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.8.2. Технология бурения и освоения скважин по пункту 7: «Физико-химические процессы в объёме технологических жидкостей. Составы, свойства и технологии применения технологических жидкостей, химических реагентов для бурения и освоения скважин. Фильтрационные процессы в скважине».

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Научно обоснована и экспериментально подтверждена эффективность ингибирующей технологической жидкости за счёт совместного действия хлорида аммония и органических полимеров, обеспечивающей изменение термобарических условий и увеличение нуклеационного периода гидратообразования при освоении газовых скважин.

2. Разработан состав для борьбы с гидратообразованием при освоении скважин (патент на изобретение №2855205).

3. Разработана методика экспериментальных исследований кинетической и термодинамической эффективности ингибиторов гидратообразования в насосно-компрессорных трубах при освоении и эксплуатации газовых скважин.

4. На основе проведённых экспериментальных исследований выработаны рекомендации по выбору технологических жидкостей при проектировании режимных параметров, обеспечивающих

предотвращение гидратообразования при освоении газовых скважин Ковыктинского ГКМ.

5. Методика и результаты экспериментальных исследований эффективности ингибиторов гидратообразования рекомендованы к использованию в компании ООО «ИНК-СЕРВИС» в научно-исследовательской и производственной деятельности с целью повышения эффективности освоения газовых скважин (акт внедрения от 04.02.2026).

6. Результаты исследований свойств ингибирующих составов используются при выполнении научно-исследовательских работ в Санкт-Петербургском горном университете императрицы Екатерины II и при проведении лабораторных и практических занятий в рамках подготовки студентов нефтегазового факультета.

Методология и методы исследования.

Работа выполнялась с использованием информационно-аналитических, экспериментальных методов, методов математической статистики. Экспериментальные исследования проводились в лаборатории по изучению газовых гидратов с применением установки на базе автоклава ГНА-350, внесённой в Государственный реестр средств измерений (№ 91812-24). Экспериментальные исследования проведены на базе Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Предложенная полуэмпирическая математическая модель на основе уравнения Клапейрона-Клаузиуса, описывающая фазовое равновесие системы «метан – вода – ингибитор», позволяет с высокой точностью (скорректированный коэффициент детерминации $0,998 < R_{кор}^2 < 1$) прогнозировать термобарические условия гидратообразования при различных концентрациях компонентов ингибитора гидратообразования, что даёт возможность комплексной оценки термодинамических и кинетических свойств и научно обоснованного выбора ингибирующей технологической жидкости для освоения газовых скважин.

2. Ингибитор гидратообразования, включающий хлорид аммония (15-20 масс. %), поливинилпирролидон К-30 (0,5-1 масс. %), карбоксиметилцеллюлозу (1-2 масс. %), полигексаметиленгуанидина

хлорид (0,2-0,4 масс. %) и воду техническую (76,6-83,3 масс. %) в части термодинамических показателей оказывает ингибирующий эффект, сопоставимый с эффектом от применения водного раствора метанола (20 масс. %), увеличивает нуклеационный период гидратообразования, и может применяться в качестве технологической жидкости при освоении газовых месторождений.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена проведением лабораторных исследований, соответствующих зарубежным и отечественным стандартам, в лаборатории на сертифицированном поверенном оборудовании; достаточной сходимостью результатов; применением современных методов их обработки и интерпретации. Полученные результаты исследований апробированы на всероссийских и международных конференциях.

Апробация результатов диссертации проведена на 5 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 4 международных. За последние 3 года принято участие в 5 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 4 международных: XXIV Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Бурение» (04.04.2024, г. Донецк); III Международная научно-практическая конференция «Прорывные технологии в разведке, разработке и добыче углеводородного сырья» (22.05-24.05.2024, г. Санкт-Петербург); V Международная научно-практическая конференция «Инновационные технологии в нефтегазовой отрасли (01.12-06.12.2024, г. Ставрополь); IV Международная научно-практическая конференция «Прорывные технологии в разведке, разработке и добыче углеводородного сырья» (20.05-22.05.2025, г. Санкт-Петербург); VI Международная научно-практическая конференция «Инновационные технологии в ТЭК (24.11-28.11.2025, г. Ставрополь).

Личный вклад автора заключается в анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования ингибиторов гидратообразования, разработке состава для предотвращения гидратообразования, выполнении экспериментальных исследований, подтверждающих термодинамические и кинетические ингибирую-

щие свойства растворов, а также в экспериментальной оценке коррозионной активности, температуры кристаллизации ингибирующих составов и их воздействия на породы продуктивного горизонта.

Публикации. Результаты диссертации в достаточной степени освещены в 8 печатных работах, в том числе в 2 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 3 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен 1 патент на изобретение.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка сокращений, списка литературы, включающего 116 наименований, и 5 приложений. Диссертация изложена на 115 страницах машинописного текста, содержит 49 рисунков и 18 таблиц.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю, к.т.н., доценту Буслаеву Георгию Викторовичу за неоценимую помощь при подготовке диссертации. Автор выражает глубокую благодарность д.т.н., профессору Двойникову Михаилу Владимировичу за замечания и ценные методические рекомендации. Также автор признателен к.т.н. Ламосову Михаилу Евгеньевичу и к.х.н. Камбулову Евгению Юрьевичу за консультации и интерес к исследованию.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении определена актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыта теоретическая и практическая значимость исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проанализированы проблемы, связанные с гидратообразованием при освоении газовых скважин. Уточнены структура и физико-химические особенности гидратов. Представлена классификация ингибиторов гидратообразования. Обоснован выбор в качестве ингибиторов азотсодержащих соединений.

Во второй главе представлена разработанная методика экспериментальных исследований термодинамических и кинетических

свойств ингибиторов с использованием автоклава высокого давления. Приведены методики определения коррозионной активности и температуры кристаллизации растворов ингибиторов. Описана лабораторная база и применяемые для приготовления ингибирующих растворов химические реагенты. Приведён перечень исследуемых растворов ингибиторов.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований свойств исследуемых ингибиторов. В диапазоне давлений 3-32 МПа построены кривые фазового равновесия гидратов метана в присутствии различных ингибиторов. Разработан состав ингибирующей технологической жидкости. Предложено использовать модель на основе уравнения Клапейрона-Клаузиуса для аппроксимации кривых фазового равновесия гидратов. Оценка кинетических свойств ингибиторов производилась определением индукционного периода гидратообразования (при фиксированной температуре переохлаждения), а также определением индукционного периода и температуры максимального переохлаждения (при постоянном снижении температуры). Представлены результаты экспериментальных исследований коррозионной активности и температуры кристаллизации разработанного ингибитора.

В четвертой главе описана технология применения ингибитора в качестве технологической жидкости при освоении скважин на Ковыктинском ГКМ. Определена область применения разработанной ингибирующей технологической жидкости при освоении газовых скважин, а также произведена оценка её влияния на образцы шлама продуктивного горизонта. Выполнены расчёты температуры газа вдоль скважины при её работе на факел. Определены режимы работы и интервалы скважины, представляющие наибольшую опасность с точки зрения образования газовых гидратов.

В заключении представлены основные результаты, полученные в ходе решения поставленных задач, и рекомендации по результатам исследования.

Основные результаты выполненных исследований отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Предложенная полуэмпирическая математическая модель на основе уравнения Клапейрона-Клаузиуса, описывающая

фазовое равновесие системы «метан – вода – ингибитор», позволяет с высокой точностью (скорректированный коэффициент детерминации $0,998 < R_{кор}^2 < 1$) прогнозировать термобарические условия гидратообразования при различных концентрациях компонентов ингибитора гидратообразования, что даёт возможность комплексной оценки термодинамических и кинетических свойств и научно обоснованного выбора ингибирующей технологической жидкости для освоения газовых скважин.

В работе исследовались ингибирующие составы, которые могут применяться в качестве технологических жидкостей при освоении скважин. Концентрации ингибиторов рассчитывались исходя из плотности, принятой равной 1050 кг/м^3 в соответствии с плотностью используемых на месторождениях технологических жидкостей (таблица 1). В таблице 1 ПВП – поливинилпирролидон, КМЦ – карбоксиметилцеллюлоза, ПГМГ – полигексаметиленгуанидина хлорид.

Таблица 1 - Исследуемые ингибиторы и их концентрации в водном растворе

Ингибитор	Концентрация ингибитора, масс. %
–	0
KCl	8,0
NaCl	7,2
NH ₄ Cl	18,8
(NH ₂) ₂ CO	16,5
NH ₄ SCN	20
NH ₄ Cl / ПВП	18,8 / 1
NH ₄ Cl / ПВП / КМЦ / ПГМГ	19,7 / 1 / 2,15 / 0,5

Оценка термодинамических свойств ингибиторов образования гидратов метана осуществлялась в автоклаве высокого давления при изохорных условиях. После создания начальных термобарических условий включали роторную мешалку с частотой вращения рабочего органа 150 об/мин. Снижали температуру в реакторе автоклава. Увеличивали скорость вращения рабочего органа мешалки до 800 об/мин на 5-6 секунд. Образовывался гидрат. Затем систему подвергали постепенному нагреву ($0,5 \text{ }^\circ\text{C} / \text{час}$), наблюдали увеличение давления в системе за счёт высвободившегося метана (рисунок 1). Стабилизация давления свидетельствовала об окончании разложения

газового гидрата. В каждом эксперименте фиксировалась точка (температура T_{ϕ} и давление P_{ϕ}) разложения, или фазового равновесия гидрата.

По точкам фазового равновесия были построены кривые фазового равновесия гидрата метана с водой (в отсутствии ингибитора), а также кривые фазового равновесия гидрата метана с растворами KCl, NaCl, NH₄Cl, (NH₂)₂CO, NH₄SCN (рисунок 2). С точки зрения смещения термобарических условий гидратообразования высокую эффективность показали составы на основе хлорида аммония. Был исследован состав, содержащий NH₄Cl в качестве термодинамического ингибитора (ТИГ) и ПВП в качестве кинетического ингибитора (КИГ). Затем получен состав, включающий NH₄Cl, ПВП, КМЦ, ПГМГ. Установлено, что добавление ПВП (1 масс. %) количестве 1 % позволило дополнительно сместить кривую равновесия в область более низких температур при давлениях выше 6 МПа (при 20 МПа – на 1,5 °С). Разработанный многокомпонентный состав NH₄Cl / ПВП / КМЦ / ПГМГ, показал некоторое улучшение термодинамических свойств относительно состава NH₄Cl / ПВП (снижение равновесной температуры при 20 МПа на 0,4 °С).

Аппроксимация кривых фазового равновесия выполнена с помощью многочлена третьей степени в соответствии с формулой (1):

$$P(T) = a \cdot T^3 + b \cdot T^2 + c \cdot T + d, \quad (1)$$

где a, b, c, d – коэффициенты; T – температура, °С; P – давление, МПа.

Коэффициенты многочлена, аппроксимирующего кривые фазового равновесия гидратов, приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Коэффициенты многочлена третьей степени и скорректированный коэффициент детерминации

Ингибитор	Коэффициенты				$R^2_{\text{кор.}}$
	a	b	c	d	
отсутствует	0,0129	-0,4073	4,8610	-13,046	0,9997
KCl	0,0066	-0,0345	0,9242	4,1522	0,9998
NaCl	0,0068	-0,0883	0,8433	3,1138	0,9999
NH ₄ Cl	0,0068	0,0618	0,6424	6,2961	0,9999
(NH ₂) ₂ CO	0,0070	-0,0594	0,6323	3,8757	0,9996
NH ₄ SCN	0,0071	-0,0114	0,6166	4,3845	0,9995
NH ₄ Cl / ПВП	0,0049	-0,0512	0,6283	2,4887	0,9997

Продолжение таблицы 2

Ингибитор	Коэффициенты				R ² _{кор.}
	a	b	c	d	
NH ₄ Cl / ПВП / КМЦ / ПГМГ	0,0449	-0,5181	3,2196	3,9911	0,9998

Также для аппроксимации кривых фазового равновесия гидратов предложено использовать выражение, основанное на уравнении Клапейрона-Клаузиуса. В термодинамике это уравнение описывает взаимосвязь давления и температуры при фазовых переходах 1 рода в однокомпонентных системах в соответствии с формулой (2):

$$\frac{dP}{dT} = \frac{L}{T(V_2 - V_1)}, \quad (2)$$

где dP – изменение давления, Па; dT – изменение температуры, К; L – удельная скрытая теплота фазового перехода, Дж/кг; V_1 – объём конденсированной фазы, м³; V_2 – объём газовой фазы, м³.

Образование и разложение гидратов метана относится к фазовым переходам 1 рода, однако рассматриваемая система относится к многокомпонентным. В связи с этим предлагаемую математическую модель можно отнести к полуэмпирическим.

При разложении гидрата происходит выделение газа и переход воды из гидрата в раствор. Однако изменение объёма системы связано, в основном, с выделением газообразного метана. Подставляя $V_2 = RT/P$, получаем выражение (3):

$$\frac{dP}{dT} = \frac{LP}{RT^2}, \quad (3)$$

где R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К).

Из формулы (3) получаем формулу (4):

$$\frac{dP}{P} = \frac{L}{RT^2} dT. \quad (4)$$

Принимая постоянство удельной скрытой теплоты фазового перехода, интегрируя обе части уравнения, получаем выражения (5) и (6):

$$\ln P = -\frac{L}{RT} + C \quad (5)$$

$$\ln P = C - \frac{A}{T}, \quad (6)$$

где C , A – коэффициенты модели, результаты определения которых приведены в таблице 3. В таблицах 2 и 3 представлены также результаты расчёта скорректированного коэффициента детерминации $R_{кор}^2$, отражающего точность аппроксимации.

Таблица 3 – Коэффициенты модели на основе уравнения Клапейрона-Клаузиуса и скорректированный коэффициент детерминации

Ингибитор	C	A	$R_{кор}^2$
–	45,9099	12513,8	0,99794
KCl	40,9756	10971,0	0,99923
NaCl	42,1091	11278,5	0,99863
NH ₄ Cl	44,4831	11676,5	0,99810
(NH ₂) ₂ CO	43,3880	11588,8	0,99907
NH ₄ SCN	41,5577	10971,0	0,99944
NH ₄ Cl / ПВП	49,2140	12949,5	0,99935
NH ₄ Cl / ПВП / КМЦ / ПГМГ	42,5490	11127,3	0,99921

Таким образом, предложенная модель на основе выражения Клапейрона-Клаузиуса может с высокой точностью описывать термобарические условия гидратообразования и использоваться для комплексной оценки ингибирующих свойств и научно обоснованного выбора ингибирующей технологической жидкости.

2. Ингибитор гидратообразования, включающий хлорид аммония (15-20 масс. %), поливинилпирролидон К-30 (0,5-1 масс. %), карбоксиметилцеллюлозу (1-2 масс. %), полигексаметиленгуанидина хлорид (0,2-0,4 масс. %) и воду техническую (76,6-83,3 масс. %) в части термодинамических показателей оказывает ингибирующий эффект, сопоставимый с эффектом от применения водного раствора метанола (20 масс. %), увеличивает нуклеационный период гидратообразования, и может применяться в качестве технологической жидкости при освоении газовых месторождений.

К хлориду аммония, показавшему лучшие ингибирующие свойства при заданной плотности, дополнительно был введён кинетический ингибитор ПВП, а также добавки КМЦ и ПГМГ. КМЦ, проявляя одновременно свойства ТИГ и КИГ, улучшает структурно-реологические и фильтрационные показатели раствора, обеспечивает требуемую вязкость. ПГМГ используется в качестве биоцидной добавки, предотвращающей коррозию и биодеструкцию оборудования.

Разработанный ингибитор NH_4Cl / ПВП / КМЦ / ПГМГ сравнивался как ТИГ с водометанольным раствором (ВМР). Были проведены эксперименты с ВМР различных концентраций. Наиболее близкие термодинамические ингибирующие свойства показал раствор метанола 20 масс. %. (рисунок 3). На рисунке 3 кривые практически сходятся при давлении меньше 6 МПа, но в области более высоких давлений возникает заметная разница, составляющая при 20 МПа 2,2 °С.

Для составов на основе хлорида аммония выполнена оценка кинетических ингибирующих свойств. После создания начальных термобарических условий и включения роторной мешалки снижали температуру в системе (рисунок 4). Для определения времени индукции – основного параметра, характеризующего кинетические свойства ингибитора, температуру снижали интенсивно, со скоростью 0,1-0,3 °С/мин, до достижения постоянной температуры, отстоящей от равновесной температуры T_ϕ на величину $T_{\text{переохл.}} = 4 \text{ }^\circ\text{C}$ (температура переохлаждения). Фиксировалось время индукции, то есть время от создания благоприятных условий для возникновения гидрата ($T \leq T_\phi$ и $P \geq P_\phi$) до начала образования кристаллов гидрата, фиксируемого по началу интенсивного снижения давления в системе.

Результаты определения индукционного периода гидратообразования ингибиторов на основе NH_4Cl при фиксированной температуре переохлаждения приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты определения индукционного периода при фиксированной температуре переохлаждения 4 °С и давлении 7,9 МПа

Ингибитор	Индукционный период, с	
	В экспериментах	Усреднённое значение
NH_4Cl	11 250	≈ 11 700
	11 400	
	12 500	
NH_4Cl / ПВП	20 500	≈ 21 400
	21 150	
	22 600	
NH_4Cl / ПВП / КМЦ / ПГМГ	29 500	≈ 30 300
	30 200	
	31 150	

Аналогичные эксперименты были проведены с ВМР (20 масс. %). Было подтверждено, что индукционный период отсутствует, и гидраты начинают образовываться практически сразу при достижении соответствующих термобарических условий.

Для данных составов были также проведены дополнительные эксперименты по образованию гидратов с относительно медленным снижением температуры со скоростью 0,5 °С / час (рисунок 5). При этом фиксировалась температура, при которой начинали образовываться кристаллы гидрата, и давление. Для данного значения давления по кривой фазового равновесия определялась равновесная температура T_{ϕ} . Разница между температурой начала образования гидратов и равновесной температурой T_{ϕ} показывала максимальную температуру переохлаждения. Аналогичным образом измерялся индукционный период гидратообразования. Результаты определения максимальной температуры переохлаждения, а также индукционного периода гидратообразования при постоянном снижении температуры приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Результаты определения максимального переохлаждения и индукционного периода при постоянном снижении температуры

Ингибитор	Индукционный период, с		Максимальная температура переохлаждения, °С
	Данные экспериментов	Усреднённое значение	
NH ₄ Cl	15 000	≈ 15 400	2,5
	15 250		
	15 900		
NH ₄ Cl / ПВП	22 000	≈ 22 600	6,0
	22 800		
	22 950		
NH ₄ Cl / ПВП / КМЦ / ПГМГ	53 750	≈ 54 000	7,2
	54 050		
	54 200		

Для оценки возможности практического применения разработанного ингибитора в качестве технологической жидкости были проведены исследования её коррозионной активности. Результаты экс-

периментальных исследований для технической воды без ингибитора, раствора метанола (20 масс. %), а также составов на основе NH_4Cl представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты определения коррозионной активности составов

Ингибитор	Средняя скорость коррозии, $\text{г/м}^2\cdot\text{ч}$
отсутствует	0,071
ВМР (20% масс.)	0,134
NH_4Cl	0,498
NH_4Cl / ПВП	0,365
NH_4Cl / ПВП / КМЦ / ПГМГ	0,093

Экспериментально определена температура кристаллизации, соответствующая началу фазового перехода и выделения скрытой теплоты кристаллизации. Температура кристаллизации для ингибитора NH_4Cl -15,3 °С, а для разработанного ингибитора гидратообразования NH_4Cl / ПВП / КМЦ / ПГМГ -16,35 °С. Это свидетельствует о возможности применения ингибирующей технологической жидкости в условиях низких температур окружающего воздуха.

Выработаны рекомендации по применению разработанной ингибирующей гидратообразование технологической жидкости при освоении скважин в условиях Ковыктинского ГКМ. Выполнен расчёт температуры газа в работающей на факел скважине (рисунок 6) при её освоении, что позволило на основе совмещения Р-Т диаграмм скважины и равновесных кривых технологических жидкостей (рисунок 7) определить зоны вероятного образования газовых гидратов (рисунок 8) при постепенном выводе скважины на проектные значения дебита в процессе освоения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации предлагается новое решение актуальной научно-технической задачи повышения эффективности борьбы с гидратообразованием в НКТ при освоении скважин использованием ингибирующей технологической жидкости. По результатам диссертационной работы сформулированы следующие наиболее значимые результаты:

1. Выполнен обзор условий и механизмов возникновения газовых гидратов на газовых месторождениях, а также методов предотвра-

щения гидратообразования. Обосновано, что катион аммония способен оказывать ингибирующий эффект по отношению к упорядоченной структуре газового гидрата за счёт наличия водородных связей.

2. Разработана методика исследования ингибиторов гидратообразования, включающая определение равновесных параметров разложения гидратов, а также кинетических параметров их образования – времени индукции (методом фиксированной температуры переохлаждения и методом постоянного снижения температуры) и максимальной температуры переохлаждения.

3. Проведены экспериментальные исследования термодинамических и кинетических свойств ингибирующих жидкостей с плотностью 1050 кг/м³ в диапазонах давлений от 3 до 32 МПа. Установлено, что среди хлоридов калия, натрия и аммония, а также тиоцианата аммония и карбамида наиболее сильный ингибирующий эффект оказывает NH₄Cl, смещая кривую фазового равновесия относительно KCl и NaCl на 8 ° при 20 МПа.

4. Предложена математическая модель на основе уравнения Клапейрона-Клаузиуса, связывающая температуру и давление образования гидратов метана, и определены её коэффициенты для исследуемых систем «метан – вода – ингибитор».

5. Разработана ингибирующая технологическая жидкость для борьбы с гидратообразованием при освоении скважин с плотностью 1050 кг/м³, обеспечивающая предотвращение образования гидратов в НКТ, включающая NH₄Cl (15-20 масс. %), ПВП (0,5-1 масс. %), КМЦ (1-2 масс. %), ПГМГ (0,2-0,4 масс. %) и воду техническую (76,6-83,3 масс. %). Установлено, что данный состав в области давлений до 6 МПа показывает аналогичную, а в области давлений выше 6 МПа – превосходящую ингибирующую способность в сравнении с раствором метанола 20 масс. % (снижение равновесной температуры на 2,2 °С при 20 МПа). Разработанный состав в 2,5 раза увеличивает нуклеационный период образования гидратов относительно раствора NH₄Cl.

6. Выработаны практические рекомендации по определению зон потенциального образования гидратов в НКТ. Также даны рекомендации по применению состава ингибитора на месторождениях, осложнённых возникновением газовых гидратов в процессе операций по освоению газовых скважин.

Перспективы дальнейших исследований по теме диссертационной работы связаны с экспериментальной проверкой совместимости разработанного состава с модельной смесью газов, в том числе с высоким содержанием CO₂ и H₂S, а также с уточнением вопросов возможного расширения перечня технологических операций, в которых может быть использован разработанный состав.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Буслаев, Г.В. Обзор современных исследований газовых гидратов и ингибиторов гидратообразования для применения при освоении скважин / Г.В. Буслаев, **А.Ю. Лаврик**, Р.Р. Исламов, Б.Ш. Муслимов // Научный журнал Российского газового общества. – 2024. – № 2 (44). – С. 16-25. – EDN QSVBXT.

2. Буслаев, Г.В. Исследование термодинамических и кинетических свойств ингибиторов гидратообразования на основе аммониевых солей / Г.В. Буслаев, **А.Ю. Лаврик** // Научный журнал Российского газового общества. – 2025. – № 4(50). – С. 48–55. – EDN POFJQC.

Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования (Scopus):

3. Buslaev, G. V. Comparative Study of Efficiency of Hydrate Inhibitors Based on Ammonium Salts and Polyvinylpyrrolidone / G. V. Buslaev, **A. Y. Lavrik** // International Journal of Engineering, Transactions A: Basics. – 2026. – Vol. 39, No. 04. – P. 898-905. – DOI: 10.5829/ije.2026.39.04a.08.

4. Buslaev, G. Hybrid system of hydrogen generation by water electrolysis and methane partial oxidation / G. Buslaev, Al Lavrik, **An Lavrik**, P. Tsvetkov, // International Journal of Hydrogen Energy. – 2023. – Vol. 48, Issue. 63. – P. 24166-24179. – DOI 10.1016/j.ijhydene.2023.03.098.

5. Serbin D. V. Study of the interaction between the drilling fluid and lake water during the opening of the subglacial Lake Vostok in Antarctica/ D. Serbin, G. Buslaev, **A. Lavrik**, V. Kadochnikov, A. Dmitriev // Journal of Mining Institute. – 2025. – №. 273 (eng). – P. 136-146. EDN NLWJEQ

Прочие публикации:

6. Лаврик, А. Ю. Перспективные азотсодержащие ингибиторы гидратообразования для освоения скважин / **А. Ю. Лаврик**, Г. В. Буслаев // Прорывные технологии в разведке, разработке и добыче углеводородного сырья: Тезисы докладов III Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 22-24 мая 2024 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 2024. – С. 124-125. – EDN PCOQ GK.

7. Буслаев, Г. В. Применение смесового состава жидкости заканчивания для подавления гидратообразования при освоении скважин в условиях Западной Сибири / Г. В. Буслаев, **А. Ю. Лаврик** // Инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе: Сборник трудов VI Международной научно-практической конференции, посвященной 80-летию Победы в Великой Отечественной войне, Ставрополь, 24-28 октября 2025 года. – Ставрополь: ООО "Бюро новостей", 2025. – С. 425-429. – EDN FDUK QK.

8. Буслаев, Г. В. Газовые гидраты: ингибиторы термодинамического действия / Г. В. Буслаев, **А. Ю. Лаврик**, А. Е. Анашкина // Инновационные технологии в нефтегазовой отрасли: Сборник трудов V Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию со дня рождения профессора К.М. Тагирова, Ставрополь, 02-06 декабря 2024 года. – Ставрополь: "АГРУС" Ставропольского государственного аграрного университета, 2024. – С. 377-383. – EDN UXINOY.

Патенты/свидетельство на объекты интеллектуальной собственности:

9. Патент № 2855205 Российская Федерация, МПК C09K 8/52 (2006.01). Состав для борьбы с гидратообразованием при освоении скважин: № 20251322009: заявл. 18.11.2025; опубл. 30.01.2026 / Г. В. Буслаев, **А. Ю. Лаврик**; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» – 7 с.

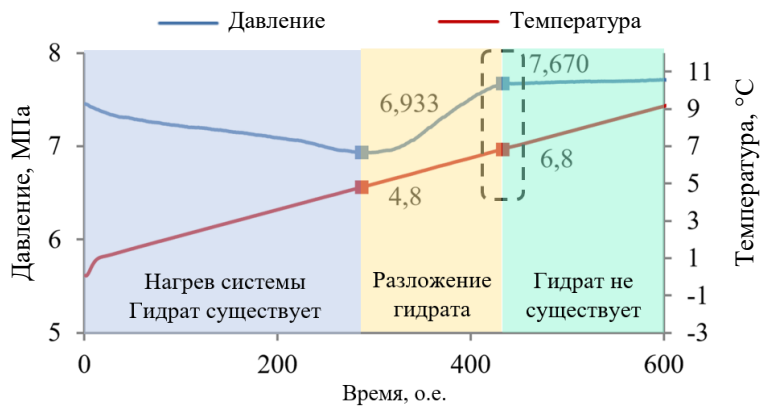


Рисунок 1 – Определение точки фазового равновесия системы «метан – вода – хлорид аммония» (концентрация NH_4Cl 18,8 масс. %)

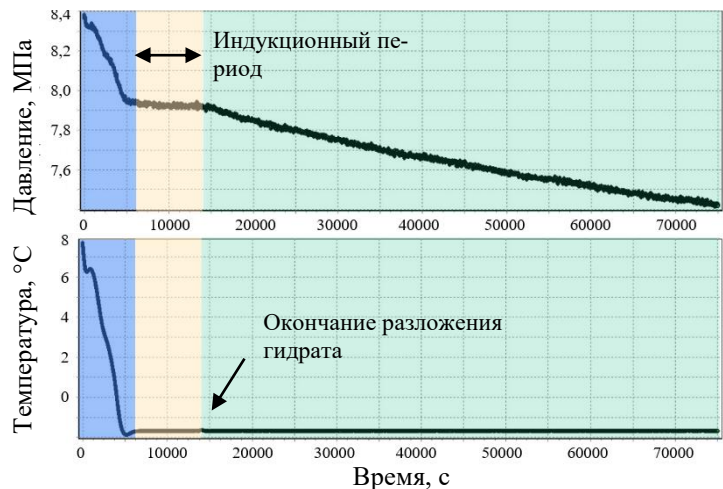


Рисунок 4 – Определение индукционного периода гидратообразования в присутствии NH_4Cl 18,8 масс. % (метод постоянного переохлаждения)

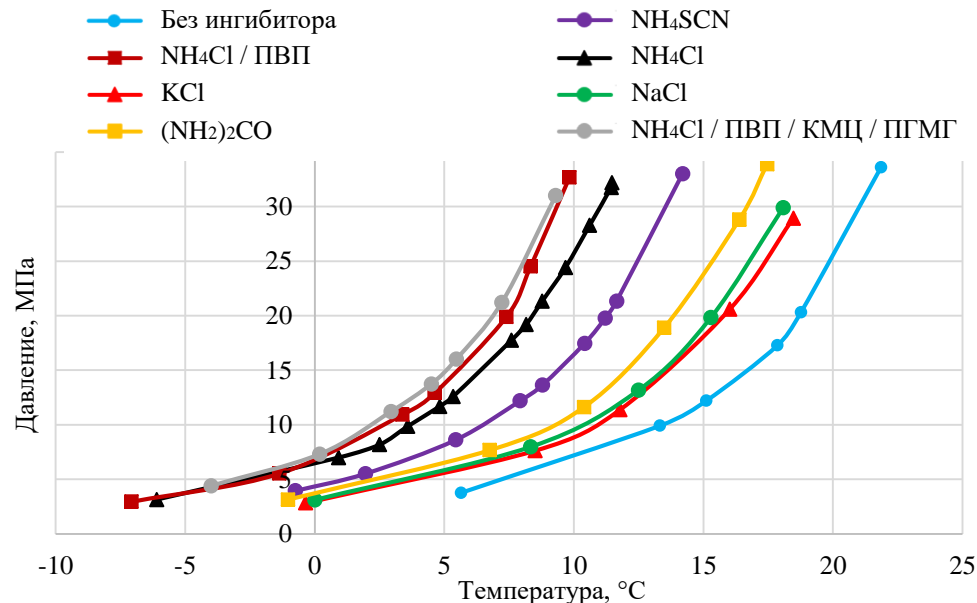


Рисунок 2 – Кривые фазового равновесия гидратов метана без ингибитора и в присутствии различных ингибиторов

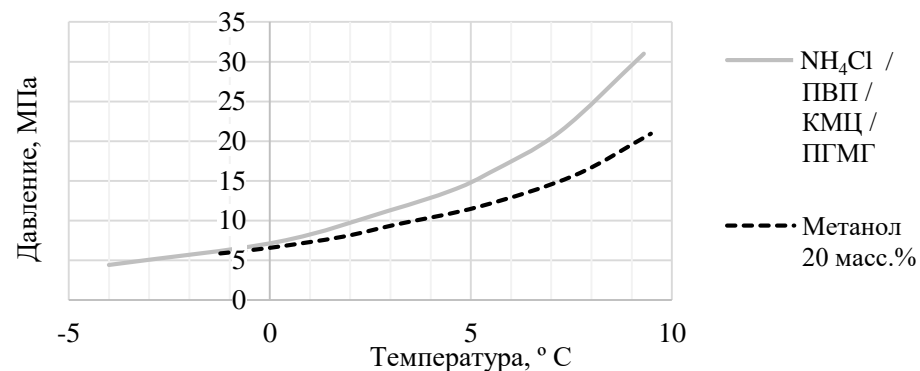


Рисунок 3 – Кривые фазового равновесия разработанного ингибитора гидратообразования NH_4Cl / ПВП / КМЦ / ПГМГ и водометанольного раствора (20 масс. %)

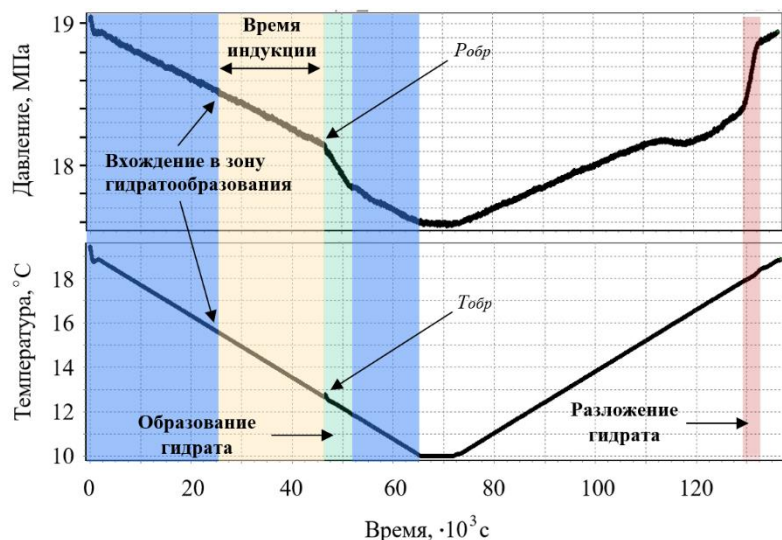


Рисунок 5 – Определение точки фазового равновесия системы «метан – вода – хлорид аммония» (концентрация NH_4Cl 18,8 масс. %)

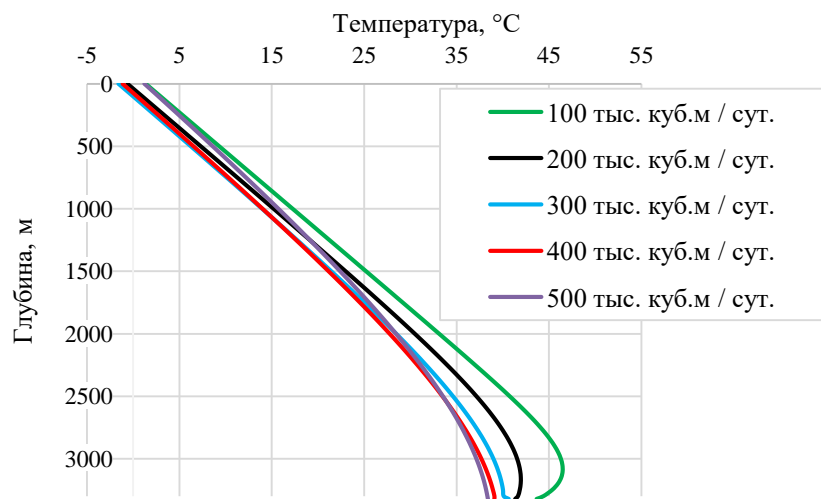


Рисунок 6 – Температурный профиль газа в работающей на факел скважине при различном дебите в процессе освоения

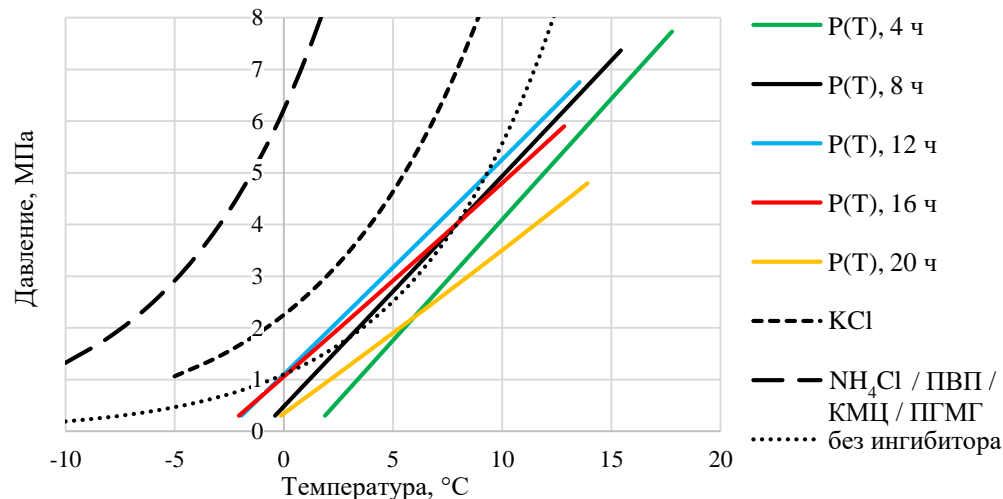


Рисунок 7 – Совмещение P-T диаграмм скважины и кривых фазового равновесия технологических жидкостей: в отсутствии ингибитора, в присутствии KCl (предусмотрена проектом) и разработанного состава

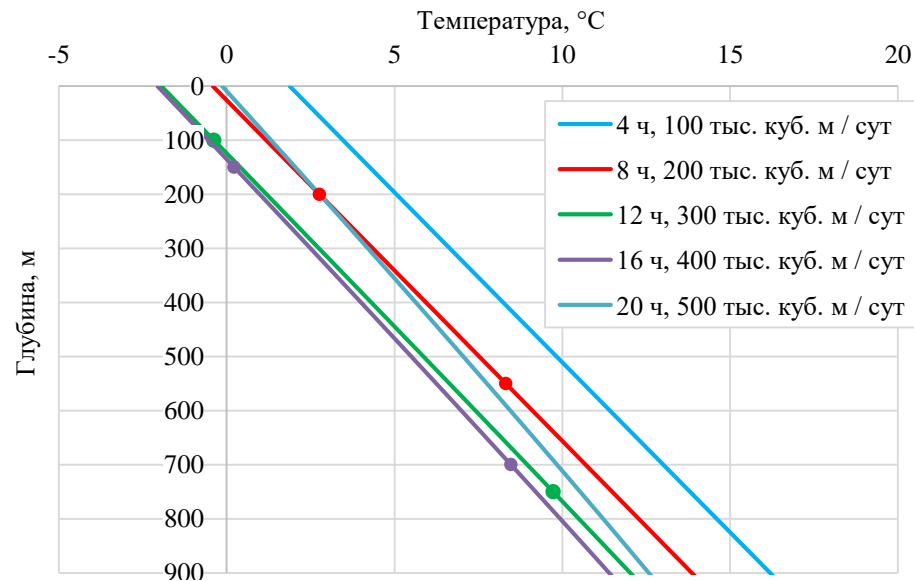


Рисунок 8 – Интервалы вероятного образования газовых гидратов, отмеченные точками на температурных профилях, при постепенном выводе скважины на проектный дебит в процессе освоения скважины (работа на факел)