

На правах рукописи

Сидоров Дмитрий Андреевич



**ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ
ИЗОЛЯЦИИ РАПОПРОЯВЛЯЮЩИХ ПЛАСТОВ ПРИ
ВСКРЫТИИ СОЛЕНОСНЫХ ТОЛЩ ВОСТОЧНОЙ
СИБИРИ**

*Специальность 2.8.2. Технология бурения и освоения
скважин*

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

Санкт-Петербург – 2023

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

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Двойников Михаил Владимирович

Официальные оппоненты:

Самсоненко Наталья Владимировна

доктор технических наук, ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Центр технологий строительства и ремонта скважин, ведущий научный сотрудник;

Нечаева Ольга Александровна

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет», Институт нефтегазовых технологий, директор института.

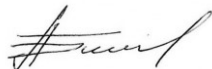
Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь.

Защита диссертации состоится **18 июля 2023 г. в 10:00** на заседании диссертационного совета ГУ.10 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 3321**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 18 мая 2023 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



БЛИНОВ
Павел Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Бурение разведочных и эксплуатационных скважин, в частности на нефтяных и газовых месторождениях Восточной Сибири, сопровождается авариями и осложнениями, обусловленными вскрытием рапосодержащих пластов с аномально-высокими пластовыми давлениями (АВПД). Геологическая их неопределённость связана с отсутствием достоверной информации о напряжённом состоянии соленосных толщ, петрофизических свойствах и трещиноватости доломитов, например, Усольской свиты Ковыктинского газоконденсатного месторождения (ГКМ), не позволяет точно установить коэффициент аномальности для вскрытия рапопроявляющих пластов.

Варьируемый коэффициент аномальности от 2,35 до 2,65 и сочетание высокоминерализованных проявляющих пластов с чередующимися поглощающими интервалами не позволяют осуществлять эффективное, качественное бурение скважин. Процесс бурения сопровождается частыми остановками, переливами рапосодержащего флюида, что обуславливает организацию дополнительных мер по его утилизации и сохранению экологической безопасности региона, и как следствие, приводит к увеличению финансовых затрат на строительство скважин.

Следует отметить, что высокоминерализованная рапа приводит к коагуляции буровых и технологических жидкостей, а также негативно влияет на тампонажные растворы для последующего крепления обсадных колонн.

Анализ технико-технологических решений и производственного опыта их применения показал, что в данный момент отсутствует операционный алгоритм по реализации гидродинамического процесса формирования блокирующего экрана приствольной зоны высоконапорного рапопроявляющего пласта на основе качественных и количественных критериев выбора системы «рапа-блокирующий состав».

Повышение эффективности бурения скважин в условиях рапопроявлений возможно за счёт комплексной технологии, основанной на физико-химическом взаимодействии компонентов блокирующего состава с рапой, с учётом фильтрационных и гидродинамических процессов в приствольной зоне соленосной толщи.

Решение проблемы с рапопроявлениями позволит снизить риск

возникновения аварийных ситуаций, связанных с подготовкой ствола скважины перед спуском обсадных колонн и их последующего цементирования, а также сокращения непроизводительного времени (НПВ) бурения.

Степень разработанности темы исследования

Проблема бурения скважин, осложнённых наличием рапопроявляющих и поглощающих пластов давно является предметом широких научных и промысловых исследований. В частности, данная проблема наблюдается при строительстве скважин на Ковыктинском газоконденсатном месторождении (ГКМ), Астраханском ГКМ, Знаменском месторождении, месторождениях Восточного Предкавказья, а в зарубежном опыте – на месторождениях Узбекистана и ряде месторождений Китая.

Разработкой технологий изоляции притока пластовых вод и рапы, в частности, при строительстве скважин в условиях аномально высоких пластовых давлений занималось как российское научное сообщество, так и зарубежное. Среди отечественных ученых можно отметить труды Аверкиной Е.В., Вахромеева А.Г., Хуршудова В.А., Гороновича С.Н., Бекетова С.Б., Гасумова Р.А., Минликаева В.З., Мосиенко В.Г., Остапова О.С., Семенова Н.Я, Рябоконт С.А., Кошелева В.Н., Скокова В.А., Силина М.А и другие. За рубежом в данной области научных изысканий выделяются работы J. Wang, S. Salehi, A. Abbas, B. Bailey, A. Taha, M. Amani, N. Ahmad, H. Al-Shabibi, S. Malik.

Однако в работах перечисленных авторов не рассмотрен вопрос контроля и управления репрессией, создаваемой блокирующим составом в процессе его гидродинамического воздействия на пласт с учётом изменения его структурно-реологических характеристик и химического состава рапы.

Объект исследования – скважины, осложнённые наличием рапопроявляющих пластов.

Предмет исследования – физико-химические и структурно-реологические свойства блокирующих составов и их влияние на создаваемую репрессию в процессе реализации технологии изоляции пластов, осложненных рапопроявлениями.

Цель работы – повышение эффективности бурения скважин в

интервалах высокоминерализованных проявляющих пластов.

Идея заключается в применении разработанной технологии изоляции рапопроявляющих интервалов, основанной на мониторинге репрессии в процессе гидродинамического воздействия на систему трещин в приствольной зоне соленосной толщи блокирующим составом с учётом изменения его структурно-реологических свойств при взаимодействии с химически активными компонентами рапы.

Основные задачи исследования:

1. Теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение целесообразности и необходимости применения технологии изоляции высокоминерализованных проявляющих пластов с АВПД Ковыктинского ГКМ для повышения эффективности бурения скважин.

2. Разработка блокирующего состава для изоляции высокоминерализованных проявляющих пластов и исследование его физико-химических, структурно-реологических и фильтрационных свойств с учётом химического состава рапы и термобарических условий Ковыктинского ГКМ.

3. Разработка технологии изоляции рапопроявляющих пластов Ковыктинского ГКМ.

4. Опытнo-промышленное внедрение разработанного блокирующего состава и технологии изоляции высокоминерализованных проявляющих пластов.

Научная новизна работы:

1. Установлен механизм формирования разработанным блокирующим составом на основе метасиликата натрия и высоковязкой гидроксипропилцеллюлозы непроницаемого экрана в рапосодержащем пласте за счёт образования нерастворимого изолирующего слоя из двухвалентных солей кальция и магния, прочность которого зависит от концентрации полимеров и химического состава рапы.

2. Установлена математическая зависимость, позволяющая определить время отвердевания смеси блокирующего состава и рапы, представленной двухвалентными солями кальция и магния, от силикатного модуля жидкого стекла и концентрации гидроксипропилцеллюлозы в блокирующем составе при

термобарических условиях Ковыктинского ГКМ.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Формирование непроницаемого изоляционного экрана в приствольной зоне высоконапорного рапопроявляющего пласта при вскрытии соленосных толщ обеспечивается контролем и управлением репрессией в процессе гидродинамического воздействия на систему трещин блокирующим составом, с учётом изменения его структурно-реологических свойств при взаимодействии с химически активными компонентами рапы.

2. Разработан блокирующий состав и технология изоляции высокоминерализованных проявляющих пластов на основе мониторинга репрессии, создаваемой блокирующим составом в процессе его гидродинамического воздействия на пласт с учётом изменения его структурно-реологических характеристик и химического состава рапы.

3. Опытно-промышленное внедрение разработанной технологии изоляции рапопроявляющих пластов проводилось при испытаниях на скважине № 4031 КП №403 Ковыктинского ГКМ, что подтверждается актом об использовании результатов диссертации.

4. Разработаны экспериментальные лабораторные стенды (Патент РФ № 2784688 и Патент РФ № 2786952) для исследования блокирующей способности составов для изоляции пластов в условиях, приближенных к реальным условиям месторождения.

5. Разработан алгоритм (Свидетельство № 2022684347) расчёта основных параметров закачки блокирующего состава для предотвращения рапопроявлений.

Методология и методы исследования

Работа выполнена в соответствии со стандартными методами теоретических и экспериментальных исследований (определение плотности, вязкости, анализ компонентного состава), а также с применением специально разработанных экспериментальных методик (совместимости, фильтрации). В вычислительных экспериментах алгоритм расчёта гидродинамических параметров закачивания блокирующего состава разработан с использованием стандартных общепринятых уравнений в виде программного кода, написанного на языке программирования C#.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработанный блокирующий состав на основе водного раствора метасиликата натрия плотностью 1340 кг/м³ с силикатным модулем 2,1 и регулятора времени гелеобразования в виде высоковязкой гидроксипропилцеллюлозы 2% масс. способствует формированию в рапопроявляющем пласте с содержанием в рапе солей двухвалентных металлов кальция и магния в количестве 25,2-37,1% масс. изолирующего экрана, препятствующего поступлению рапы в скважину.

2. Разработанная технология изоляции рапопроявляющих пластов с высоким коэффициентом аномальности на основе мониторинга репрессии в процессе гидродинамического воздействия на систему трещин блокирующим составом позволяет обеспечить эффективное бурение в интервалах высокоминерализованных проявляющих пластов и соленосных толщ.

Степень достоверности результатов исследования подтверждена теоретическими и экспериментальными исследованиями с использованием современного высокотехнологичного оборудования лаборатории «Сооружение скважин» научного центра «Арктика» Горного университета, достаточной сходимостью расчетных и экспериментальных величин и воспроизводимостью результатов.

Апробация результатов. Основные положения, результаты теоретических и экспериментальных исследований, выводы и рекомендации докладывались на международных и всероссийских конференциях: международная научно-практическая конференция «Прорывные технологии в разведке, разработке и добыче углеводородного сырья» (Россия, г. Санкт-Петербург, 15-16 ноября, 2022 г.); XV Международная конференция «Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых» (Россия, г. Пермь, 18–21 октября 2022 г.); XLVII международная научно-практическая конференция «Advances in science and technology» (Россия, г. Москва, 15 сентября 2022 г.).

Личный вклад автора. Проведены теоретические и экспериментальные исследования, в результате которых разработан блокирующий состав и предложена новая технология изоляции

пластов в скважине за счёт использования солей двухвалентных металлов кальция и магния, содержащихся в рапе в качестве сшивателей. Разработаны испытательные лабораторные стенды для тестирования блокирующих составов в условиях, близких к реальным условиям месторождения.

Публикации. Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 6 печатных работах, в том числе в 1 статье – в издании 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, в 2 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 2 патента на изобретение и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав, с выводами по каждой из них, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включающего 139 наименований. Работа изложена на 140 страницах машинописного текста, содержит 26 рисунков, 16 таблиц, 5 приложений.

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность и искреннюю признательность научному руководителю д.т.н., профессору Двойникову М.В. за научное руководство над работой. За помощь в проведении исследований и ценные научные консультации научному руководителю лаборатории сооружения скважин НЦ «Арктика» к.х.н. Камбулову Е.Ю.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлено общее описание работы, обоснована актуальность, сформулированы цель и задачи исследований.

В первой главе представлен анализ геологических особенностей формирования соленосных толщ, определяющих выбор технологии изоляции рапопроявляющих пластов.

Анализ геологических особенностей формирования соленосных толщ, определяющих выбор технологии изоляции,

показал, что существующие технико-технологические решения не позволяют эффективно изолировать рапопроявляющие пласты при вскрытии соленосных АВПД толщ, представленных бивалентной агрессивней солей Ca^{2+} и Mg^{2+} .

Во второй главе представлены методология и методы проведения экспериментальных исследований, использованных при изучении физико-химических и структурно-реологических свойств пластовой жидкости и блокирующих составов.

Лабораторные исследования проводятся в 4 этапа. Определяется химический состав рапы, совместимость буровых и технологической жидкостей с рапой, физико-химические (плотность, совместимость с пластовыми флюидами), структурно-реологические (вязкость, предельное динамическое напряжение сдвига, статическое напряжение сдвига) и фильтрационные свойства блокирующих составов. Программа исследований представлена на рисунке 1.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований физико-химических, структурно-реологических и фильтрационных свойств блокирующих составов для рапопроявляющих пластов. Определен химический состав рапы Ковыктинского ГКМ для подбора компонентов блокирующего состава с учётом выявленных в рапе химически активных компонентов. Приведено обоснование возможности использования натриевого жидкого стекла в качестве основы блокирующего состава. Представлены результаты экспериментальных исследований по подбору загустителя для увеличения времени реакции смеси рапы и блокирующего состава с учётом термобарических условий Ковыктинского ГКМ.

В четвертой главе описано применение технологии изоляции, основанной на мониторинге репрессии в процессе закачивания разработанного блокирующего состава в систему трещин приствольной зоны пласта с использованием блока бурения с регулируемым давлением (БРД).

В заключении представлены обобщенные выводы по результатам исследований в соответствии с целью и решенными задачами.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых

положениях:

1. Разработанный блокирующий состав на основе водного раствора метасиликата натрия плотностью 1340 кг/м³ с силикатным модулем 2,1 и регулятора времени гелеобразования в виде высоковязкой гидроксипропилцеллюлозы 2% масс. способствует формированию в рапопроявляющем пласте с содержанием в рапе солей двухвалентных металлов кальция и магния в количестве 25,2-37,1% масс. изолирующего экрана, препятствующего поступлению рапы в скважину.

На первом этапе определяется химический состав рапы, отобранной со скважины №75 Ковыктинского ГКМ (рисунок 2 и в таблица 1) для подбора компонентов блокирующего состава с учётом выявленных в рапе химически активных компонентов.

Анализ результатов лабораторных исследований показал, что преимущественно минеральный состав рапы представлен двухвалентными солями хлорида кальция (CaCl₂) и магния (MgCl₂).

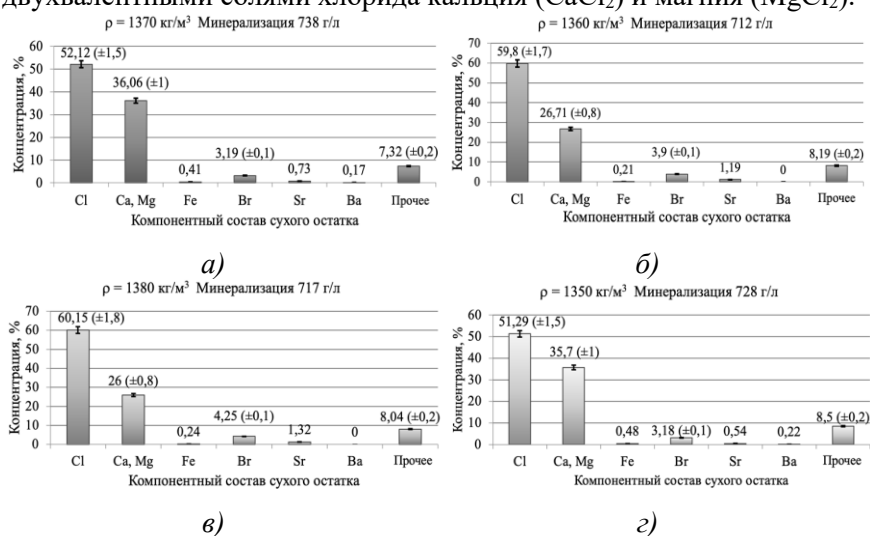


Рисунок 2 – Анализ рапы методом калибровочного графика: а) проба 1 забой 2153м после суток перелива; б) проба 2 забой 2236м; в) проба 3 забой 2236м; з) проба 4 забой 2153м забойная пачка

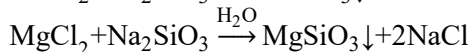
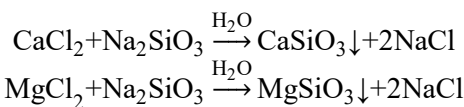
Поэтому механизм блокирования насыщенных рассолом пластов может быть основан взаимодействии между натриевого

жидкого стекла с двухвалентными солями кальция и магния, содержащимися в рапе высокоминерализованного напорного пласта.

Таблица 1 – Анализ рапы методом стандартных добавок

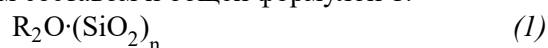
Химический элемент	Массовая концентрация элемента, мг/дм ³			
	Проба 1	Проба 2	Проба 3	Проба 4
Литий*	740	645	655	760
Бор*	81	126	121	47
Барий*	114	10,4	12,2	110
Кальций*	166000	99400	103000	163000
Магний*	34800	76300	77600	33000
Калий*	3360	967	1150	2830
Натрий*	1510	961	1140	1490
Железо*	1150	503	546	1220
Марганец*	227	87	99	234
Стронций**	2730	3011	4520	1640
Фосфат-ион***	20	45	45	50
Сульфат-ион***	2882	2209	2305	2882
Хлорид-ион***	388275	386300	396500	387750
Гидрокарбонат-ион***	1373	1525	1068	1373
Метод исследований: * Атомно-эмиссионная спектрометрия ** Спектрофотометрия *** Титриметрия				

В результате реакции происходит образование нерастворимого осадка:



Применение именно натриевого жидкого стекла связано с его меньшей себестоимостью, по сравнению с калиевым и другими аналогами.

Растворимое жидкое стекло представляет собой силикат натрия с переменным химическим составом и общей формулой 1:



где n – силикатный модуль жидкого стекла, который рассчитывается как отношение числа молей SiO_2 к одному молю щелочного оксида.

При использовании водного раствора жидкого стекла в качестве основы блокирующего состава необходимо учитывать, что жидкое стекло твердеет на воздухе. В этой связи время приготовления блокирующего состава на его основе должно быть регламентировано во избежание образования хрупкой силикатной глыбы в ёмкости. А жидкое стекло с силикатным модулем более 3,5 трудно растворимо в воде и не образует устойчивых гомогенных соединений.

Для закачивания состава в пласт необходимо снижение скорости реакции между солями рапы с метасиликатом натрия. Этого можно достичь за счёт увеличения вязкости раствора жидкого стекла.

Можно выдвинуть предположение, что для рассолов высокой минерализации наиболее предпочтительными будут неионогенные полимеры, ведь они не имеют зарядов в своих гидрофильных группах. То есть, такие соединения не будут создавать зон перераспределения электронной плотности при контакте с положительно заряженными ионами рапы. Без наличия таких зон не происходит дополнительного осадконакопления или нарушения седиментационной устойчивости соединения через флокуляцию или коагуляцию.

В качестве загустителя исследуются высоковязкая полианионная целлюлоза (ПАЦ), сополимер полиакриламида (ПАА), ксантановая камедь и гидроксиэтилцеллюлоза (ГЭЦ). Результаты исследования совместимости полимеров с рапой представлены в таблице 2.

Анализ результатов исследований показал, что полимеры на основе ПАА в рапе не растворились, потому что чаще всего подобные полимеры растворяются в пресной воде, а затем в пресные растворы добавляются неорганические соли. В пресной воде первоначально макромолекула полимера находится в развернутом состоянии, на которое тратится большая энергия растворения, после чего засоление водного раствора снижает реологические характеристики, однако не происходит его выслаивания. В рапе же изначально находятся ионы двухвалентных ионов металлов, которые не позволяют раствориться молекулам ПАА.

Полисахаридные материалы на основе ПАЦ и крахмала хотя и растворились, но к существенным изменениям структурно-реологических характеристик рапы не привели.

Таблица 2 – Изменение структурно-реологических характеристик рапы при обработке 2% полимеров

Параметр	Наименование материала и концентрация					
	Рапа	Aqua PAC L 2%	Aqua PAC R 2%	Natrosol 2%	BioSin 2%	Крахмал Поли КР 2%
ПВ, мПа·с	11	12	12	12	12	12
ДНС, дПа	5	5	20	5	5	5
СНС _{10 с} , фунт/100 фут ²	1	1	1	1	1	1
СНС _{10 мин} , фунт/100 фут ²	1	1	1	2	2	1

К изменению структурно-реологических характеристик привели полимеры BioSin и Natrosol 250 HHR, которые и исследовались в качестве загустителя (таблица 3).

Таблица 3 – Исследование влияния полимеров на структурно-реологические характеристики рапы

Параметр	Наименование материала и концентрация										
	Natrosol 250HHR, %					BioSin, %					
	1	2	3	5	7	1	2	3	5	7	10
ПВ, мПа·с	12	12	13	28	100	12	12	12	13	14	15
ДНС, дПа	5	5	14	20	144	0	5	5	5	5	10
СНС _{10 с} , фунт/100фут ²	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2
СНС _{10мин} , фунт/100 фут ²	2	2	2	2	4	1	2	2	2	2	2

В практике строительства скважин наиболее широко используются реологические параметры, входящие в уравнение Бингама-Шведова: ДНС, ПВ, а структурные характеристики оцениваются по СНС. Оптимальным соотношением считается:

$$\frac{\text{ДНС}}{\text{ПВ}} \geq 1 \div 1,5 \text{ (в ед. измерения по стандарту API)}$$

В нашем случае это соотношение достигается при концентрации неионогенного материала Natrosol 250 NHR в концентрации 3%. Наибольшей совместимостью с рапой обладает полимер на основе ГЭЦ за счёт более гибкой макромолекулой и неионогенным характером функциональных групп: -CH₂OCH₂CH₂OH и -НС-OCH₂CH₂OH в ГЭЦ.

Следующим шагом исследования является изучение влияния полимера на структурно-реологические характеристики непосредственно на товарный водный раствор силиката натрия плотностью 1420 кг/м³ (таблица 4).

Таблица 4 – Изменение структурно-реологических свойств раствора силиката натрия в зависимости от концентрации Natrosol 250NHR

Концентрация, %	2	4	6	8	10
Структурно-реологические характеристики					
Θ ₆₀₀	94	>300	>300	>300	>300
Θ ₃₀₀	56	>300	>300	>300	>300
Θ ₂₀₀	40	253	>300	>300	>300
Θ ₁₀₀	22	179	>300	>300	>300
Θ ₆	2	16	77	192	>300
Θ ₃	1	9	44	121	210
ПВ, мПа·с	38	-	-	-	-
ДНС, дПа	18	-	-	-	-
СНС _{10с} , фунт/100 фут ²	2	9	42	120	227
СНС _{10мин} , фунт/100 фут ²	3	9	44	124	>300

В силу высокой плотности раствора за счет большой концентрации метасиликата натрия в водном растворе структурно-реологические характеристики жидкого стекла кратно завышены по сравнению с растворами полимера в рапе.

Механизм резкого увеличения реологических характеристик раствора ГЭЦ определяется ее химическим строением первичного структурного звена. Гидроксиэтилцеллюлоза, как и большинство разветвленных полисахаридов, способна образовывать высоковязкие растворы при низких концентрациях. Во время диспергирования в воде

боковые гидроксизтил- и дигидроксизтильные группы, присоединенные к кору целлюлозы, взаимодействуют посредством водородных связей с молекулами воды, что приводит к межмолекулярному переплетению молекул ГЭЦ в водной фазе, что в свою очередь приводит к увеличению вязкости и гелеобразованию.

При дальнейшем увеличении концентрации ГЭЦ происходит увеличение вязкости и гелеобразование, в этом случае молекулы воды образуют упорядоченную структуру вокруг молекулы ГЭЦ и тем самым приводит к кратному росту структурно-реологических характеристик.

Так если углы закручивания больше 300 градусов в рапе достигаются при концентрации полимера 10%, то параметры раствора жидкого стекла становится незамеримыми по вискозиметру Fann-35SA уже при концентрации 4%. Поэтому в дальнейшем исследовались составы на основе растворов жидкого стекла плотностью 1320 кг/м³ и 1340 кг/м³ с силикатным модулем 2,01 и 0,9, в качестве загустителя Natrosol 250 HHR в концентрациях не более 2%.

Для оценки фильтрационных свойств исследованы 6 блокирующих составов с различным силикатным модулем жидкого стекла и концентрацией полимерного загустителя. Исследования проводятся на модифицированной ячейке динамического фильтр-пресса НРНТ OFITE (рисунок 3).

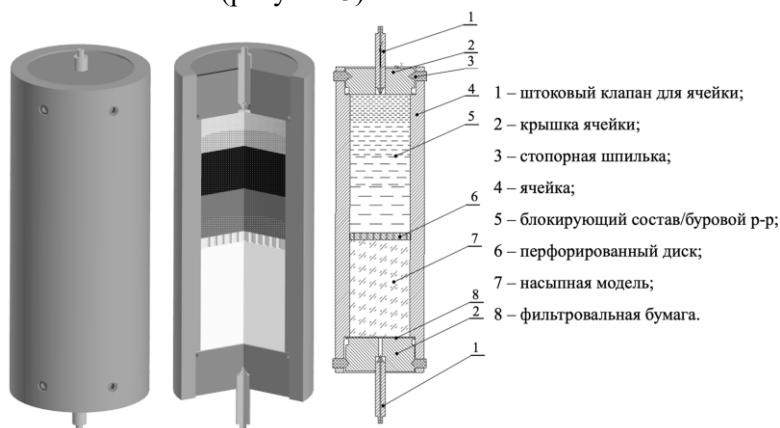


Рисунок 3 – Схема ячейки фильтра-пресса НРНТ

На основе промысловых данных по вскрытию рапопроявляющих пластов на Ковыктинском ГКМ максимальное давление на устье при закрытом превенторе составляет 27,36 МПа. В этой связи, для проведения исследований приняты следующие термобарические условия: давление с учетом 5% запаса – 28,73 МПа и температура, согласно ГТР-Р579/17 (Р)-ИОС1 – 35 °С.

Зависимость изменения фильтрации во времени для различных сшивающих составов представлена на рисунке 4.

Анализ результатов исследований фильтрации показал, что время реакции большинства составов наступает в диапазоне 80-100 минут (перегиб на кривой и выравнивание). Применение составов с подобным временем реакции делает их применение неподходящим с технологической точки зрения.

Применение раствора жидкого стекла с силикатным модулем 2,1 без разбавления и добавок эффективно: надежно и быстро схватывает образец горной породы, насыщенный рапой, с легкостью проникает между зернами горной породы. Однако, его применение при изоляции рапопроявляющих пластов может быть осложнено с технологической точки зрения из-за очень высокой скорости схватывания и интенсивности фильтрации.

Раствор жидкого стекла силикатным модулем 0,9-1,1 показал заниженные результаты при измерении фильтрации. Объемная модель не прочно сшита. Такой силикатный модуль можно считать слишком низким и неэффективным при сшивании рассолов высокой минерализации.

Разбавленный раствор силиката натрия с модулем 0,9-1,1 показал лучшие результаты по фильтрации, чем неразбавленный раствор, сравнимые с разбавленным раствором жидкого стекла с силикатным модулем 2,1. Однако, извлеченная объемная модель показала худшие результаты по прочности среди всех исследованных.

Разбавленный раствор жидкого стекла силикатным модулем 0,9-1,1, обработанный ГЭЦ в концентрации 0,5% и 1%, не показал своей эффективности: фильтрация через объемную модель ухудшилась, прочного сшивания модели не произошло. Тем не менее добавление полимера повлияло на увеличение фронта сшивания:

сшитые агрегаты из зерен горной породы и осадка реакции сшивателя и рапы увеличивались в размерах.

Разбавленный раствор силиката натрия с силикатным модулем 2,1, обработанный 2% ГЭЦ показал удовлетворительные результаты. Время реакции увеличивается до 150 минут и тем самым делает возможным применение состава с технологической точки зрения, а целевое назначение полимера в виде замедлителя реакции образования осадка показало свою эффективность. Сшитая насыпная модель после обработки таким составом обладает самой высокой прочностью. Состав может быть использован для изоляции системы трещин в приствольной зоне соленосной толщи.

Внешний вид насыпных моделей после фильтрации представлен на рисунке 5, а процесс сшивания рапы и образование блокирующего экрана на рисунке 6.

2. Разработанная технология изоляции рапопроявляющих пластов с высоким коэффициентом аномальности на основе мониторинга репрессии в процессе гидродинамического воздействия на систему трещин блокирующим составом позволяет обеспечить эффективное бурение в интервалах высокоминерализованных проявляющих пластов и соленосных толщ.

Установка блокирующего состава в проявляющий пласт предусматривает применение блока БРД для оперативного управления давлением с целью поддержания постоянного забойного давления на любой глубине интервала, определения фактических градиентов пластовых давлений и градиентов давления гидроразрыва в динамике, и возможности быстрого понижения/повышения эквивалентной циркуляционной плотности (ЭЦП) на забое.

Поэтапная схема закачивания блокирующего состава в пласт представлена на рисунке 7.

Порядок работ по установке блокирующего состава:

1. После отбора рапы на забое промыться не менее 2-х полных циклов скважины с производительностью 40-45 л/с, интенсивным расхаживанием бурильного инструмента и вращением верхнего силового привода.

2. Убедившись в отсутствии шлама на виброситах, приступить

к подъёму бурильного инструмента для смены КНБК.

3. Приготовить в одной из емкостей блокирующий состав.

4. После подъема бурильного инструмента на земную поверхность закрыть превентор и наблюдать за давлением на устье скважины. В случае отсутствия роста давления на устье скважины приступить к сборке бурильного инструмента без элементов КНБК с открытой воронкой на забой.

5. Спустить бурильный инструмент до глубины выше на 10-15 м от забоя и промыть в течение двух циклов с расхаживанием бурильного инструмента и наблюдением за выходом шлама на ситах.

6. В случае отсутствия шлама на ситах, скачков давления и наличия свободного хождения бурильного инструмента приступить к закачиванию состава сшивателя в открытый ствол.

7. При производительности буровых насосов $Q = 12-14$ л/с закачать требуемый объем блокирующего состава (из расчета вытеснения сшивателя из трубного пространства) выше на 40-50 м.

8. Поднять воронку бурильного инструмента выше предполагаемой «головы» буферного состава, загерметизировать затрубное пространство создав избыточное давление, закачать расчетный объем бурового раствора. Величина создаваемого избыточного давления определяется по промысловым данным.

9. Поддержание давления при установке блокирующего состава следует осуществлять в течение 1,5-2 ч с наблюдением за изменением давления в затрубном пространстве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы:

1. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена целесообразность применения технологии изоляции рапопроявляющих пластов и мониторинга репрессии на систему трещин соленосной толщи с учётом механизма, учитывающего количественные и качественные критерии выбора системы «рапа-блокирующий состав».

2. Разработан блокирующий состав на основе водного раствора метасиликата натрия и высоковязкой гидроксипропилцеллюлозы, позволяющий повысить эффективность бурения скважин в

интервалах рапопроявлений на Ковыктинском ГКМ. Экспериментально подтверждено соответствие физико-химических и структурно-реологических свойств блокирующего состава требованиям, необходимым для изоляции рапопроявляющих пластов в термобарических условиях интервала Бельской свиты.

3. Разработана технология изоляции рапопроявляющих пластов, основанная на мониторинге репрессии в процессе гидродинамического воздействия на систему трещин блокирующим составом, с учётом его структурно-реологических свойств и химического состава рапы.

4. Опытнo-промышленное внедрение разработанной технологии изоляции рапопроявляющих пластов показало свою эффективность при испытаниях на скважине № 4031 КП №403 Ковыктинского ГКМ. Сокращение непроизводительного времени составляет от 7 до 10 суток.

Перспективой развития темы диссертационного исследования в будущем является разработка составов и технологии для ликвидации поглощений при бурении хемогенных отложений Восточной Сибири.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикация в издании из Перечня ВАК:

1. Двойников, М.В. Солеотложение и рапопроявление: анализ проблем возникающих при строительстве скважин / Двойников М.В., **Сидоров Д.А.**, Камбулов Е.Ю., Лаврик А.Ю. // Деловой журнал Neftegaz.RU. – 2022. – № 10(130). – С. 20-25.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

2. Dvoynikov, M. Salt Deposits and Brine Blowout: Development of a Cross-Linking Composition for Blocking Formations and Methodology for Its Testing / Dvoynikov M., **Sidorov D.**, Kambulov E., Rose F., Ahiyarov R. // Energies 2022, 15, № 7415. DOI: 10.3390/en15197415.

3. Buslaev, G. Ensuring the Sustainability of Arctic Industrial Facilities under Conditions of Global Climate Change / Buslaev G., Tsvetkov P., Lavrik A., Kunshin A., Loseva E., **Sidorov D.** // Resources 2021, 10, 128. DOI: 10.3390/resources10120128.

Публикации в прочих изданиях:

4. **Сидоров, Д.А.** Разработка технологии изоляции рапосодержащих пластов при бурении скважин / **Сидоров Д.А., Камбулов Е.Ю., Двойников М.В.** Тезисы докладов международной научно-практической конференции Прорывные технологии в разведке, разработке и добыче углеводородного сырья, г. Санкт-Петербург, 15-16 ноября, 2022 г. С. 121

5. **Сидоров, Д.А.** Разработка стенда для физического моделирования процесса ликвидации рапопроявлений / **Сидоров Д.А.** Куншин А.А., Двойников М.В. // Сборник материалов XV Международной научно-технической конференции, г. Пермь – 18–21 октября 2022 г. С. 348-351.

6. **Сидоров, Д.А.** Солевые отложения и рапопроявления: разработка швивающих составов для блокирования пластов при бурении скважин / **Сидоров Д.А., Двойников М.В.** // Сборник статей XLVII Международной научно-практической конференции Advances in Science and Technology, г. Москва, 15 сентября 2022 г. С. 84-85.

Патенты и свидетельства:

7. Патент № 2784688 С1 Российская Федерация, МПК G09В 23/40. Стенд для физического моделирования процесса ликвидации водопроявлений: № 2022112145: заявл. 05.05.2022: опубликовано 29.11.2022 / **Сидоров Д.А., Двойников М.В., Волков С.В., Сержан С.Л.**; заявитель СПГУ. – 14 с.

8. Патент № 2786952 С1 Российская Федерация, МПК E21В 47/10. Стенд для исследования удерживающей способности составов: № 2022117431: заявл. 11.05.2022: опубликовано 26.12.2022 / **Двойников М.В., Сидоров Д.А., Волков С.В.**; заявитель СПГУ. – 10 с.

9. Свидетельство № 2022684347. Российская Федерация. Программа для расчёта гидравлических параметров буровых и технологических жидкостей при бурении и ремонте скважин: № 2022683780: заявлено 07.12.2022: опубликовано 13.12.2022 / **Сидоров Д.А., Куншин А.А., Гуреев И.А.**; заявитель СПГУ. – 1 с.



Рисунок 1 – Программа проведения лабораторных исследований

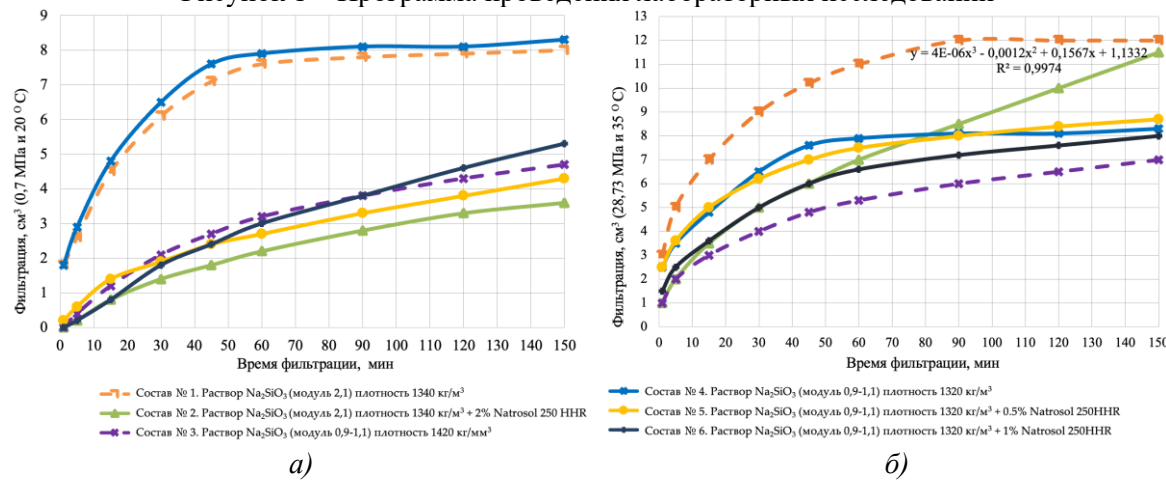


Рисунок 4 – Зависимость изменения фильтрации во времени для различных блокирующих составов а) 0,7 МПа и 20 °С; б) 28,73 МПа и 35 °С



а)



б)

Рисунок 5 – Внешний вид насыпной модели после закачивания разработанного состава а) прочная модель; б) непрочная



а)

б)

в)

Рисунок 6 – Процесс сшивания рапы в насыпной модели а) формирование насыпной модели; б) насыщение рапой и прокатка состава, сшивание рапы; в) отвердевание смеси и образование блокирующего экрана

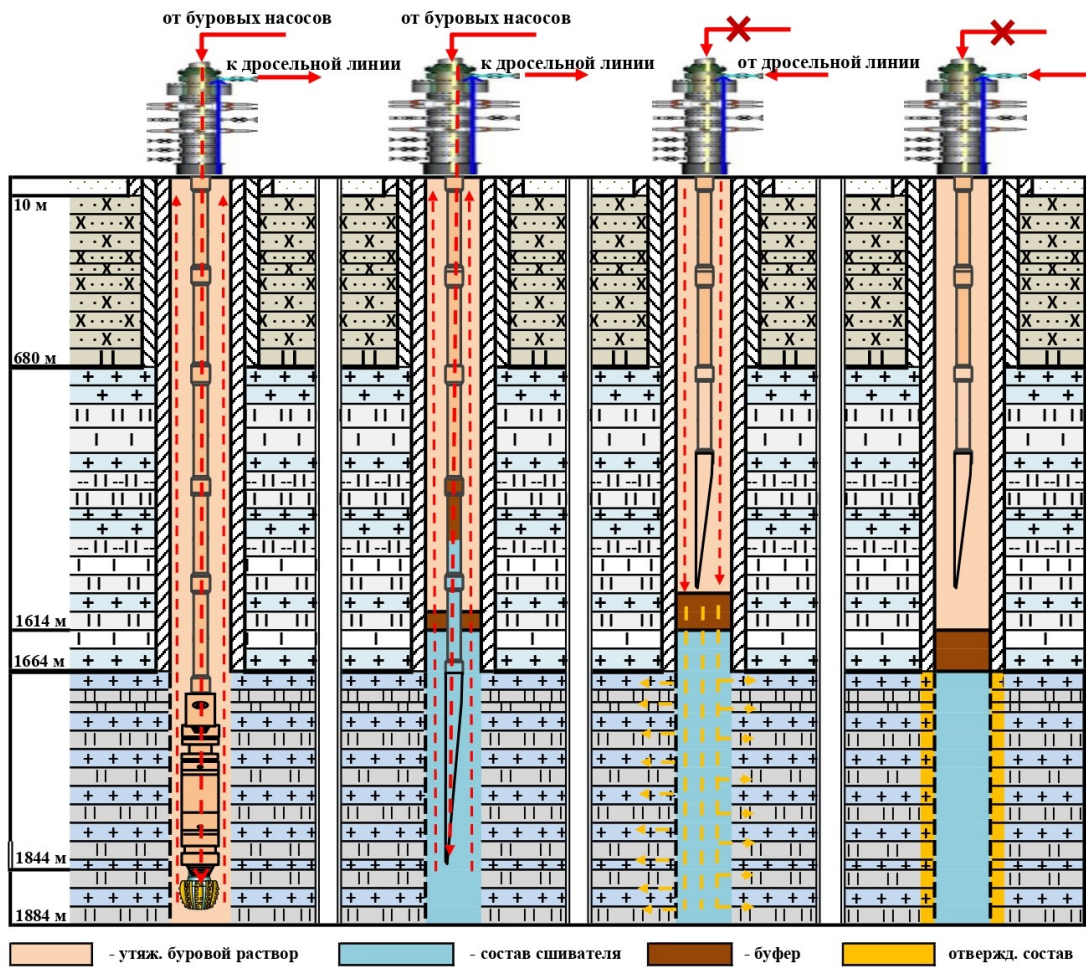


Рисунок 7 – Поэтапная схема установки блокирующего состава в рапоносный горизонт на Ковыктинском ГКМ