

На правах рукописи

Шергин Денис Владимирович

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ
ПОДЗЕМНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ В МНОГОЛЕТНЕМЁРЗЛЫХ ПОРОДАХ**

Специальность 25.00.15 – «Технология бурения и освоения скважин»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2014

Работа выполнена в отделе технологических проблем подземного хранения в многолетнемёрзлых породах Общества с ограниченной ответственностью «Газпром геотехнологии».

Научный руководитель: **Казарян Вараздат Амаякович**

доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: – **Мнацаканов Вадим Александрович**

доктор технических наук, Общество с ограниченной ответственностью «Газпром бурение», главный инженер

– **Маслов Валентин Владимирович**

кандидат технических наук, генеральный директор ЗАО «Сервисный центр – Буровые технологии»

Ведущая организация:

Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственный центр Подземгидроминерал»

Защита состоится 16 июля 2014 года в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 002.059.04 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН) по адресу: г. Москва, 119334, ул. Бардина, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИМАШ РАН по адресу: 119334, г. Москва, ул. Бардина, д. 4, www.imash.ru

Автореферат разослан 16 июня 2014 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук



Г.Н. Гранова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Регионы распространения многолетнемерзлых пород (ММП) представляют большой интерес для нефтегазовой отрасли России. В настоящее время активно ведётся разведка и освоение горючих полезных ископаемых на территории Западной Сибири и Крайнего Севера. Полуостров Ямал по своим ресурсам является одной из основных сырьевых баз развития топливного комплекса России на долгосрочную перспективу. К настоящему времени здесь открыто более 25 нефтегазоконденсатных месторождений.

Общий объём отходов от бурения, запланированного на месторождениях полуострова Ямал на ближайшие 10 лет, составляет около 1,5 млн. м³. Утилизация и ликвидация таких объёмов является важной хозяйственной задачей. Существующие способы обращения с отходами: закачка и складирование отходов в поглощающих горизонтах и шламовых амбарах, химическая переработка и утилизация влекут за собой значительные финансовые затраты или не соответствуют установленным экологическим нормам.

Одним из перспективных способов обращения с отходами бурения является их размещение в подземных резервуарах (ПР), создаваемых в ММП методом скважинной гидродобычи (СГД). Практика показывает, что на сегодняшний день данный способ является наиболее эффективным и экономичным, а также наименее трудозатратным. Отходы бурения в ПР с течением времени переходят в твёрдомёрзлое состояние и не оказывают негативное влияние на окружающую среду. Наряду с закачкой отходов бурения в данных ПР, благодаря их герметичности, возможно хранение жидких углеводородов.

Сложные взаимосвязанные физико-химические процессы, протекающие в ПР при реализации указанной технологии, обуславливают необходимость постановки и решения задач прогнозирования и управления развитием формы ПР. Для эффективного управления процессом сооружения ПР в сложных геологических условиях необходимо учитывать влияние природных и

технологических факторов на оттаивание и разрушение ММП (под разрушением ММП понимается их оттаивание, размокание и вынос частиц и агрегатов под действием силы тяжести).

Недостаточная изученность процесса разрушения мёрзлых песчано-глинистых пород в заполненном водой ПР и отсутствие методики прогнозирования развития его формы, учитывающей влияние природных и технологических факторов, а также распределение температуры воды в нём, не позволяют создавать ПР для складирования отходов бурения с заданной формой и объёмом в конкретных геологических условиях.

Таким образом, можно констатировать, что исследование и разработка технологии создания ПР в ММП, обеспечивающей необходимую геометрию резервуаров, являются актуальными.

Цель диссертационной работы. Обеспечение устойчивости подземных резервуаров, сооружаемых в многолетнемёрзлых породах путём совершенствования технологии с учётом режимно-технологических параметров (температура и производительность подачи воды, её уровень в подземном резервуаре), обеспечивающих заданную форму и объём резервуаров в конкретных геолого-криологических условиях.

Методы исследований включают обобщение производственного опыта создания ПР в ММП, методы физического моделирования, математической статистики, корреляционного анализа, лабораторные и натурные эксперименты в производственных условиях, выполненные по апробированным и разработанным автором методикам.

Основные задачи работы

1. Исследовать механизм разрушения ММП в воде и определить зависимость скорости их разрушения от температуры воды.
2. Изучить влияние наклона оттаиваемой поверхности ММП на скорость её разрушения.
3. Определить влияние геологического строения мёрзлого массива на развитие формы ПР.
4. Исследовать влияние распределения температуры воды в ПР на

развитие его формы.

5. Разработать методику определения параметров создания ПР в ММП.

Научная новизна

1. Теоретически обоснован способ расчёта скорости разрушения поверхности мёрзлых песчаных, суглинистых пород и природного льда при тепловом воздействии воды, заполняющей подземный резервуар, основанный на установлении следующих зависимостей: скорость разрушения поверхности мёрзлых песчаных, суглинистых пород и природного льда при тепловом воздействии воды, заполняющей подземный резервуар, прямо пропорциональна температуре этой воды в интервале 0-10°C; скорость разрушения поверхности мёрзлых песчано-глинистых пород при тепловом воздействии воды, заполняющей подземный резервуар, линейно снижается с увеличением содержания глинистых частиц, а при переслаивании песчаных и глинистых пород определяется скоростью разрушения поверхности глинистых пород. Эти зависимости позволяют рассчитывать скорость разрушения многолетнемёрзлых пород при любой температуре воды в интервале 0-10°C.

2. Установлено, что в однотипных многолетнемёрзлых породах, находящихся в одинаковых условиях, при средней температуре воды в подземном резервуаре 4-10°C, поверхность подземного резервуара оттаивает и разрушается равномерно по всей высоте, а при средней температуре воды в интервале 0-4°C интенсивнее оттаивает нижняя часть подземного резервуара; при этом, с увеличением отклонения от вертикального положения оттаиваемой поверхности, скорость её разрушения уменьшается. Результаты исследований позволяют прогнозировать развитие формы подземного резервуара.

3. Создана методика определения параметров создания подземных резервуаров в многолетнемёрзлых песчано-глинистых породах, учитывающая геологическое строение массива мёрзлых пород и распределение температуры воды в резервуаре, позволяющая формировать резервуары с заданной формой и объёмом, что обеспечивает их устойчивость.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается:

- необходимым и достаточным количеством проведённых исследований;
- использованием при проведении экспериментов современных технических средств измерений с высокими метрологическими характеристиками;
- сходимостью результатов аналитического расчёта с результатами лабораторных и промышленных исследований;
- хорошей воспроизводимостью закономерностей скорости разрушения мёрзлых пород в воде от её температуры и от содержания глинистых частиц, установленных на представительном объёме экспериментальных данных, полученных при исследовании более 50 образцов горных пород;
- положительными результатами внедрения методики определения параметров создания ПР в ММП в натуральных условиях, на кустовых площадках Бованенковского месторождения.

Научное значение диссертации состоит в дальнейшем развитии существующих представлений о закономерностях влияния природных факторов и технологических параметров создания скважинных ПР в ММП на развитие их формы.

Практическая значимость работы

Разработана «Методика определения параметров создания подземных резервуаров», позволяющая прогнозировать развитие формы скважинных ПР в ММП и определять параметры их создания, что позволит сооружать ПР с необходимым объёмом и заданной формой в конкретных геологических условиях.

Разработана «Методика определения приведённой скорости и удельной теплоты разрушения мёрзлого грунта при тепловом воздействии воды, заполняющей подземный резервуар».

Реализация выводов и рекомендаций работы

Полученные результаты диссертационной работы применялись в ООО «Газпром геотехнологии» при корректировке проекта создания ПР на Бованенковском месторождении полуострова Ямал.

Апробация работы

Основные положения и научные выводы диссертационной работы были изложены на симпозиуме «Неделя горняка 2011» и «Неделя горняка 2013» в МГГУ, на научной конференции ООО «Газпром геотехнологии» в 2012 году, на научной конференции «Физико-техническая геотехнология» в МГГУ в 2013 году.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 6 печатных работ, в том числе 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объём работы.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, содержит 167 страниц машинописного текста, 62 рисунка, 12 таблиц, список литературы, состоящий из 73 наименований, 2 приложения.

Автор выражает глубокую признательность Хрулёву А.С., Гридину О.М., Сурину С.Д., Савичу О.И., Теплому М.К. за ценные замечания и помощь при подготовке работы.

Содержание работы

В первой главе проведён анализ современного состояния и проблем создания ПР в ММП. Определены основные направления совершенствования технологии их строительства, сформулированы цель и задачи исследования.

В решении данных вопросов существенное значение имеют работы Смирнова В.И., Хрулёва А.С., Казаряна В.А., Скосаревой Т.В., Сильвестрова Л.В., Пястолова А.Д., Бобкова Ю.П., Аренса В.Ж., Лобанова Д.П., Бабичева Н.И., Неберы В.П., Кузьмина Г.П., Яковлева А.В., Сурина С.Д., Чернея Э.И., Исмагилова Б.В., Шпака Д.Н., Хрулёва А.С., Фридмана Б.Э., Хныкина В.Ф., Кроника Я.А., Цытовича Н.А., Вялова С.С., Шафаренко Е.М.

Метод СГД позволяет выполнять практически все технологические

операции с помощью воды и избежать работ человека под землёй. Суть СГД заключается в бурении скважины, монтаже скважинного снаряда, разрушении грунта с использованием энергии воды и подъёме образующейся гидросмеси на поверхность. Этот метод обеспечивает высокие технико-экономические показатели производства и безопасность условий труда. Применение данного метода для создания в криолитозоне ПР для складирования отходов бурения и хранения жидких углеводородов обусловлено активным разрушением многолетнемёрзлых дисперсных отложений под воздействием тепловой и механической энергии воды. Присущая породам полуострова Ямал льдистость обеспечивает защиту от фильтрации захораниваемого (хранимого) продукта в массив, а низкая температура пород обеспечивает перевод захораниваемых отходов бурения в твёрдомёрзлое состояние. Мощность и физико-механические свойства мёрзлых песчано-глинистых отложений позволяют создавать в них устойчивые ПР с объемом до 5000 м³.

В настоящий момент работы по совершенствованию технологии создания ПР в ММП методом СГД проводятся в ООО «Газпром геотехнологии». Технология создания ПР предусматривает оттаивание и разрушение ММП за счёт подачи теплоносителя (воды) в подземную выработку (скважину) с подъёмом оттаявшего грунта на поверхность по эрлифтному снаряду (рисунок 1). В процессе создания ПР для достижения необходимых формы и объёма управляют следующими параметрами: производительностью подачи и температурой теплоносителя (воды) и уровнем воды. При определении параметров создания ПР необходимо учитывать отличие свойств ММП по высоте и температурную стратификацию воды в резервуаре.

В результате анализа опубликованных работ в области сооружения ПР в ММП способом СГД можно сделать вывод, что до сих пор не исследованными остаются вопросы, связанные с механизмом создания ПР при оттаивании мёрзлых пород в затопленной камере. Разработкой методик определения параметров создания ПР и прогнозирования развития их формы занимались Смирнов В.И, Хрулёв А.С., Сильвестров Л.К., Теплов М.К., Штилькин С.Т. и другие.

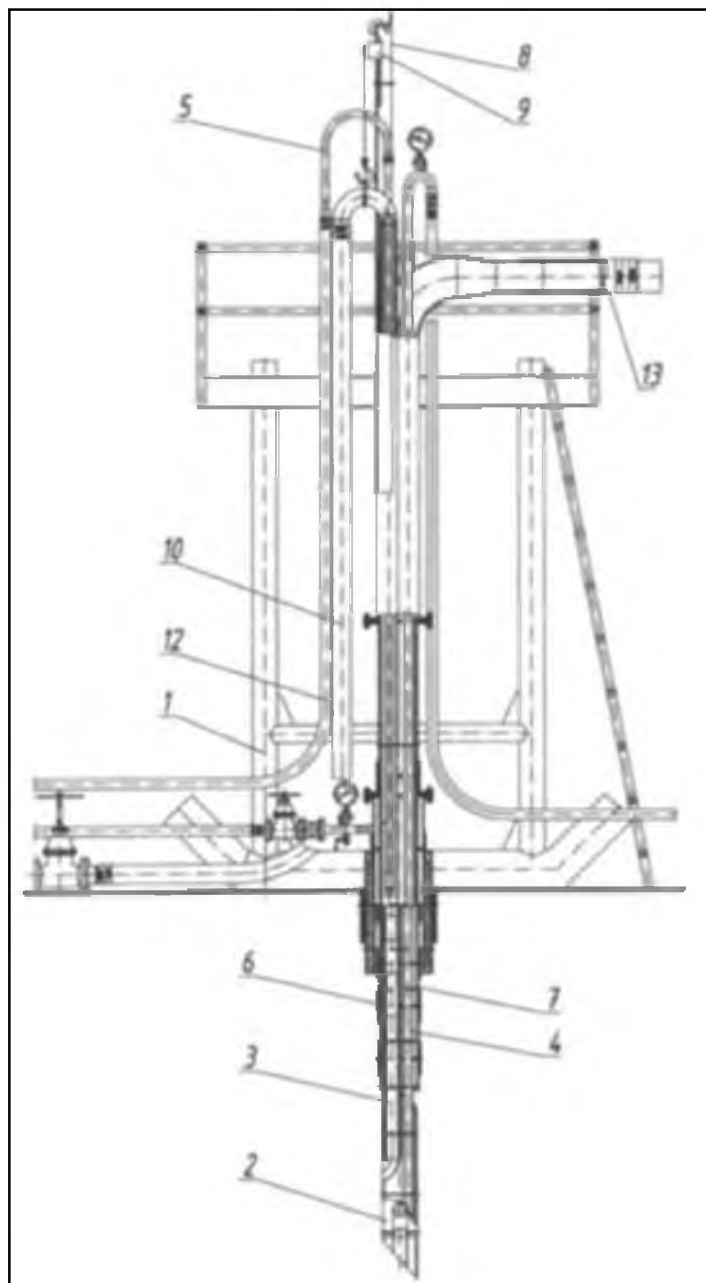


Рисунок 1 – Эрлифтный снаряд: 1 – монтажная платформа; 2 – хвостовик;
 3 – колонна водоподающая; 4 – колонна воздухоподающая; 5 – колонна
 пароподающая; 6 – трубы полиэтиленовые; 7 – колонна пульпоподъемная;
 8 –рама монтажная; 9 – цепной подъемник; 10 – водоподающий рукав;
 11 – воздухоподающий рукав; 12 – пароподающий рукав

Создание первых ПР производилось с постоянным контролем их радиуса. Данный способ сооружения резервуаров не позволял с достаточной степенью точности прогнозировать развитие его формы со временем. Разработанные к настоящему моменту методики определения параметров создания скважинных ПР в ММП учитывают лишь усреднённые значения льдистости, гранулометрического состава и тепловых характеристик массива, в

котором производится строительство. Как показала практика, для точного прогноза развития формы ПР, необходимо учитывать изменчивость свойств массива мёрзлых пород по высоте, влияющих на скорость их оттаивания и разрушения, а также влияние распределения по высоте резервуара значений температуры воды.

Вышеперечисленное свидетельствует о необходимости разработки новой методики определения параметров создания скважинных ПР в песчано-глинистых ММП.

Вторая глава посвящена исследованию влияния природных факторов на скорость оттаивания и разрушения многолетнемёрзлых пород.

Создание более 30 ПР общим объёмом около 60 тыс. м³ на полуострове Ямал позволило накопить достаточный статистический материал. При расчёте параметров создания этих ПР использовалась существующая методика, оперирующая усреднёнными значениями свойств мёрзлых дисперсных грунтов. Прогноз развития формы ПР с использованием данной методики в большинстве случаев показал плохую сходимость с формой построенных по этим регламентам резервуаров (рисунок 2). Вследствие этого, большинство резервуаров не достигло проектного объёма. Это связано с плохой проработкой верхней части резервуаров и образованием запредельных радиусов в их нижней части, не позволяющих продолжать строительство. Некорректный расчёт развития формы ПР может привести к просадкам земной поверхности, а также большой конвергенции выработанного пространства в процессе его эксплуатации, результатом чего может стать выход жидкой фазы буровых отходов на земную поверхность.

Данная технология предусматривает создание ПР в многолетнемёрзлых песчаных отложениях, однако мест с необходимой мощностью чистого песка на полуострове Ямал не так много. Геологический разрез в интервале сооружения ПР может быть представлен переслаиванием песка и суглинка. Чтобы спрогнозировать развитие формы ПР в таких сложных геологических условиях, необходимо определить особенности процесса оттаивания и разрушения этих грунтов в воде.

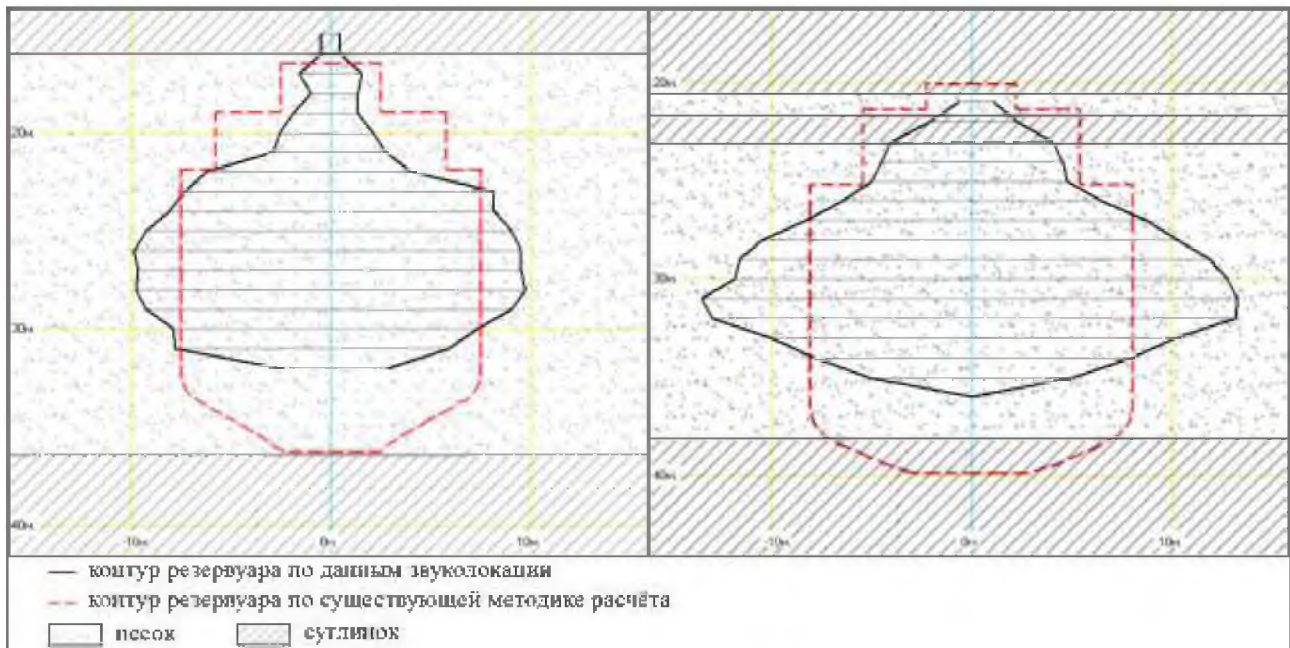


Рисунок 2 – Расчётные проектные контуры ПР и контуры построенных ПР

С целью изучения механизма разрушения мёрзлых пород в воде был проведен ряд лабораторных и натурных экспериментов. Исследование проводили с помощью физического моделирования на специально изготовленных в лабораторных условиях цилиндрических образцах мёрзлого песка, суглинка и льда. Образцы диаметром и высотой 100 мм изготавливали из грунтов, отобранных на Бованенковском месторождении полуострова Ямал. Образцы мёрзлого грунта и льда помещали в теплоизолированный стеклянный сосуд с водой при температуре от плюс 2 до плюс 18°C объёмом 10 л (рис. 3). Во время эксперимента фиксировали изменение температуры воды в ёмкости и радиуса образцов.

Данный эксперимент позволил определить различия в механизме и скорости оттаивания и разрушения образцов из мёрзлого песка, суглинка и льда (рисунок 3). Разрушение образцов мёрзлого песка происходило значительно быстрее. Это объясняется различием в льдистости, а также интенсивным движением оттаявших твёрдых частиц песчаного образца в пограничном слое, активизирующим теплообмен воды с мёрзлой поверхностью. Скорость разрушения мёрзлой поверхности образца в воде определяли как частное от деления радиуса образца на время его разрушения. Гидравлическая крупность частиц песка составила 0,08 м/с, а суглинка – 0,05 м/с. Наименьшая скорость

движения воды в пограничном слое образец-вода отмечена при таянии льда.

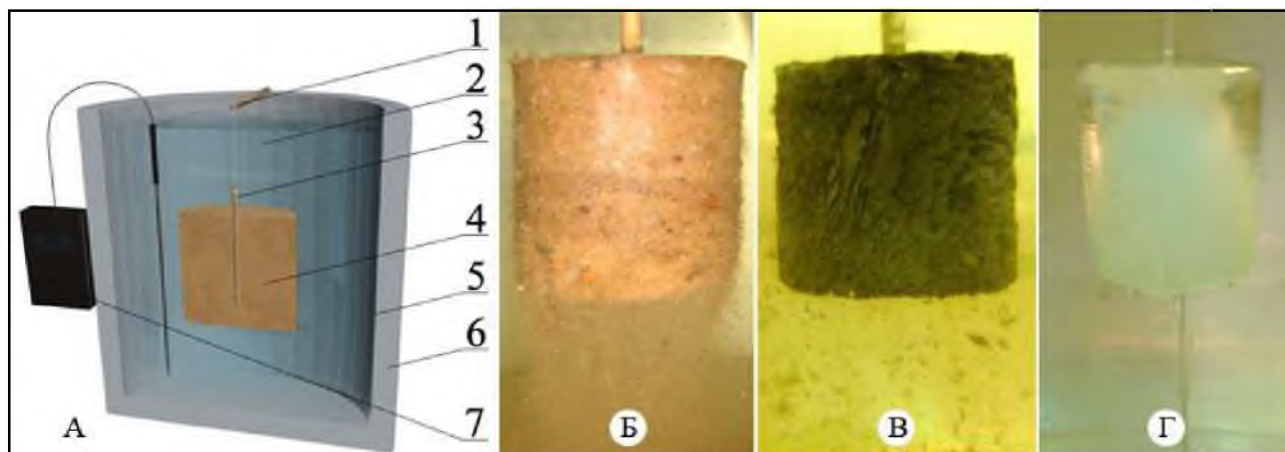


Рисунок 3 – Общий вид установки по разрушению образца мёрзлого грунта в воде в разрезе (А) и изображение момента оттаивания образцов песка (Б), суглинка (В) и льда (Г): 1 – перекладина и удерживающая нить; 2 – вода; 3 – деревянная рейка; 4 – образец мёрзлого грунта; 5 – стеклянный аквариум; 6 – теплоизоляция из пенопласта; 7 – электронный термометр

Скорости разрушения данных образцов мёрзлого песка, суглинка и льда при одинаковой температуре воды соотносятся как 6,5 : 2,5 : 1. При температуре воды от 0 до 10°C зависимость скорости разрушения стенки мёрзлого грунта в воде от её температуры можно принять за линейную с необходимой для инженерных расчётов точностью (рисунок 4).

Как видно из графиков, полученные формулы аппроксимируют исходные зависимости (на отрезке от 0 до 10°C) с большей степенью близости, так как коэффициент детерминации (R^2) принимает значения больше 0,9.

Значение тангенса угла наклона прямой, проходящей через начало координат и точку значения скорости разрушения многолетнемёрзлого грунта при конкретной температуре воды к оси абсцисс, названо в работе приведённой скоростью разрушения многолетнемёрзлого грунта в воде.

Температура воды в ПР при его создании не поднимается выше 10°C. Это позволяет, определив приведённую скорость разрушения мёрзлого грунта при одном значении температуры воды, рассчитать скорость разрушения стенки многолетнемёрзлого грунта при любом другом значении температуры воды в ПР на интервале 0-10°C. Исследования показали, что зависимость скорости разрушения многолетнемёрзлой песчано-глинистой породы в воде

заполняющей ПР от содержания глинистых частиц также может быть описана линейным уравнением (рисунок 5). Высокий коэффициент детерминации ($R^2=0,98$) показывает, что полученное линейное уравнение с большой степенью близости аппроксимирует экспериментальные данные.

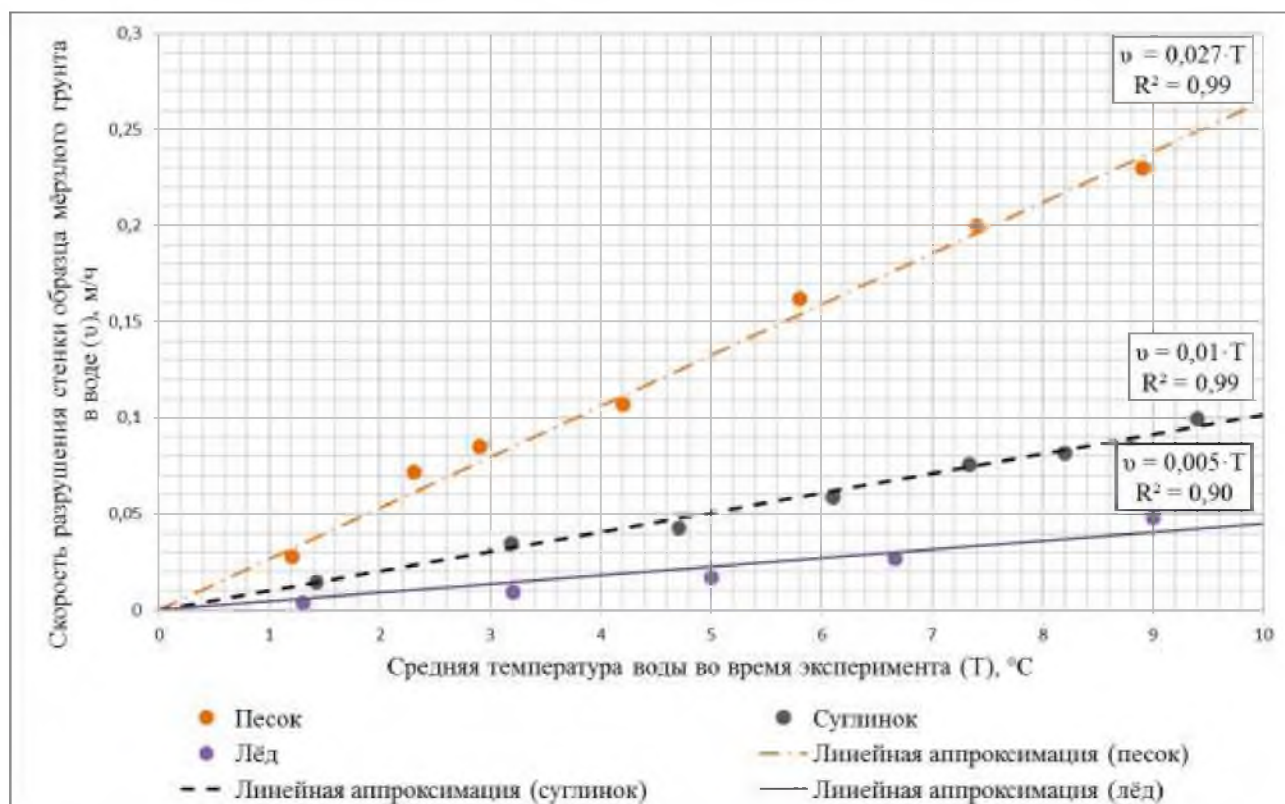


Рисунок 4 – Графики зависимости скорости разрушения стенки образца мерзлого грунта с температурой минус 7°C в воде от средней температуры воды в ёмкости

Лабораторные исследования и натурные наблюдения также показали, что с увеличением отклонения оттаиваемой поверхности стенки ПР от вертикального положения, скорость её разрушения уменьшается. Данная зависимость может быть выражена следующим уравнением:

$$v_{T_{\angle}} = v_{T_{\perp}} \cdot \cos \beta, \quad (1)$$

где $v_{T_{\perp}}$ и $v_{T_{\angle}}$ – приведённые скорости разрушения поверхности мерзлого грунта в воде при её вертикальном положении и при отклонении на угол β от вертикали соответственно.

Третья глава посвящена исследованию влияния технологических параметров на развитие ПР. Для определения основных особенностей развития формы ПР в песчано-глинистом массиве были созданы объёмные модели

(рисунок 6), в которых соблюдалось геометрическое и физическое подобие процессу сооружения ПР в натуральных условиях. Известным формальным ограничением возможности моделирования процессов при преобладании естественной конвекции является невозможность соблюдения критерия естественной конвекции Грасгофа. Однако многолетний опыт моделирования процессов подземного растворения солей и теплоотдачи зданий при масштабе моделирования 1/200-1/500 показал, что несоблюдение критерия Грасгофа незначительно влияет на коэффициенты массоотдачи и теплоотдачи.

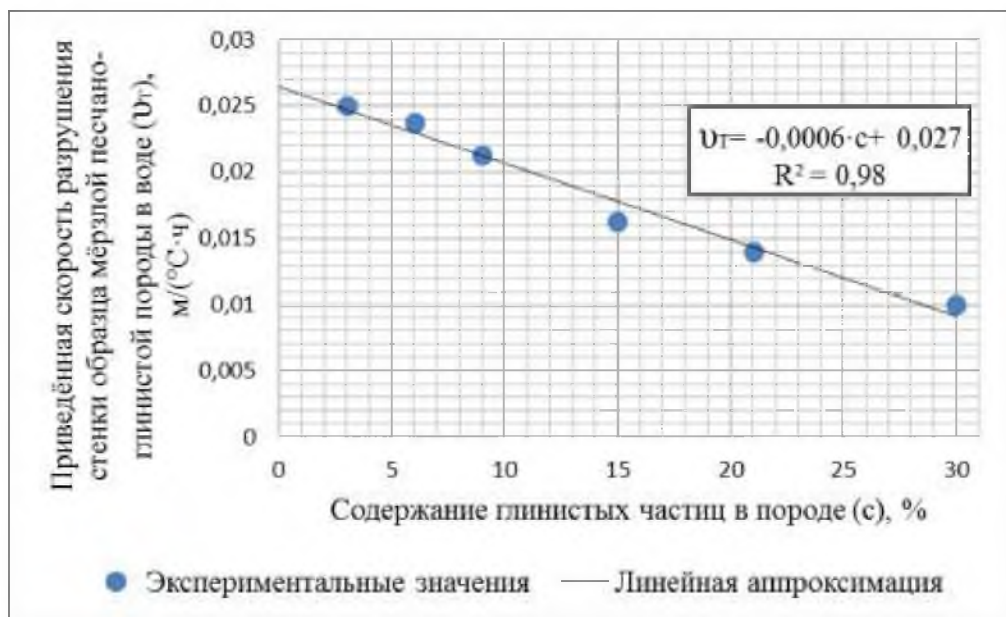


Рисунок 5 – Зависимость приведённой скорости разрушения стенки образца мерзлой песчано-глинистой породы в воде от содержания глинистых частиц

По результатам моделирования процесса создания резервуара на физических объёмных моделях были сделаны следующие выводы:

первая модель

– придонная часть резервуара представляет собой перевернутый конус с вершиной в точке отбора оттаявшего грунта; угол наклона образующей конуса равен 30-35°; её дальнейшее разрушение не происходит вследствие накопления оттаявшего песка и коллоидных частиц;

– количество вносимого в резервуар тепла оказывает влияние не только на скорость оттаивания и разрушения, а также на распределение температуры воды по высоте резервуара и на его форму; если подаётся избыточное количество тепла, и средняя температура воды в камере 4-10°С, то

поверхность камеры оттаивает и разрушается равномерно по всей высоте; если средняя температура воды 0-4°C, то интенсивнее разрушается нижняя часть;

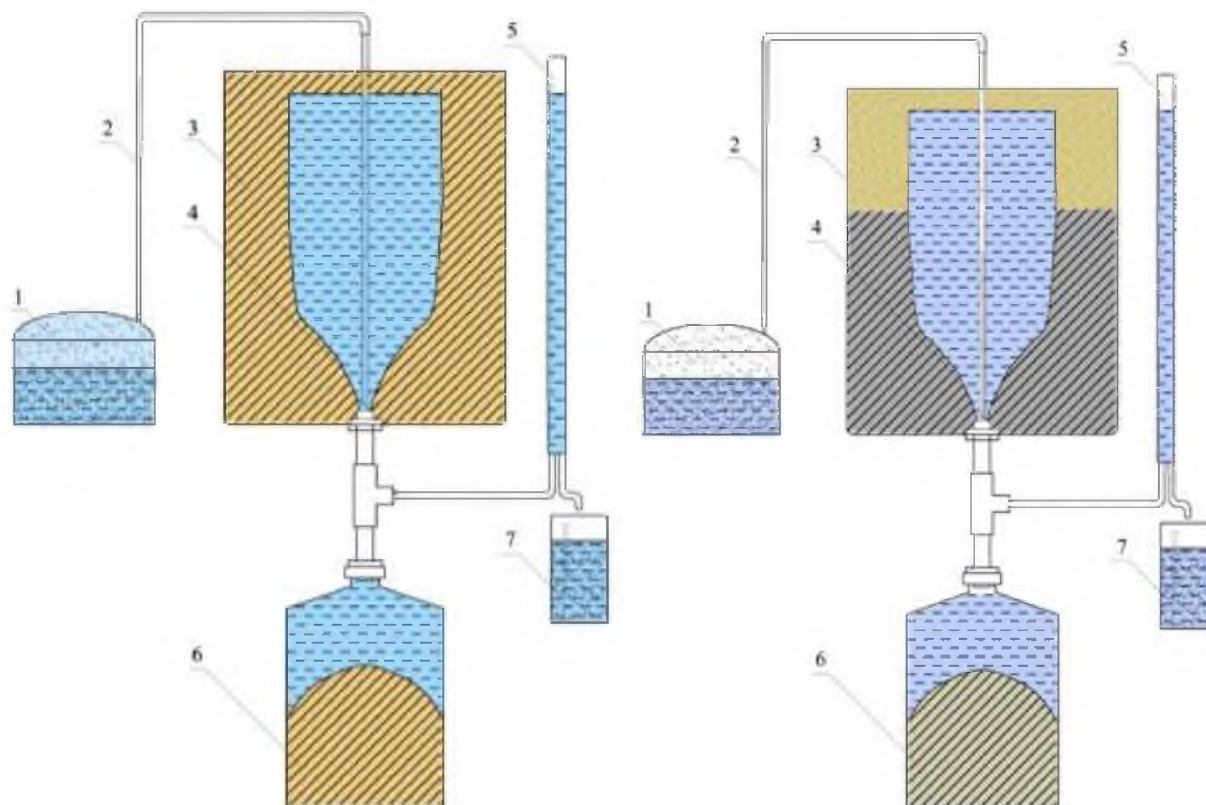


Рисунок 6 – Схематическое изображение двух объёмных моделей создания ПР в мёрзлом песчаном массиве (слева) и мёрзлом массиве, где в верхней части находится песок, а в нижней – суглинок (справа): 1 – парогенератор; 2 – пароподающая трубка; 3 – мёрзлый грунт; 4 – резервуар; 5 – стеклянная проградуированная трубка; 6 – ёмкость для оттаявшего грунта; 7 – мерный стакан

– средняя приведённая скорость разрушения поверхности мёрзлого песчаного грунта – 0,026 м/(ч·°С);

вторая модель

– нижняя часть резервуара, находящаяся в суглинке, представляет собой перевернутый конус с вершиной в точке отбора оттаявшего грунта; угол наклона образующей конуса равен 50-60°;

– под воздействием потока оттаявших частиц песка нижележащий пласт мёрзлого суглинка разрушается интенсивнее, чем без этого потока (средняя приведённая скорость разрушения поверхности мёрзлого песчаного грунта – 0,028 м/(ч·°С), суглинка – 0,018 м/(ч·°С));

– угол откоса в песчаной части модели, находящийся выше пласта суглинка, равен 30-35°.

Наблюдения, сделанные в ходе экспериментов на моделях, соответствуют наблюдениям за развитием формы ПР при натурном строительстве. Соответствие скоростей разрушения поверхности ММП в воде при создании резервуаров и скоростей разрушения стенки образца и модели камеры из той же мёрзлой породы в лабораторных условиях позволяет применять цилиндрические образцы мёрзлых пород диаметром и высотой 100 мм (керновый материал) для определения скорости разрушения мёрзлых пород в воде.

При натурном строительстве ПР имеющиеся маломощные единичные прослой суглинка, оттаивая медленнее, образуют «kozyрьки», которые разрушаются под собственным весом и под механическим воздействием потока оттаивших частиц. Однако если их количество и мощность больше, то скорость разрушения стенки ПР в воде приближается к скорости разрушения суглинка (глины). Это подтверждают данные натуральных и лабораторных исследований.

Сроки создания ПР и развитие их формы зависят от скорости оттаивания и разрушения тех пород, в которых производится строительство.

К основным природным факторам, которые оказывают влияние на скорость оттаивания и разрушения мёрзлых пород, относятся: тип грунта, льдистость, гранулометрический состав, температура, криотекстура, засоленность, наличие органических включений. Спрогнозировать и рассчитать влияние каждого из этих факторов на процесс развития формы ПР достаточно сложно. Поэтому для расчёта параметров создания резервуаров предлагается определять два эмпирических параметра: приведённую скорость и удельную теплоту разрушения мёрзлого грунта в воде. Эти параметры предлагается определять в полевых условиях при исследовании керна (рисунок 7 В) в интервале строительства ПР.

Приведённая скорость разрушения многолетнемёрзлого грунта в воде – коэффициент пропорциональности между скоростью разрушения вертикальной поверхности мёрзлых грунтов в воде и её температурой. Данный параметр

позволяет определять скорость разрушения мёрзлой стенки ПР, заполненного водой, при различных температурах.

Удельная теплота разрушения многолетнемёрзлого грунта в воде – затраты тепла на оттаивание льда в мёрзлом грунте и дезинтеграцию грунта (разрушение механических связей), отнесённые к единице его массы.

Для определения приведённой скорости и удельной теплоты разрушения мёрзлого грунта в воде предлагается использовать разработанную установку, включающую теплоизолированный сосуд с помещенной в него термопарой, и весы, к которым подвешивается погруженный в воду образец мёрзлого грунта (рисунок 7 А, Б).

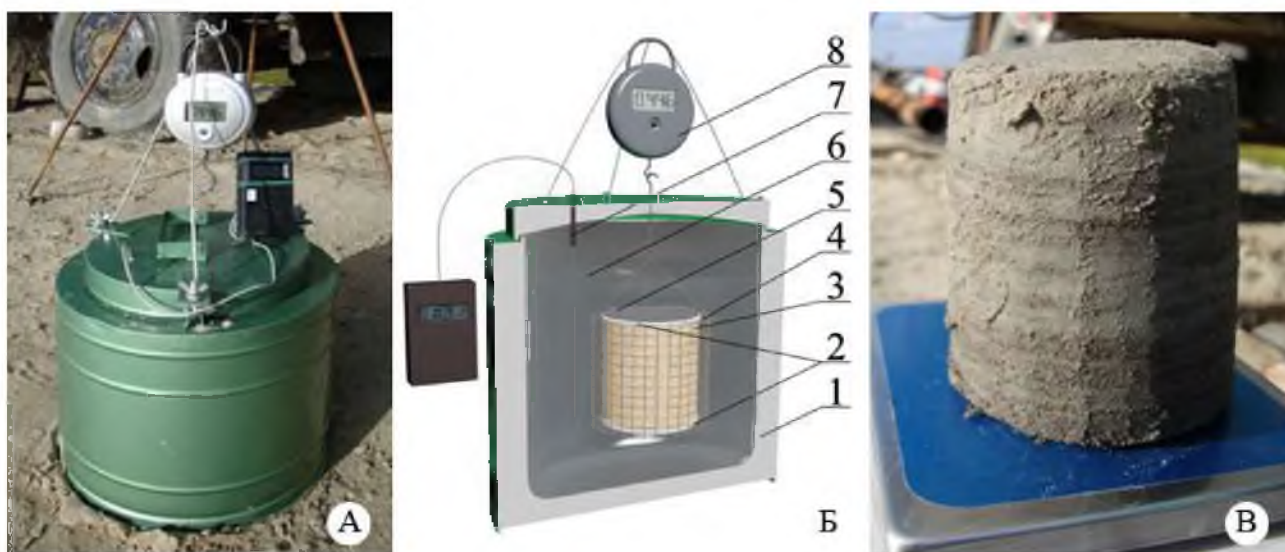


Рисунок 7 – Установка по определению приведённой скорости и удельной теплоты разрушения мёрзлого грунта в воде (А, Б) и испытываемый образец керна (В): 1 – сосуд Дьюара; 2 – теплоизолирующие прокладки; 3 – образец мёрзлого грунта; 4 – сетчатый стакан; 5 – прижимная пластина; 6 – вода; 7 – электронный термометр; 8 – весы

На торцы ненарушенного образца накладывают теплоизолирующие прижимные прокладки. Образец устанавливают в сетчатый стакан, подвешенный на весах, и погружают в теплоизолированную ёмкость, заполненную водой. В процессе оттаивания и разрушения образца частицы грунта проходят сквозь ячейки сетчатого стакана и оседают на дно. С помощью термопары фиксируют изменение температуры воды в ёмкости через определённые временные интервалы.

По данным изменения веса образца со временем вычисляют приведённую скорость разрушения многолетнемёрзлого грунта для каждого временного интервала по формуле 2.

$$v_{T_i} = \frac{\sqrt{\frac{m_i}{(\rho_{обр} - \rho_в) \cdot \pi \cdot H_{обр}}} - \sqrt{\frac{m_{i+1}}{(\rho_{обр} - \rho_в) \cdot \pi \cdot H_{обр}}}}{T_{ср.в.и} \cdot \tau_i}, \quad (2)$$

где: v_{T_i} – приведённая скорость разрушения вертикальной поверхности многолетнемёрзлого грунта для интервала между ближайшими замерами ($\text{м}/(^\circ\text{С} \cdot \text{м})$); m_i и m_{i+1} – вес образца в i -ый и следующий за ним замеры (кг); $\rho_{обр}$ и $\rho_в$ – плотность образца и воды ($\text{кг}/\text{м}^3$); $H_{обр}$ – высота образца (м); $T_{ср.в.и}$ – средняя температура воды в емкости за единичный интервал между замерами ($^\circ\text{С}$); τ_i – единичный интервал между замерами (ч).

Приведённую скорость разрушения вертикальной поверхности многолетнемёрзлого грунта в воде (v_T) рассчитывают по формуле 3.

$$v_T = \frac{v_{T_i} + v_{T_{i+1}} + \dots + v_{T_n}}{n - 2}, \quad (3)$$

где: i – номер замера, начиная с 3-го и заканчивая замером, соответствующим разрушению половины образца (n) (момент, когда вес образца в воде становится равным половине веса образца в воде в начале эксперимента). Скорость разрушения образца после прохождения половины его массы через сетчатый стакан не учитывается в расчётах, так как на её значение начинает оказывать существенное влияние радиус кривизны боковой поверхности образца.

Удельную теплоту разрушения многолетнемёрзлого грунта (q_{np}) определяют по формуле 4, полученной из уравнения теплового баланса.

$$q_{np} = \frac{c_в \cdot m_в \cdot (T_{в.н.} - T_{в.к.})}{m_{разр}} - T_{в.к.} \cdot (c_{ск.з} \cdot (1 - W) + c_в \cdot W) + c_з \cdot T_{обр.}, \quad (4)$$

где: q_{np} – удельная теплота разрушения многолетнемёрзлого грунта ($\text{Дж}/\text{кг}$); $c_в$ – удельная теплоёмкость воды ($\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{С})$); $m_в$ – масса воды

в ёмкости (кг); $T_{в.н.}$ и $T_{в.к.}$ – температура воды в ёмкости в начале и в конце испытания ($^{\circ}\text{C}$); $m_{разр}$ – масса прошедшего сквозь сетчатый стакан грунта (кг); $T_{обр.}$ – температура образца в начале испытания ($^{\circ}\text{C}$); $c_{ск.г}$ – удельная теплоёмкость минерального скелета грунта; $c_г$ – удельная теплоёмкость грунта (Дж/(кг· $^{\circ}\text{C}$)); $c_л$ – удельная теплоёмкость льда (Дж/(кг· $^{\circ}\text{C}$)); W – общая влажность грунта.

Данные параметры определяют для каждого инженерно-геологического элемента (ИГЭ) массива, а затем используют для определения параметров создания и прогнозирования развития формы ПР.

Особенностью пресной воды является тот факт, что при температуре 4°C её плотность максимальна. Когда средняя температура воды в резервуаре становится меньше 4°C , наблюдается обратная температурная стратификация: в нижней части концентрируется самая плотная и тёплая вода. Данные лабораторных и натурных исследований показывают, что температурная стратификация воды устанавливается в соответствии с распределением плотностей по вертикали и зависит от средней температуры воды в резервуаре (рисунок 8). Высокий коэффициент детерминации ($R^2 > 0,89$) показывает, что степенное уравнение 5 с большой степенью близости аппроксимирует экспериментальные данные. Исследования показали, что в радиальном направлении температура практически не меняется.

$$T_{hi} = k_1 \cdot \sqrt[3]{h_i - k_2} + k_3, \quad (5)$$

где: T_{hi} – температура воды в резервуаре на высоте h от дна; k_1 , k_2 и k_3 – коэффициенты.

На основании анализа экспериментальных и натурных данных для инженерного расчёта параметров создания ПР были выделены 3 расчётные зоны, каждую из которых можно описать своим эмпирическим уравнением распределения температур по высоте ПР (рисунок 9).

В первой области средняя температура воды в резервуаре (T_p) изменяется в пределах от 4°C до $T_в$ (температуры подаваемой воды). В данной

области температура воды с высотой резервуара ($T_{h,i}$) практически не изменяется ввиду её активного перемешивания по всему объёму. При существующей технологии создания ПР на данную область приходится первые часы их строительства. Так как средняя температура воды в ПР достаточно быстро опускается ниже 4°C , то влияние такого распределения температуры на общее развитие формы выработки минимально.

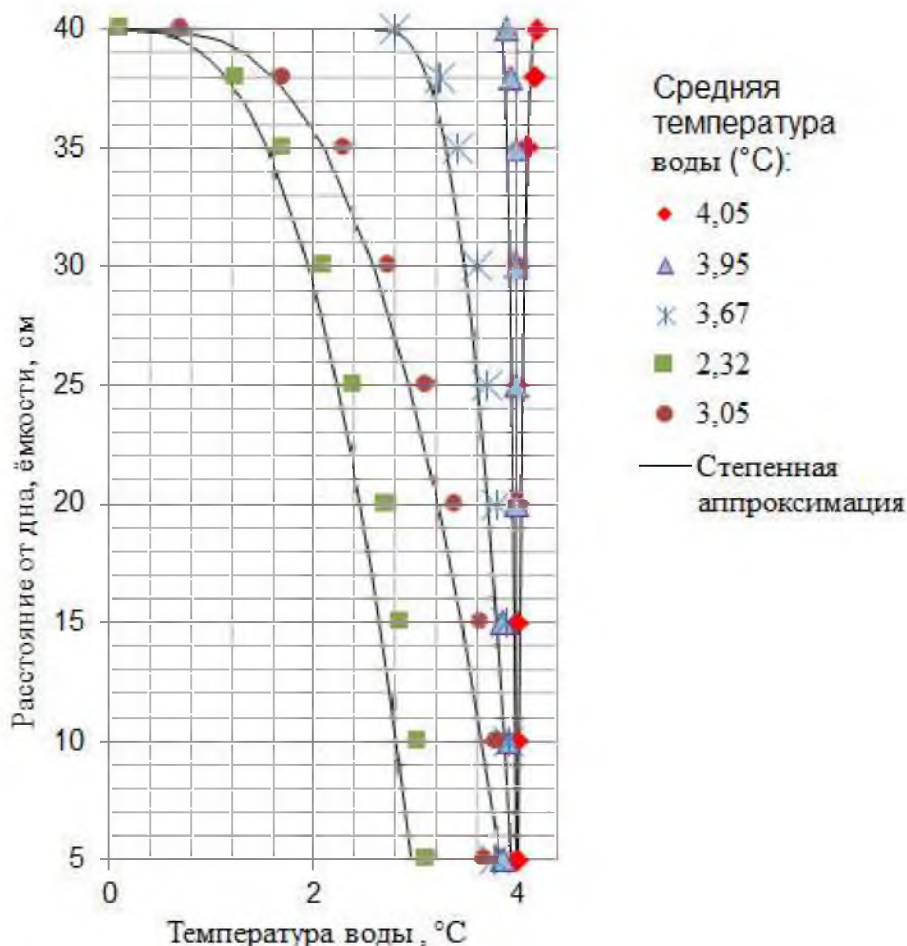


Рисунок 8 – Графики зависимости температуры воды от глубины при разных средних температурах воды

Во второй области T_p изменяется в пределах от 3 до 4°C .

Закон распределения температуры воды в резервуаре с высотой в этой области:

$$T_{h,i} = 4 \cdot \left(1 + (T_p - 4) \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{h_i}{H_{cm}}} - 1 + 1 \right) \right), \quad (6)$$

где: H_{cm} – высота уровня воды в ПР от его дна (м); h_i – текущая высота (м).

В третьей области T_p изменяется в пределах от 0 до 3°C .

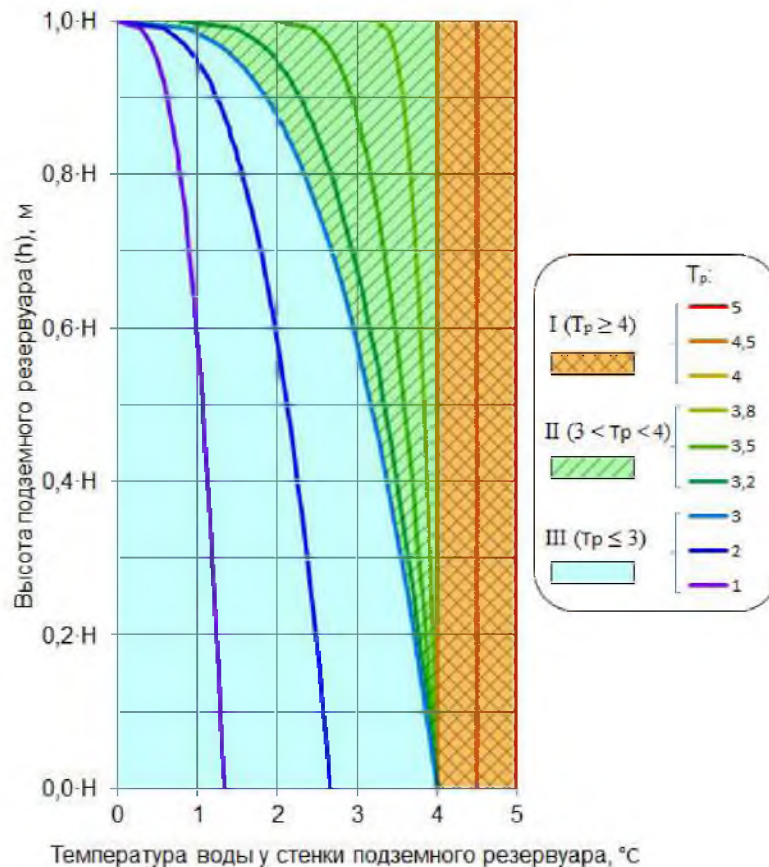


Рисунок 9 – Графики зависимости температуры воды от глубины в зависимости от среднего значения воды

Закон распределения температуры воды в резервуаре с высотой в этой области:

$$T_{h,i} = \frac{4}{3} \cdot T_p \sqrt[3]{1 - \frac{h_i}{H_{cm}}} \quad (7)$$

Четвёртая глава посвящена описанию методики определения параметров создания ПР. Предлагаемая методика определения параметров создания ПР основана на расчёте теплового баланса. Основными параметрами создания ПР являются: производительность подачи теплоносителя (воды) и его температура, а также уровень воды в ПР. Изменяя данные параметры в процессе создания резервуара, производят управление развитием его формы.

Расчёт динамики развития формы ПР и определения параметров его создания состоит из цикла последовательных шагов (рисунок 10). Перед расчётом параметров создания ПР на основе геологических данных, физических свойств и производственных нужд определяют его необходимые объём и форму. Резервуар должен быть устойчивым в конкретных

геологических условиях. Для расчёта задаются постоянные технологические параметры: высота резервуара, радиус скважины, через которую будет вестись размыв резервуара, значения приведённых скоростей и удельной теплоты разрушения мёрзлых грунтов по высоте интервала строительства для различных ИГЭ. Каждый новый шаг расчёта начинается с задания параметров, с помощью которых формируют ПР (параметры создания ПР) с необходимыми объёмом и формой: расход и температура подаваемой в резервуар воды, уровень воды в резервуаре. Рассчитывается имеющийся на начало расчётного шага объём ПР, как сумма объёмов усечённых конусов через единичный интервал по высоте. Рассчитывается площадь оттаиваемой поверхности ПР. Из уравнения теплового баланса получают среднюю температуру воды в резервуаре (T_p).

Среднюю температуру воды в резервуаре рассчитывают по формуле 8.

$$T_p = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a}, \quad (8)$$

где: a , b и c находят по формулам 9-17.

Если получаемая средняя температура (T_p), при подстановке в формулу 8 значений a , b и c , рассчитанных по формулам 9-11, принимает значение от 4°C до 10°C , то она принимается за истинную. Если нет, то она рассчитывается с использованием переменных a , b и c , значения которых получены по формулам 12-14. В этом случае, если $3 < T_p < 4$, то она принимается за истинную. В противном случае, средняя температура рассчитывается с использованием переменных a , b и c , значения которых получены по формулам 15-17.

$$a = v_T \cdot S \cdot \tau_{ш} \cdot (c_в \cdot \rho_в \cdot (2 \cdot W - 1) + 2 \cdot c_{ч.г} \cdot \rho_{ч.г} \cdot (1 - W)), \quad (9)$$

$$b = v_T \cdot S \cdot \tau_{ш} \cdot (q_{нр} - c_г \cdot \rho_г \cdot T_M) + c_в \cdot \rho_в \cdot (P_в \cdot \tau_{ш} + V_H), \quad (10)$$

$$c = - \left(c_в \cdot \rho_в \cdot (P_в \cdot T_в \cdot \tau_{ш} + V_H \cdot T_{р.н}) + \lambda \cdot S \cdot T_M \cdot \tau_{ш} \right), \quad (11)$$

$$a = v_T \cdot S \cdot \tau_{ш} \cdot (c_в \cdot \rho_в \cdot (1 + W) + c_{ч.г} \cdot \rho_{ч.г} \cdot (1 - W)), \quad (12)$$

$$b = v_T \cdot S \cdot \tau_{ш} \cdot \left(q_{нр} - c_2 \cdot \rho_2 \cdot T_M - 4 \cdot c_6 \cdot \rho_6 \cdot (2 - W) + 4 \cdot c_{ч.г} \cdot \rho_{ч.г} \cdot (1 - W) \right) + c_6 \cdot \rho_6 \cdot V_H, \quad (13)$$

$$c = c_6 \cdot \rho_6 \cdot \left(P_6 \cdot \tau_{ш} \cdot (4 - T_6) - V_H \cdot T_{p.н} \right) - \lambda \cdot S \cdot T_M \cdot \tau_{ш}, \quad (14)$$

$$a = v_T \cdot S \cdot \tau_{ш} \cdot \left(c_6 \cdot \rho_6 \cdot \left(2 \frac{1}{3} W - 1 \frac{2}{3} \right) + 2 \frac{1}{3} c_{ч.г} \cdot \rho_{ч.г} \cdot (1 - W) \right), \quad (15)$$

$$b = v_T \cdot S \cdot \tau_{ш} \cdot \left(q_{нр} - c_2 \cdot \rho_2 \cdot T_M \right) + c_6 \cdot \rho_6 \cdot \left(\frac{1}{3} P_6 \cdot \tau_{ш} + V_H \right), \quad (16)$$

$$c = - \left(c_6 \cdot \rho_6 \cdot \left(P_6 \cdot T_6 \cdot \tau_{ш} + V_H \cdot T_{p.н} \right) + \lambda \cdot S \cdot T_M \cdot \tau_{ш} \right), \quad (17)$$

где: T_p – средняя температура воды в резервуаре (°C); P_6 – расход (м³/ч) и температура T_6 (°C) подаваемой в ПР оборотной воды на расчётном шаге длительностью $\tau_{ш}$; c_6 – удельная теплоёмкость воды (Дж/(кг·°C)); ρ_6 – плотность воды (кг/м³); V_H и $T_{p.н}$ – объём (м³) и средняя температура воды (°C) в резервуаре в начале расчётного шага; c_2 – удельная теплоёмкость массива мёрзлых грунтов (Дж/(кг·°C)); ρ_2 – плотность массива мёрзлых грунтов (кг/м³); $q_{нр}$ – удельная теплота разрушения массива мёрзлых грунтов в воде (Дж/кг); T_M – температура массива мёрзлых грунтов (°C); v_T – приведённая скорость разрушения поверхности массива многолетнемёрзлых грунтов в воде (м/(ч·°C)); S – суммарная площадь оттаиваемой вертикальной поверхности ПР (м²); W – общая влажность массива мёрзлых грунтов, $c_{ч.г}$ – удельная теплоёмкость минерального скелета мёрзлых грунтов (Дж/(кг·°C)); $\rho_{ч.г}$ – плотность минерального скелета мёрзлых грунтов (кг/м³); λ – коэффициент теплопроводности массива мёрзлых грунтов (Дж/(м·ч·°C)).

По формулам 5 и 6 определяют распределение температуры воды по высоте ПР.

Приращение радиусов по высоте резервуара рассчитывается с учётом приведённой скорости разрушения многолетнемёрзлых грунтов в воде для

каждого ИГЭ и температуры воды на уровне этого радиуса.

$$\Delta r_i = v_{T,i} \cdot T_{h,i} \cdot \tau_{ш}, \quad (18)$$

где: Δr_i – приращение радиуса ПР на i -ом интервале; $v_{T,i}$ – приведённая скорость разрушения многолетнемёрзлого грунта в воде (м/(°С·ч); $T_{h,i}$ – температура воды на i -ом интервале; $\tau_{ш}$ – время расчётного шага (ч).

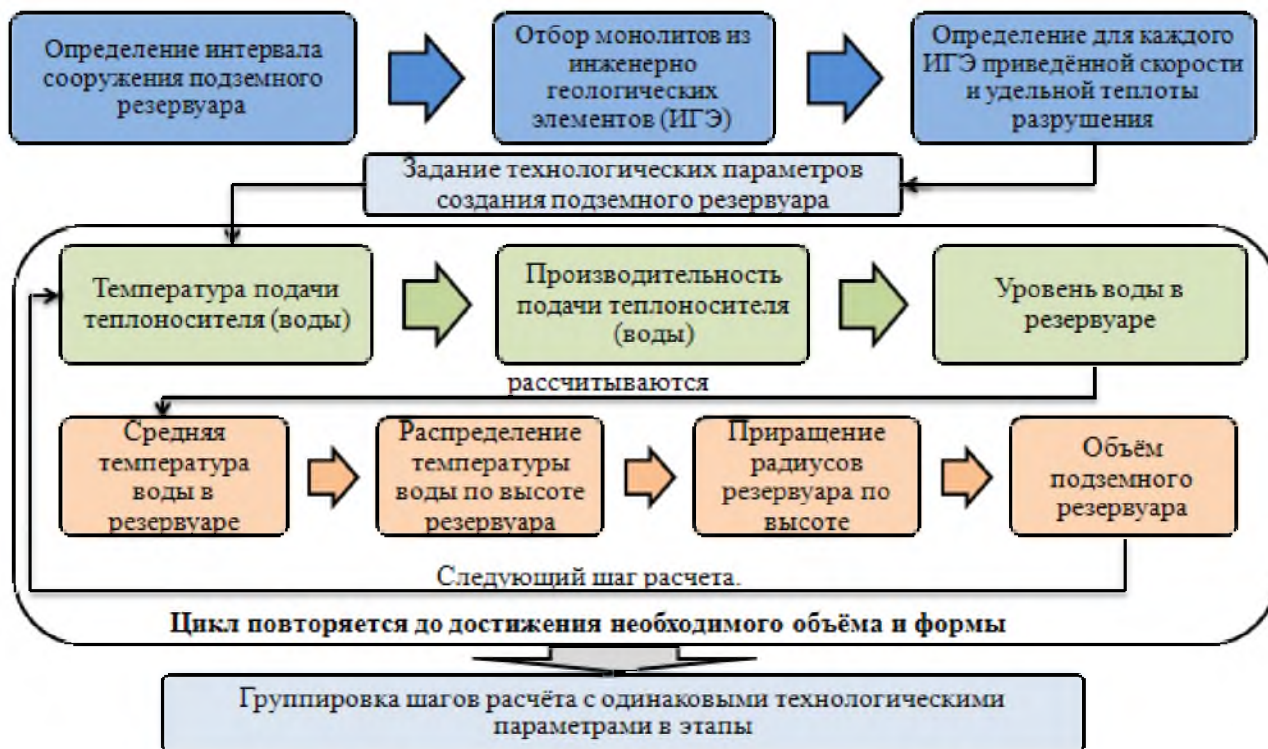


Рисунок 10 – Блок-схема расчёта развития формы ПР и определения параметров его создания

Радиусы в донной части резервуара корректируются с учётом угла естественного откоса. По данным изменения радиусов ПР перестраивается его контур и вычисляется объём. Цикл вычислений повторяется пока резервуар не достигнет необходимых объёма и формы.

На основе определённых параметров создания ПР пишут регламент.

Особенностями данной методики являются:

- учёт геологического строения массива ММП;
- учёт особенностей разрушения песчано-глинистых ММП в воде;
- учёт влияния природных факторов на скорость оттаивания и разрушения ММП в воде;
- учёт влияния изменяющейся температурной стратификации воды

на развитие формы ПР в криолитозоне в процессе его сооружения;

- оперативность расчёта параметров создания ПР.

Для проверки сходимости результатов предлагаемой методики с результатами реального строительства, в методику были заданы параметры создания 24 резервуаров, построенных в 2011 – 2013 годах. Первоначально расчёт производили по действующей методике, затем – по предлагаемой. Получившиеся прогнозируемые контуры сравнили с контурами построенных ПР (рисунок 11 А). Разработанная методика показала хорошую сходимость рассчитанных с её помощью контуров резервуаров с формой двадцати одного из двадцати четырёх построенных в натуральных условиях резервуаров. На форму оставшихся трёх резервуаров в значительной степени повлияли геологические осложнения и непредвиденные обстоятельства, которые нельзя учесть с помощью данной методики. Сходимость формы построенных резервуаров с прогнозируемой формой по предлагаемой методике составила не менее 80%. Средняя сходимость по существующей методике составила 65%.

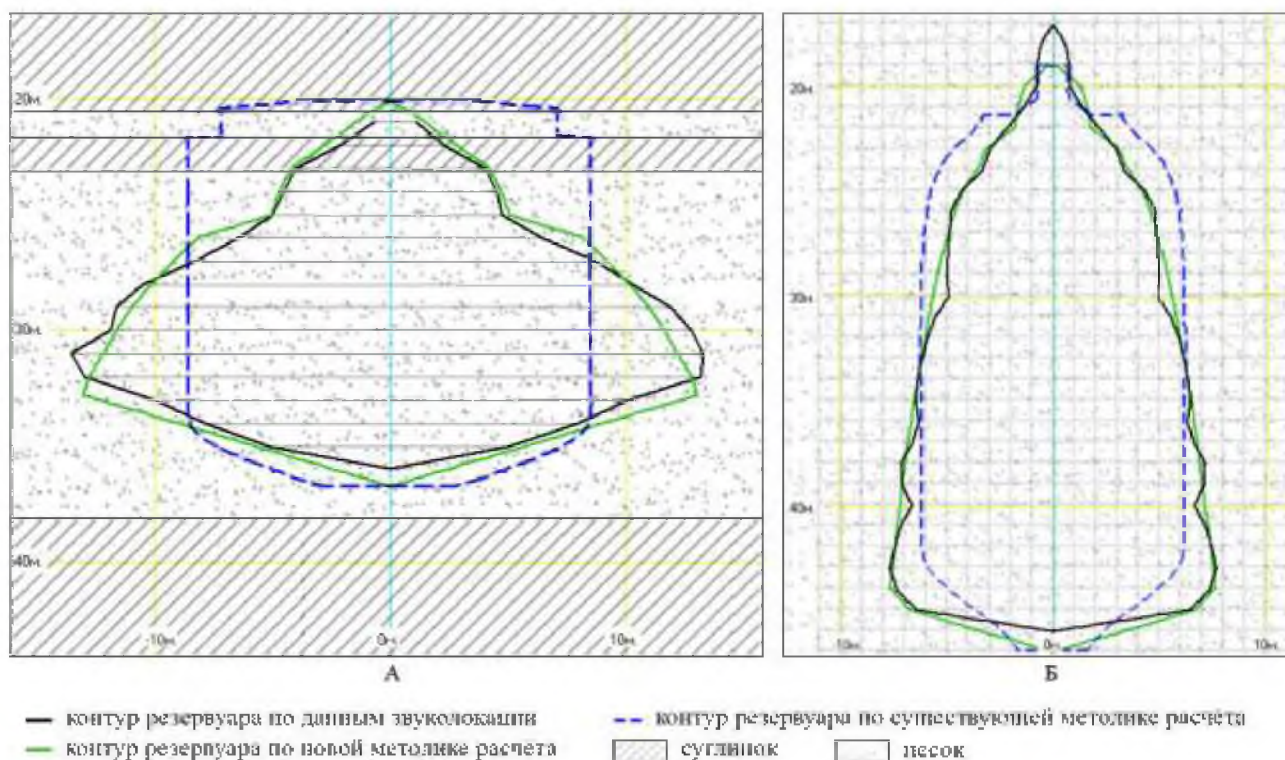


Рисунок 11 – Изображение наложения контура ПР, построенного по данным звуколокационной съемки и расчётам по существующей и предлагаемой методикам: А – резервуар, построенный в 2011 г.; Б – резервуар, построенный в 2013 г.

Предлагаемая методика была апробирована при разработке проекта на строительство ПР на полуострове Ямал. Хорошая сходимость расчётной формы и формы построенного резервуара (рисунок 11 Б) позволяет рекомендовать данную методику к промышленному применению. Анализ результатов расчёта напряжённо-деформированного состояния при отсутствии противодавления и сопоставление полученных результатов с критериями устойчивости резервуара свидетельствуют о его устойчивости и достаточно низкой конвергенции, что позволяет предотвратить значительные просадки земной поверхности и излив захораниваемых отходов бурения.

При внедрении в производство данная методика внесёт существенный вклад в решение проблемы ликвидации отходов бурения за счёт повышения безопасности, сокращения сроков и стоимости проведения работ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации содержится решение научной задачи по исследованию и разработке технологии создания ПР в ММП, а так же разработке методики определения параметров их создания (температура и производительность подачи воды, её уровень в ПР), экспериментальному выявлению закономерностей зависимости скорости разрушения ММП в воде от её температуры, содержания глинистых частиц и положения оттаивающей мёрзлой поверхности, что в совокупности обеспечивает создание ПР с заданной формой и объёмом в конкретных геологических условиях, что имеет существенное значение для обеспечения долговременного и безаварийного хранения отходов бурения в этих ПР до их полного промерзания.

Данная технология была успешно опробована при строительстве ПР в ММП на Бованенковском месторождении полуострова Ямал. Результаты создания ПР показали перспективность применения данной технологии.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Анализ методик определения параметров создания ПР в ММП показал, что для получения достоверных результатов необходимо учитывать изменчивость свойств массива ММП и изменяющееся распределение температуры воды в резервуаре в процессе его создания.

2. Исследования разрушения ММП в воде позволили получить функциональные зависимости скорости разрушения мёрзлой породы в воде от таких факторов как температура воды и содержание глинистых частиц.

3. Экспериментально установлено, что скорость разрушения мёрзлых песчаных, суглинистых пород и природного льда в воде, заполняющей ПР, прямо пропорционально зависит от температуры этой воды в интервале от 0 до 10°C.

4. Экспериментально установлено, что скорость разрушения поверхности мёрзлых песчано-глинистых пород при тепловом воздействии воды, заполняющей ПР, линейно снижается с увеличением содержания глинистых частиц, а при переслаивании песчаных и глинистых пород определяется скоростью разрушения поверхности глинистых пород

5. Экспериментально установлено, что скорость разрушения поверхности многолетнемёрзлых песчаных пород в воде снижается при отклонении этой поверхности от вертикального положения.

6. Установлено, что при создании ПР средняя производительность разрушения мёрзлых грунтов в воде определяется скоростью и затратами тепла на разрушение мёрзлого грунта, постепенно возрастая до максимального значения, обеспечиваемого вводимым теплом.

7. Установлено, что в однотипных ММП, находящихся в одинаковых условиях, при средней температуре воды в ПР 4-10°C, его поверхность оттаивает и разрушается равномерно по всей высоте, а при средней температуре воды 0-4°C интенсивнее оттаивает нижняя часть ПР.

8. Разработана методика определения параметров создания ПР в ММП на основе использования эмпирических параметров: скорости и удельной теплоты разрушения ММП в воде.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Каркашадзе Г.Г., Шергин Д.В., Луняков В.А., Банников Д.О. Методика определения удельной теплоемкости и коэффициента

температуропроводности горных пород методом импульсного нагрева в лабораторных условиях. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 9. – С. 137-140.

2. Хрулёв А.С., Перфильева М.А., Шергин Д.В. Исследование осаждения песчаных и глинистых частиц в скважинном подземном резервуаре. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 6. – С. 263-267.

3. Хрулёв А.С., Савич О.И., Карпухин А.Н., Шергин Д.В., Гридин О.М. Особенности оттаивания многолетнемёрзлых пород при создании скважинных подземных резервуаров. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 6. – С. 268-271.

4. Казарян В.А., Хрулёв А.С., Савич О.И., Сурин С.Д., Шергин Д.В., Горшков К.Н. Строительство подземных резервуаров в многолетнемёрзлых породах для хранения жидких углеводородов и захоронения промышленных отходов. // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – Москва, 2012. – № 6. – С. 42-45.

Публикации по теме диссертации в других изданиях:

5. Аксютин О. Е., Казарян В. А., Ишков А. Г. и др. Строительство и эксплуатация резервуаров в многолетнемёрзлых породах – М. – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2013. – 432 с. Глава 4.

6. Шергин Д.В. Методика расчёта параметров теплового разрушения многолетнемёрзлых осадочных пород при создании скважинных подземных резервуаров. // Физико-химическая геотехнология. Материалы конференции. – Москва, 2013 г. – С. 81-87.

Соискатель

Д.В. Шергин