

На правах рукописи

Коптева Анастасия Игоревна



**РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОГО МЕТОДА
ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ЦЕМЕНТНОГО
РАСТВОРА-КАМНЯ ПРИ ЗНАКОПЕРЕМЕННОМ
ТЕМПЕРАТУРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ МЕРЗЛЫХ
ПОРОД В СКВАЖИНЕ**

*Специальность 2.8.2. Технология бурения и освоения
скважин*

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

Санкт-Петербург – 2025

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

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, главный научный сотрудник;

Коротков Сергей Александрович

кандидат технических наук, доцент, общество с ограниченной ответственностью «СибГеоПроект», Департамент геолого-промысловых работ, начальник отдела научных исследований и разработок.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет», г. Самара.

Защита диссертации состоится **24 декабря 2025 г. в 14:30** 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 № 3321**.

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

Автореферат разослан 24 октября 2025 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



БЛИНОВ
Павел Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Крепление скважин в районах Крайнего Севера сопровождается рядом осложнений, обусловленных наличием многолетнемерзлых пород (ММП). Одним из осложнений является нарушение герметичности затрубного пространства, приводящее к возникновению межколонных давлений и межпластовых перетоков, что чревато газопроявлениями и выбросами флюида на дневную поверхность.

Важным фактором нарушения герметичности цементного камня в интервале до 500 м являются циклические знакопеременные температуры от 20 до -8°C , возникающие как в процессе ожидания затвердевания цементного раствора (ОЗЦ), так и в период дальнейшего углубления скважины. Например, во время промывки скважины, в процессе бурения после ОЗЦ ниже лежащих интервалов на ранее зацементированный кондуктор, находящийся в зоне мерзлых пород, действуют положительные температуры. Они вызваны тепловыделением от циркуляции технологических жидкостей и экзотермической реакцией гидратации цементного раствора.

Следует отметить, что в условиях низких и отрицательных температур циклические воздействия усугубляются неполной гидратацией клинкерных материалов. Наличие остаточной жидкости затворения в структуре цементного камня, не вступившей в реакцию из-за замедления процессов гидратации, приводит к ее замерзанию и расширению при отрицательных температурах. Эти повторяющиеся циклы «замораживания–оттаивания» формируют внутрипоровые напряжения, разрушающие микроструктуру цементного камня и нарушающие адгезию на контактах «обсадная колонна – цементный камень – горная порода».

Таким образом, актуальность работы обусловлена необходимостью в разработке комплексного метода исследования в

лабораторных условиях физико-механических свойств, в том числе устойчивости структуры цементного камня к циклическим знакопеременным температурам, возникающим на этапах ОЗЦ, и последующих технологических операциях в интервалах залегания ММП.

Степень разработанности темы исследования

Научными исследованиями в области крепления обсадных колонн в криолитозоне и изучением механизмов формирования кристаллической структуры тампонажного камня занимались многие зарубежные и российские ученые.

Существенный вклад в разное время внесли Ф.А. Агзамов, А.И. Булатов, Л.А. Видовский, Р.А. Гасумов, Д.С. Герасимов, А.Т. Горский, Г.С. Грязнов, В.С. Данюшевский, С.И. Конторович, В.Г. Кузнецов, Р.И. Медведский, В.П. Овчинников, Н.И. Николаев, П.В. Овчинников, П.А. Ребиндер, Н.В. Самсоненко, С.В. Стригоцкий, З.З. Шарафутдинов, К.Ф. Шуть, А.М. Яковлев, М.А. Goodman, W.M. Thorvaldson и другие исследователи.

Однако в их научных трудах не затрагивались вопросы комплексного изучения в лабораторных условиях влияния знакопеременных температур на формирование структуры цементного камня, ее целостности в процессе гидратации с учетом моделирования температурного профиля скважины. Наличие современных контрольно-измерительных приборов, средств измерений, в том числе тензоров напряжений, позволяет расширить теоретические знания в данной области и внести уточнения в развитие научных основ процессов крепления скважин в условиях ММП.

Объект исследования – цементный раствор-камень в заколонном пространстве скважины в интервале залегания многолетнемерзлых пород.

Предмет исследования – процесс формирования структуры и оценка изменения физико-механических свойств цементного раствора–камня в интервале залегания многолетне-мерзлых пород.

Цель работы – повышение качества крепления скважин в интервалах залегания многолетнемерзлых пород.

Идея работы заключается в обосновании выбора рецептуры тампонажного состава с использованием комплексного метода оценки и подбора его свойств, основанного на тензометрических и микротомографических исследованиях цементного камня при воздействии циклических знакопеременных температур в скважине.

Основные задачи исследования:

1. Теоретическое обоснование необходимости и целесообразности разработки новых подходов исследования свойств цементного раствора–камня в условиях циклических знакопеременных температур.

2. Разработка математической модели, позволяющей определить теплообмен в скважине и обратное промерзание цементного камня в результате температурных циклических воздействий в процессе крепления и ОЗЦ.

3. Разработка лабораторной установки и исследование изменений свойств цементного камня, возникающих в результате циклических температурных воздействий при его формировании в интервалах залегания мерзлых пород.

4. Разработка комплексного метода изучения тампонажного раствора и микроструктуры цементного камня в условиях температурных знакопеременных воздействий с оценкой влияния циклов «замораживания-оттаивания».

Научная новизна работы:

1. Теоретически обоснован и экспериментально уточнен принцип формирования закрытой и открытой пористости

цементного камня для условий распространения многолетне-мерзлых пород в скважине в зависимости от количества непро-гидратировавшей внутрипоровой жидкости, основанный на исследовании изменения механических напряжений в образцах при циклических знакопеременных температурах.

2. Установлены математические зависимости, позволяющие определить изменения механических напряжений при формировании образцов цементного камня на основе бездобавочного тампонажного портландцемента и с добавлением полимера в зависимости от количества циклов воздействия отрицательных и положительных температур.

Соответствие паспорту специальности

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 2.8.2. Технология бурения и освоения скважин по пунктам: 7, 8.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. На основе тензометрических и микротомографических исследований обосновано влияние циклических знакопеременных температур при ОЗЦ в скважине на физико-механические свойства цементного камня и формирование его открытой и закрытой пористости, скорость гидратационных процессов и их периодичность в тампонажной системе с различным содержанием компонентов.

2. Разработана климатическая камера для исследования процессов термоотверждения образцов цементного раствора при циклических отрицательных и положительных температурах (патент № 2828105) и устройство для определения собственных внутренних напряжений цементного камня (патент № 2838840).

3. Разработанный комплексный метод исследования свойств цементного раствора-камня при знакопеременном температурном воздействии рекомендован к использованию в ком-

пании ООО «БурСервис» в качестве базовой лабораторной методики оценки напряженно-деформированного состояния образцов, сформированных в условиях мерзлых пород (акт о внедрении от 20.01.2025).

4. Предложенные методы и методика исследования свойств цементного раствора-камня в знакопеременном температурном диапазоне используются при проведении лабораторных и практических занятий со студентами нефтегазового факультета Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II, а также при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) для нефтегазовых компаний.

Методология и методы исследования.

Работа выполнялась с использованием стандартных методов исследований, включающих в себя: информационно-аналитические, экспериментальные, методы математической статистики, а также программный комплекс COMSOL Multiphysic. При проведении исследований применяется комплексный подход к изучению структуры цементного камня с учетом циклических знакопеременных температурных воздействий, включающий исследования фильтрационных свойств, рентгеновский (томографический), ультразвуковой и тензометрический методы. Эксперименты проведены на лабораторной базе Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Разработанный комплексный метод исследования свойств цементного камня, сочетающий моделирование температурных полей в скважине, тензометрический анализ деформаций и микроструктурную диагностику, позволяет прогнозировать его устойчивость к циклическим температурным воздействиям в условиях ММП в диапазоне от -8°C до $+20^{\circ}\text{C}$.

2. Изменение водотвердого отношения и применение полимерной добавки на основе полиакриламида с концентрацией до 0,6% обеспечивают снижение температуры фазового перехода внутривещной жидкости в твердое состояние и компенсируют напряжения при циклических знакопеременных температурах в закрытой пористости структуры цементного камня на основе бездобавочного тампонажного портландцемента ПЦТ-I-50, что позволяет регулировать время ОЗЦ в скважине.

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

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих конференциях: Международная научно-практическая конференция «Прорывные технологии в разведке, разработке и добыче углеводородного сырья» (г. Санкт-Петербург, 2022 г., 2024 г., 2025 г.); XVI Международная научно-практическая конференция «Новые идеи в науках о Земле» (г. Москва, 2023 г.); Всероссийская научно-практическая конференция «Ашировские чтения 2024» (г. Самара, 2024 г.).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования цементирования скважин в условиях многолетнемерзлых пород. Разработаны и теоретически обоснованы: математические модели, стенды для изучения деформационных изменений в микроструктуре цементного камня при воздействии циклических знакопеременных температур. Выполнены экспериментальные

исследования, обосновывающие формирование структуры цементного камня в интервалах залегания мерзлых пород.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 8 печатных работах, в том числе в 4 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 2 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 2 патента.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 135 наименований, и 2 приложения. Диссертация изложена на 129 страницах машинописного текста, содержит 35 рисунков и 14 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проанализированы проблемы крепления скважин в интервалах развития ММП. Рассмотрено влияние низких положительных и отрицательных температур на процесс гидратации тампонажного раствора и основные существующие технологические решения по минимизации температурных воздействий от ММП на крепь скважины.

Во второй главе представлен комплексный подход к исследованию тампонажного раствора и цементного камня, направленный на оценку их свойств в условиях ММП. Проведено математическое моделирование теплопереноса для определения граничных условий скважинных воздействий. Разработана лабораторная установка для создания циклических

знакопеременных температурных воздействий, а также устройство для регистрации возникающих напряжений в структуре цементного камня.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований процессов гидратации тампонажных растворов, изменения деформационных и физико-механических свойств цементного камня при циклическом воздействии знакопеременных температур. На основе математического моделирования определен температурный профиль скважины. Получены эмпирические зависимости возникающих напряжений в образцах от температуры и количества циклов.

В четвертой главе представлен сравнительный анализ результатов лабораторных исследований свойств цементного камня и данных ультразвуковых исследований. Разработана и верифицирована модель динамики набора прочности цементного камня в условиях циклических температурных воздействий. На ее основе дана рекомендация к применению результатов акустической цементометрии с учетом введения калибровочных коэффициентов, позволяющих прогнозировать прочность цементного камня в затрубном пространстве.

Основные результаты выполненных исследований отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Разработанный комплексный метод исследования свойств цементного камня, сочетающий моделирование температурных полей в скважине, тензометрический анализ деформаций и микроструктурную диагностику, позволяет прогнозировать его устойчивость к циклическим температурным воздействиям в условиях ММП в диапазоне от 8°C до +20°C.

На первом этапе проводится оценка воздействия температурного контура со стороны окружающего массива и прода-

вочной жидкости на тапонажную систему с помощью вычислительного эксперимента в COMSOL Multiphysics. Определяются граничные временные и температурные условия для последующих исследований, имитирующих реальные процессы ОЗЦ в скважине.

Моделирование теплопереноса базируется на уравнении теплопроводности Фурье для нестационарного случая (1):

$$dQ = -\lambda \frac{dt}{dx} dF d\tau, \quad (1)$$

где dQ – количество теплоты, Дж; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); dt – температурный градиент; dF – элемент площади, м²; $d\tau$ – элемент времени, с.

В начальный момент времени цементный раствор рассматривается в жидкой фазе, а теплоперенос к породе описывается комбинацией теплопроводности и конвективной теплоотдачи, соотношение между которыми определяется критерием Нуссельта.

В результате вычислений получена математическая модель прогнозирования изменения температуры цементного камня, которая может быть представлена в общем виде (2):

$$(\rho c_p)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_f c_{p,f} \mathbf{u} \nabla T = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + q_{src}(T, t) + q_{vd} \quad (2)$$

где T – температура, °С; t – время, с; $(\rho c_p)_{eff} = (1-\phi)\rho_s c_{p,s} + \phi\rho_f c_{p,f}$ – эффективная объемная теплоемкость, Дж/(м³·К); ϕ – пористость; индексы s, f – твердая и жидкая фазы; ρ – плотность, кг/м³; $\mathbf{u}$ – скорость жидкости в порах твердой фазы, м/с; c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении, кДж/(кг·К); $\mathbf{u}$ – скорость жидкости в порах твердой фазы, м/с; k_{eff} – эффективная теплопроводность, Вт/(м·К); q_{vd} – тепло выделяемое при вязком трении, Вт/м³; q_{src} – объемная мощность источников тепла, Вт/м³.

Анализ результатов исследований показал, что температура цементного камня в интервалах ММП достигает 0°С через

10 часов после закачки, затем снижается до температуры окружающего массива. Циклы «замораживания–оттаивания» (охлаждение до -8°C и нагрев до $+20^{\circ}\text{C}$) воспроизводят реальные условия.

С целью создания циклических знакопеременных температурных условий, соответствующих скважинным, разработана климатическая камера (рисунок 1).

Определение напряженно-деформированного состояния цементного камня в условиях циклических знакопеременных температурных воздействий осуществляется с использованием разработанного устройства, входящего в конструкцию климатической камеры. Установка оснащена тензометрическим датчиком, регистрирующим механические деформации, и датчиками контроля температуры в камере и теле образца. Калибровка тензометрических датчиков выполнена с использованием эталонных грузов и включает установку нуля, калибровку чувствительности и проверку линейности в рабочем диапазоне измерений.

Для формирования образцов применяются стандартизированные призматические формы размером $40\times40\times160$ мм. Затем подготовленные формы с тампонажным раствором и установленными в них датчиками помещаются в климатическую камеру, в которой имитируются циклические знакопеременные температурные воздействия. Продолжительность цикла «замораживания–оттаивания» для воссоздания условий, приближенных к реальным, определена результатами численного моделирования и ОЗЦ согласно РД 39-00147001-767-2000.

В качестве базовой рецептуры используются составы на основе тампонажного портландцемента ПЦТ-I-50: как без модифицирующих добавок (позволяет исключить влияние сторонних компонентов на деструктивные процессы в структуре цементного камня при циклических знакопеременных

температурах), так и с добавлением полимера до 0,6% при водоцементном соотношении 0,5. Тестирование тампонажных растворов и цементного камня проводится в соответствии с отечественными и международными стандартами.

В ходе испытаний в условиях знакопеременных температур образцы испытывали растягивающие (положительные) и сжимающие (отрицательные) напряжения, численно регистрируемые тензодатчиками.

На рисунке 2 представлены результаты исследований внутренних напряжений цементного камня базового состава (а) и состава с полимером (б) с учетом воздействия циклов знакопеременных температур.

Установлено, что нарушение структуры цементного камня при знакопеременных температурных воздействиях обуславливается наличием свободной жидкости затворения, не вступившей в реакцию гидратации с клинкерным материалом в поровом пространстве. При охлаждении ниже точки температуры замерзания кристаллизующаяся жидкость в порах создает внутреннее напряжение на матричный каркас цементного камня. Наблюдается последовательное снижение деформационных напряжений в цементном камне при циклическом воздействии температур. Максимальные деформационные изменения, по результатам микроструктурной диагностики, происходят при первом и втором циклах «замораживания–оттаивания».

На основании проведенных исследований предложен комплексный метод, сочетающий моделирование, лабораторные эксперименты и аналитические методы обработки результатов, позволяющий повысить качество оценки физико-механических свойств цементного раствора-камня в лабораторных условиях. Комплексный метод исследований представлен в виде блок-схемы на рисунке 3.

2. Изменение водотвердого отношения и применение полимерной добавки на основе полиакриламида с концентрацией до 0,6% обеспечивают снижение температуры фазового перехода внутрипоровой жидкости в твердое состояние и компенсирует напряжения при циклических знакопеременных температурах в закрытой пористости структуры цементного камня на основе бездобавочного тампонажного портландцемента ПЦТ-I-50, что позволяет регулировать время ОЗЦ в скважине.

Отрицательные температуры в ММП замедляют химические реакции, диффузию ионов и гидратацию, а также вызывают риск фазовых переходов непрогидратировавшей жидкости затворения. Замерзание этой жидкости нарушает структуру цементного камня, повышая пористость и снижая его прочность.

В результате тензометрических исследований установлено, что введение ПАА в раствор значительно снижает напряжения в цементном камне (рис. 2 (б)). Однако чрезмерное количество полимера может привести к замедлению гидратации и снижению скорости набора прочности. Точки роста температуры перед скачком напряжения и связанные с ними экзотермические «пики» подтверждают, что рост напряжений вызван фазовыми переходами непрогидратировавшей жидкости. Наблюдаемое снижение напряжений с увеличением числа температурных циклов, а также уменьшение амплитуды экзотермических «пииков» свидетельствуют об уменьшении объема «свободной» жидкой фазы в системе.

На основании проведенных экспериментальных исследований методом тензометрии построены математические зависимости $\sigma = f(T)$, где σ – напряжения, МПа; T – температура, °С. Результаты аппроксимации для двух циклов «замораживания–оттаивания» базового и модифицированного составов

представлены в таблице 1. Эмпирические коэффициенты подобраны методом наименьших квадратов.

Таблица 1 – Математические модели изменения напряжений при температурных циклах «замораживания–оттаивания»

Стадия	Математическая модель	
	Базовый	Модифицированный
Замор.	$\sigma = 0,067598 + \frac{0,119523}{T}$	$\sigma = 0,0263674 + \frac{0,04448}{T}$
Отт.	$\sigma = 0,0638756 + \frac{0,0210165}{T}$	$\sigma = 0,0248075 + \frac{0,0121874}{T}$
Замор.	$\sigma = 0,0629535 + \frac{0,124762}{T}$	$\sigma = 0,0205163 + \frac{0,029992}{T}$
Отт.	$\sigma = \frac{1}{18,6017 + 0,00371205 e^{-T}}$	$\sigma = \frac{1}{46,7073 + 0,0156187 e^{-T}}$

Результаты экспериментальных исследований микро-структуры образцов цементного камня различного состава, полученные с использованием рентгеновской микротомографии и сканирующей электронной микроскопии, позволили выявить качественные изменения их структуры. Так, образец с добавочным компонентом на основе ПАА характеризуется меньшей трещиноватостью и, как следствие, большей сохранностью структуры.

Подтверждением перераспределения порового пространства в цементном камне в результате воздействия температурных циклов является увеличение проницаемости. Для бездобавочного состава установлено увеличение значений газопроницаемости на 22,8% - от $1,97 \text{ мкм}^2 \cdot 10^{-3}$ до $2,42 \text{ мкм}^2 \cdot 10^{-3}$ после 4 цикла. В свою очередь модификация полимером снижает этот эффект на 18,6% – наблюдается изменение газовой проницаемости от 2,15 до $1,75 \text{ мкм}^2 \cdot 10^{-3}$ к завершению 4 цикла.

На рисунке 4 представлены результаты исследования прочностных характеристик испытываемых образцов цементного

камня при нормальных условиях (а) и после воздействия температурных циклов (б). Однако после 5 циклов (140 ч) прочность образцов с ПАА снижается значительно, чем у бездобавочных. Механизм связан с кристаллизацией непрогидратировавшей жидкости при охлаждении (рисунок 5). Определение влагосодержания на каждом цикле показало снижение свободной воды, что коррелирует с приближением к теоретической максимальной прочности ($R_{\max}$). Влагосодержание образцов после высушивания принималось равным нулю. Разница масс соответствует массе непрогидратировавшей жидкости к концу каждого цикла «замораживания–оттаивания», характеризующей «запас» набора прочности в связи с возобновляющейся гидратацией при повышении температуры. График потери влаги (рисунок 6) определяет время достижения «нулевого» влагосодержания, соответствующего максимальному замедлению набора прочности (теоретический предел $R_{\max}$). Эмпирические зависимости показали достижение «условного нуля» для образцов на 108, 129 и 167 часах (4, 5 и 6 циклах соответственно). Предельная прочность образца с ПАА достигается на более поздних сроках из-за замедления процесса гидратации.

Комплексирование результатов влияния изменения температуры от времени в течение цикла «замораживания–оттаивания» и прочности на сжатие исследуемых образцов позволило предложить принципиальную модель формирования прочностных характеристик цементного камня при воздействии циклических знакопеременных температур (рисунок 7). График скорости набора прочности, описываемый затухающими колебаниями, отражает процесс гидратации. Для образцов с ПАА наблюдается значительное увеличение периода интенсивного набора прочности. Уменьшение водоотдачи обеспечивает более длительную гидратацию, но теоретический прочностной максимум образцов с ПАА (б) превышает максимум бездобавочных (а).

Результаты ультразвукового анализа цемента воспроизводит ступенчатую кинетику: замедление и выход на «плато» при переходе в отрицательные температуры и возобновление прироста прочности при возвращении к положительным температурам.

Изменение водотвердого отношения и применение полимерной добавки полиакриламида с концентрацией до 0,6% позволяет снизить значения динамического модуля упругости за счет формирования гомогенной микроструктуры цемента, снижающей жесткость и увеличивающей устойчивость к воздействию циклических знакопеременных температур.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации содержится решение научно-технической задачи, направленной на повышение качества крепления скважин в интервалах залегания ММП за счет разработки комплексного метода исследования свойств цементного раствора-камня при воздействии циклических знакопеременных температур. По результатам выполнения диссертационной работы сформулированы следующие наиболее значимые результаты:

1. Теоретически обоснована необходимость разработки новых подходов к исследованию тампонажных материалов для условий возникновения знакопеременных температур в скважине. Установлено, что стандартные методы оценки прочности и долговечности цементного камня не полностью учитывают специфику циклических знакопеременных температурных воздействий на его микроструктуру. Доказано, что температурные циклы «замораживания–оттаивания» являются основным фактором, приводящим к разупрочнению микроструктуры и целостности цементного камня в интервалах залегания мерзлых толщ.

2. В результате проведения вычислительного эксперимента получены изотермы от тампонажного раствора в заколонном пространстве, позволяющие смоделировать циклические

знакопеременные температуры образцов цементного камня в условиях ММП в процессе ОЗЦ и промывки скважины.

3. В результате экспериментального исследования на разработанной лабораторной установке получены математические зависимости между физическими параметрами тампонажного раствора с различным содержанием компонентов, позволяющие качественно оценить структурно-прочностные характеристики цементного камня в условиях мерзлых пород.

Разработаны математические модели, позволяющие оценить изменение напряжений при формировании образцов цементного камня в зависимости от температуры и количества циклов в температурном диапазоне от -8 до 0 °С. Установлено, что добавление компонента на основе полимера в состав тампонажного раствора обеспечивает снижение напряжений в структуре цементного камня в зоне отрицательных температур, тем самым способствуя минимизации рисков развития деформаций и нарушению целостности образцов.

4. Разработан комплексный экспериментально-аналитический метод исследования свойств тампонажного раствора и цементного камня в условиях циклических знакопеременных температур, основанный на тензометрии и микротомографии. Предложенный метод позволяет установить корреляцию между количеством циклов знакопеременных температур и изменением скорости и периодичности гидратации тампонажного раствора-камня с различным содержанием компонентов в условиях мерзлых пород.

Важным прикладным значением предложенного комплексного метода исследований свойств цементного камня в условиях воздействия циклических знакопеременных температур является возможность увязки и калибровки результатов с данными ультразвуковых исследований. Подобная операция позволит расширить получаемую информацию при проведении

геофизических исследований скважин (акустическая цементометрия), судить о степени гидратации и определять прочностные характеристики сформированного цементного камня. В качестве перспективного направления дальнейших исследований по теме диссертации является необходимость изучения свойств тампонажного раствора и процесса гидратации с учетом термобарических условий скважины.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Сидоркин, Д.И. Анализ морских сооружений для реализации нефтегазовых проектов в условиях мелководного Арктического шельфа / Д.И. Сидоркин, **А.И. Коптева** // Бурение и нефть. – 2022. – № 6. – С. 24-29.

2. Сидоркин, Д. И. Определение времени переходного периода при цементировании газовых скважин в условиях аномально-высоких пластовых давлений / Д.И. Сидоркин, **А.И. Коптева**, А.В. Шанышев // Вестник Ассоциации буровых подрядчиков. – 2022. – № 4. – С. 8-12.

3. Двойников, М.В. Обоснование выбора методики расчета реологических параметров тампонажного раствора для крепления скважин / М.В. Двойников, В.И. Никитин, **А.И. Коптева** // Инженер-нефтяник. – 2024. – № S5. – С. 54-61.

4. Кучин, В.Н. Крепление скважин и разобщение пластов в интервалах залегания многолетнемерзлых пород: научно-методические основы / В.Н. Кучин, В.А. Сидоров, **А. И. Коптева** // Деловой журнал Neftegaz.RU. – 2025. – № 7(163). – С. 37-41.

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

5. Dvoynikov, M.V. Analysis of methodology for selecting rheological model of cement slurry for determining technological parameters of well casing / M.V. Dvoynikov, V.I. Nikitin,

A. I. Kopteva // International Journal of Engineering, Transactions A: Basics. – 2024. – Vol. 37, No. 10. – P. 2042-2050. – DOI 10.5829/ije.2024.37.10a.15.

6. Dvoynikov, M. Influence of thermal cycling on cement sheath integrity in permafrost conditions / M.V. Dvoynikov, **A. I. Kopteva**, N.A. Romanova, S.L. Yurtaev, D.A. Gromov, // International Journal of Engineering, Transactions A: Basics. – 2026. – Vol. 39, No. 1. – P. 148-158. – DOI 10.5829/ije.2026.39.01a.12.

Патенты:

7. Патент № 2828105 С1 Российская Федерация, МПК F25D 17/00 (2006.01), G01N 33/38 (2006.01); СПК F25D 17/00 (2024.08), G01N 33/383 (2024.08). Климатическая камера для исследования процесса термоотверждения образцов цементного раствора при отрицательных температурах. Заявка № 2024117228: заявл. 21.06.2024: опубл. 07.10.2024 / С.Л. Юртаев, Д.А. Громов, А.Ю. Ожигин, А.И. Коптева; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 12с.

8. Патент № 2838840 С1 Российская Федерация, МПК G01N 3/18 (2006.01), G01N 3/60 (2006.01), G01N 33/38 (2006.01); СПК G01N 3/18 (2025.01), G01N 3/60 (2025.01), G01N 33/383 (2025.01). Устройство для измерения собственных внутренних напряжений при формировании цементного камня в условиях изменения окружающей температуры. Заявка № 2024138416: заявл. 19.12.2024: опубл. 22.04.2025 / С.Л. Юртаев, Д.А. Громов, К.С. Купавых, А.И. Коптева; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 11с.

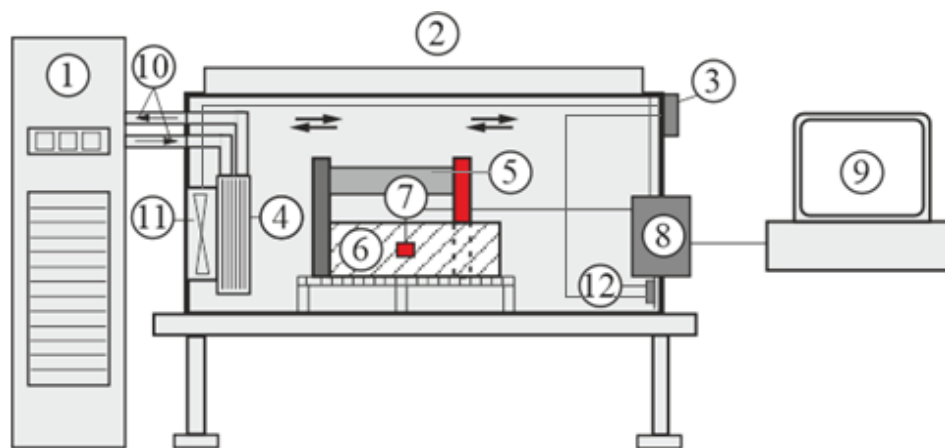


Рисунок 1 – Схема лабораторной установки по определению деформации образцов цементного камня: 1 – охлаждающая установка; 2 – климатическая камера; 3 – блок контроля и управления; 4 – теплообменник; 5 – устройство измерения внутренних напряжений; 6 – испытуемый образец (цемент); 7 – датчик температуры; 8 – блок регистрации данных; 9 – персональная электронно-вычислительная машина; 10 – трубная разводка с запорной арматурой; 11 – устройство циркуляции воздуха; 12 – датчик температуры в камере

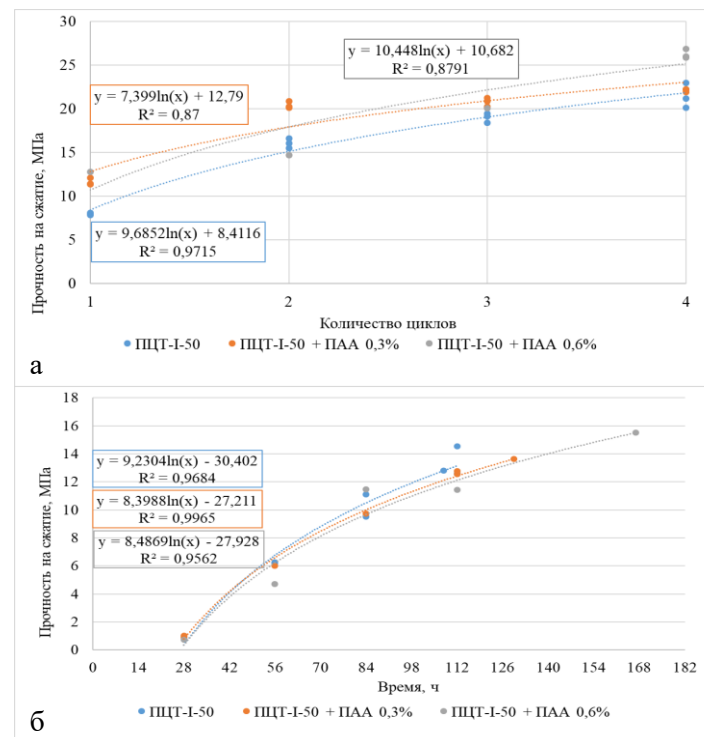
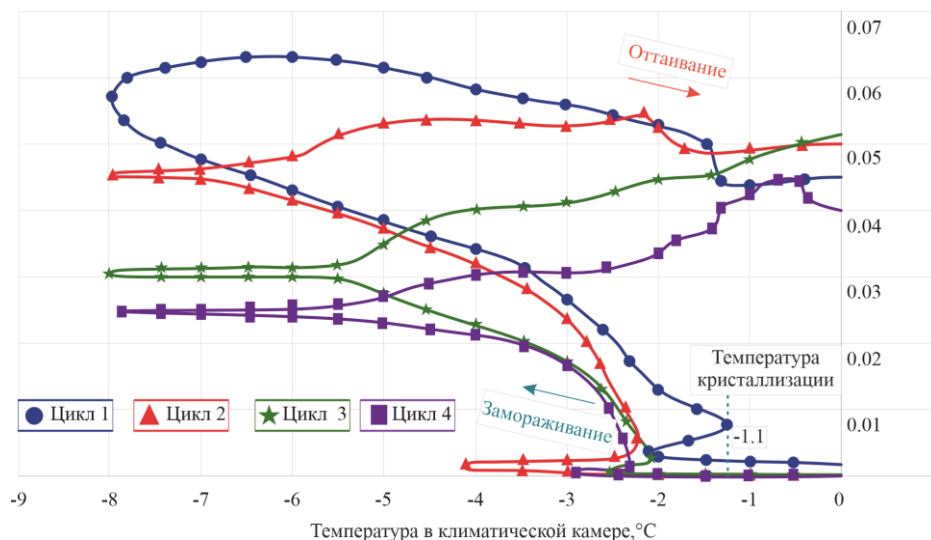
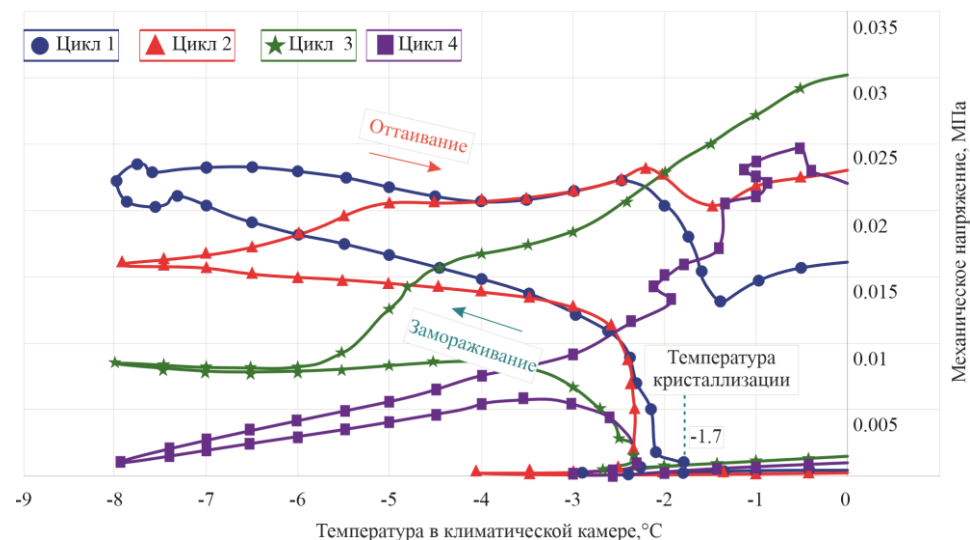


Рисунок 4 – График набора прочности цементного камня в нормальных условиях (а) и при знакопеременных температурных циклах (б)



а



б

Рисунок 2 – Изменение напряжений при формировании образцов цементного камня в зависимости от температуры и количества циклов: а – базовый состав; б – модифицированный

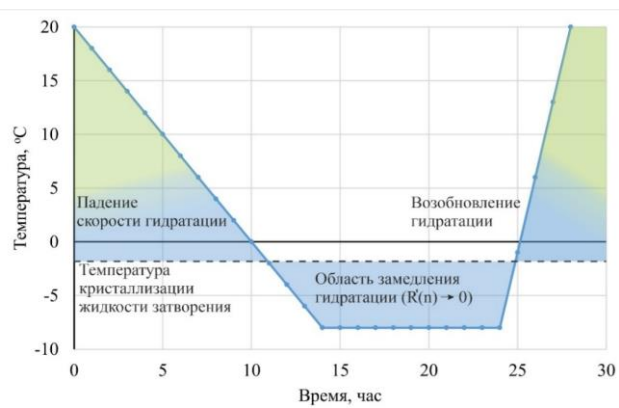


Рисунок 5 – Схема изменения температуры от времени в течение цикла «замораживания–оттаивания»

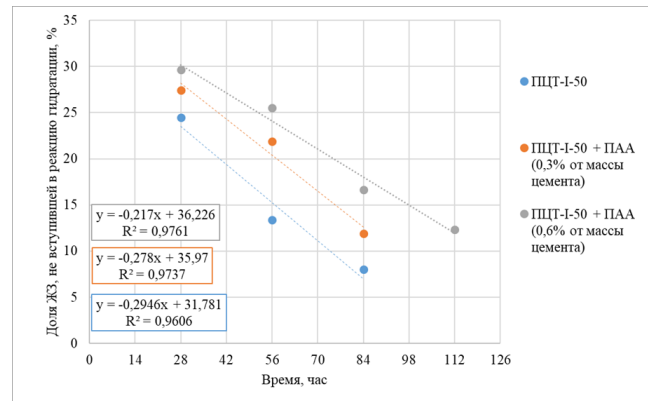


Рисунок 6 – График потери влаги образцами в течение циклов «замораживания–оттаивания»

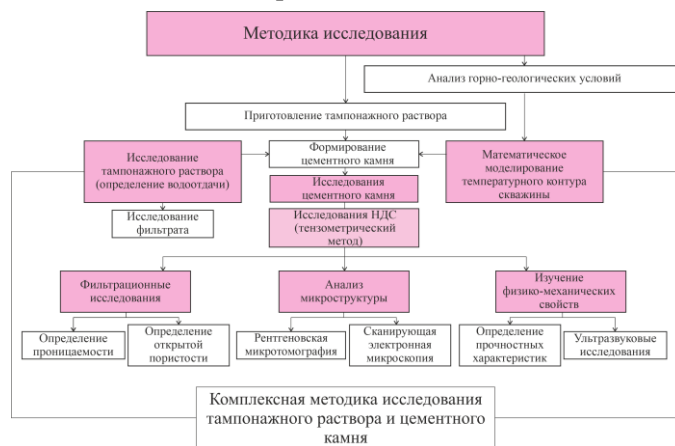
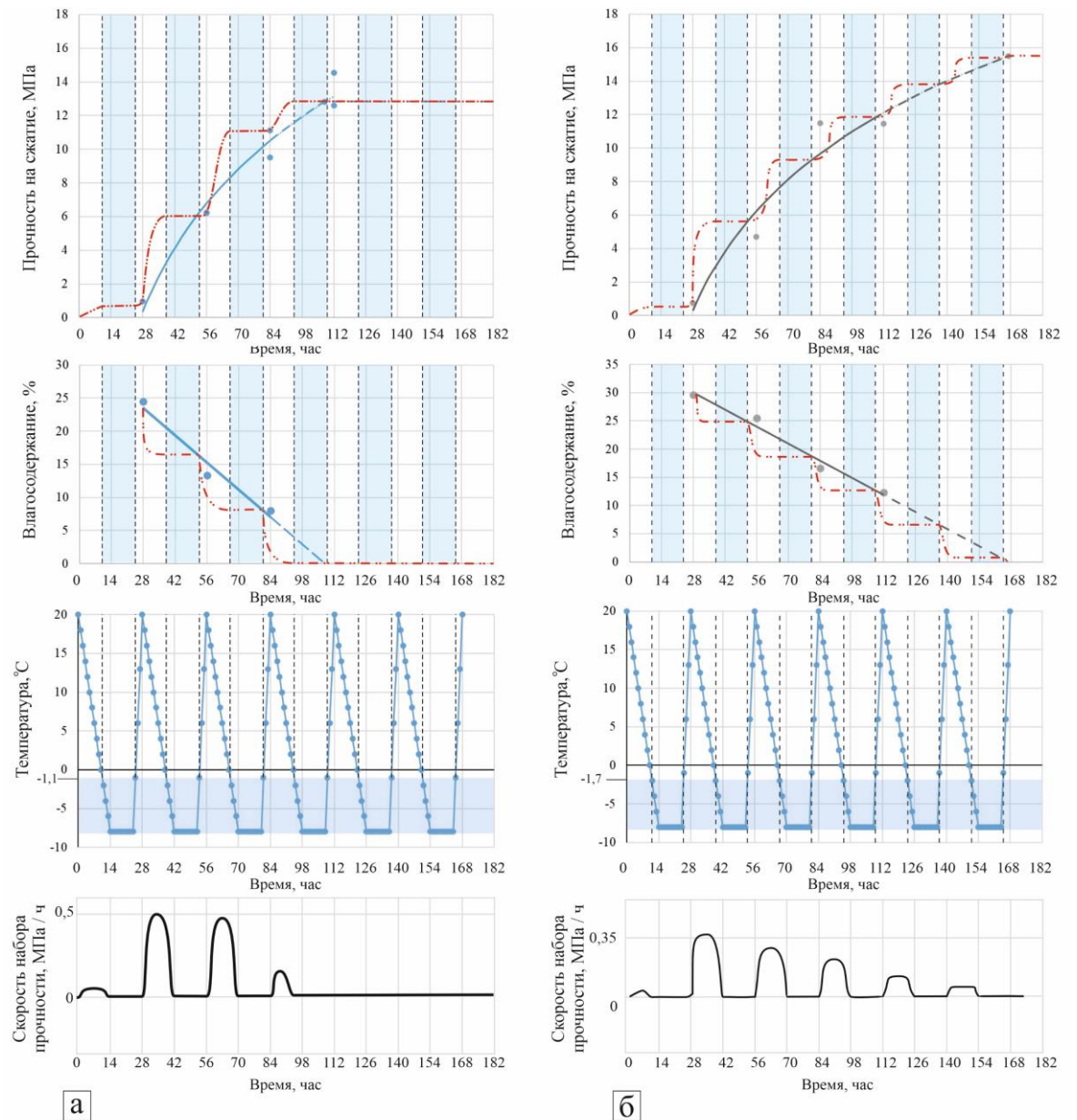


Рисунок 3 – Блок схема методики исследований



Условные обозначения:

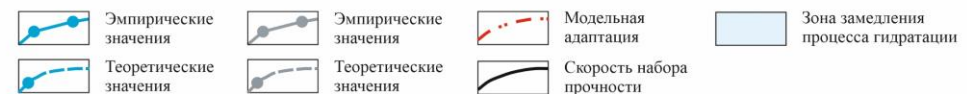


Рисунок 7 – Совмещенный график набора прочности цементного камня с учетом влагосодержания образцов и температурных циклов: а – базовый состав; б – модифицированный