

Общество с ограниченной ответственностью «Газпром геотехнологии»

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»

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени кандидата
технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Казарян Вараздат Амаякович

Москва – 2014

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 – ОСОБЕННОСТИ И ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ В МНОГОЛЕТНЕМЁРЗЛЫХ ПОРОДАХ СПОСОБОМ СКВАЖИННОЙ ГИДРОДОБЫЧИ.....	10
1.1 Инженерно-геологическая и геокриологическая оценка криолитозоны и полуострова Ямал.....	10
1.2 Опыт использования подземного пространства криолитозоны для строительства подземных сооружений.....	16
1.3 Сравнение других способов утилизации и ликвидации отходов бурения, преимущества подземного захоронения.....	32
1.4 Метод скважинной гидродобычи и технология создания подземных резервуаров в многолетнемёрзлых осадочных породах для захоронения отходов бурения	41
1.5 Обзор существующих методик определения параметров создания подземных резервуаров в многолетнемёрзлых породах и прогнозирования их развития	50
1.6 Опыт и проблемы создания подземных резервуаров.....	52
1.7 Обзор исследований влияния природных и технологических факторов на размываемость мёрзлых песчано-глинистых пород.....	57
1.8 Выводы, цели и задачи исследований	66
ГЛАВА 2 – ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРИРОДНЫХ ФАКТОРОВ НА РАЗМЫВАЕМОСТЬ МЁРЗЛЫХ ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ ПОРОД И НА ПРОЦЕСС СОЗДАНИЯ В НИХ ПОДЗЕМНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ.....	68
2.1 Исследование механизма разрушения мёрзлых осадочных пород в воде	68
2.2 Влияние геологического строения массива мёрзлых песчано-глинистых пород на развитие подземного резервуара.....	79
2.2.1 Развитие подземного резервуара в мёрзлом песчаном массиве.....	79
2.2.2 Развитие подземного резервуара в массиве многолетнемёрзлого песчаного грунта с пропластками суглинка.....	85
2.3 Выводы.....	91

2.4	Методика определения приведённой скорости и удельной теплоты разрушения мёрзлых осадочных пород в воде.....	93
ГЛАВА 3 – ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА РАЗВИТИЕ ФОРМЫ ПОДЗЕМНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ ...		105
3.1	Влияние основных технологических параметров на развитие геометрии подземных резервуаров	105
3.2	Влияние температуры и производительности подачи теплоносителя на распределение температуры воды по высоте подземного резервуара	107
3.3	Выводы по главе	115
ГЛАВА 4 – МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СОЗДАНИЯ ПОДЗЕМНОГО РЕЗЕРВУАРА		115
4.1	Методика определения параметров создания подземного резервуара ...	115
4.2	Применение методики для создания подземного резервуара в природных условиях.....	130
4.3	Расчёт устойчивости подземной выработки-ёмкости в многолетнемёрзлых осадочных породах.....	136
4.4	Оценка эффективности предлагаемых решений	141
4.5	Выводы.....	141
Заключение		143
Список литературы		145
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 – Методика определения приведённой скорости и удельной теплоты разрушения мёрзлого грунта при тепловом воздействии воды, заполняющей подземный резервуар.....		153
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 – Методика определения технологических параметров создания подземных резервуаров.....		160

ВВЕДЕНИЕ

Регионы распространения многолетнемёрзлых пород 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, создаваемых в многолетнемёрзлых породах методом скважинной гидродобычи. Практика показывает, что на сегодняшний день данный способ является наиболее эффективным и экономичным, а также наименее трудозатратным. Отходы бурения в подземном резервуаре с течением времени переходят в твёрдомёрзлое состояние и не оказывают негативное влияние на окружающую среду. Наряду с закачкой отходов бурения в данных подземных резервуарах, благодаря их герметичности, возможно хранение жидких углеводородов.

Сложные взаимосвязанные физико-химические процессы, протекающие в подземном резервуаре при реализации указанной технологии, обуславливают необходимость постановки и решения задач прогнозирования и управления развитием формы резервуара. Для эффективного управления процессом

сооружения подземных резервуаров в сложных геологических условиях необходимо учитывать влияние природных и технологических факторов на оттаивание и разрушение многолетнемёрзлых пород (под разрушением многолетнемёрзлых пород понимается их оттаивание, размокание и вынос частиц и агрегатов под действием силы тяжести).

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

Таким образом, можно констатировать, что исследование и разработка технологии создания подземных резервуаров в многолетнемёрзлых породах, обеспечивающей необходимую геометрию резервуаров, являются актуальными.

Целью 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.

Объектом исследований являлся процесс оттаивания и разрушения многолетнемёрзлых пород в воде при создании подземных резервуаров.

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

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.

Научное значение диссертации состоит в дальнейшем развитии существующих представлений о закономерностях влияния природных

факторов и технологических параметров создания подземных резервуаров в многолетнемёрзлых породах на развитие их формы.

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 подземных резервуаров в многолетнемёрзлых породах в натуральных условиях, на кустовых площадках Бованенковского месторождения.

Практическая значимость работы.

Разработана «Методика определения технологических параметров создания подземных резервуаров», позволяющая прогнозировать развитие формы скважинных подземных резервуаров в многолетнемёрзлых породах и определять параметры их создания, что позволит сооружать резервуары 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 подземных резервуаров 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 Московском государственном горном университете, 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.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. 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. – 2012. – № 6. – С. 42-45.
2. Каркашадзе Г.Г., Шергин Д.В., Луняков В.А., Банников Д.О. Методика определения удельной теплоёмкости и коэффициента температуропроводности горных пород методом импульсного нагрева в лабораторных условиях. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 9. – С. 137-140.
3. 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.
4. 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.

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

Объём и структура 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., Теплову М.К. за ценные замечания и помощь при подготовке работы.

ГЛАВА 1 – ОСОБЕННОСТИ И ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ В МНОГОЛЕТНЕМЁРЗЛЫХ ПОРОДАХ СПОСОБОМ СКВАЖИННОЙ ГИДРОДОБЫЧИ

1.1 Инженерно-геологическая и геокриологическая оценка криолитозоны и полуострова Ямал

Освоение подземного пространства криолитозоны представляет большой научный и практический интерес в связи с возможностью широкого использования толщи мёрзлых грунтов в качестве среды для различных сооружений. Область распространения многолетней мерзлоты в России занимает около 11 млн км², что составляет почти 65% территории страны (рисунок 1.1) [67].

Среднегодовая температура воздуха на территории распространения многолетнемёрзлых грунтов имеет отрицательное значение. Мёрзлая толща в направлении с юга на север достигает своей наибольшей глубины около 700 м.

В толще многолетнемёрзлых грунтов выделяются два горизонта: верхний (зона аккумуляции), в котором наблюдаются сезонные колебания температуры (обычно 14-20 м), и нижний (зона нулевых годовых амплитуд), в котором температура грунтов в течение года постоянна. В верхнем горизонте период и амплитуда колебаний температуры зависят от географического расположения местности, метеорологических параметров, снегоотложений, времени года, глубины грунта от поверхности и других факторов. Во втором горизонте с увеличением глубины температура повышается. Геотермический градиент колеблется в пределах 0,02-0,035 град./м. Температура на глубине годовых нулевых амплитуд в различных районах и условиях изменяется от 0 до минус 16°С. Решающее влияние на температуру грунтов оказывают длительно действующие факторы, в первую очередь период действия отрицательных температур наружного воздуха, продолжительность которого в криолитозоне составляет 180-240 суток [36].

Геологическое строение криолитозоны характеризуется большим разнообразием. На её значительной части распространены дисперсные толщи, образованные преимущественно четвертичными и третичными отложениями, а в отдельных случаях и более древними породами. Большая их часть относится к числу достаточно мощных отложений, в пределах которых рационально размещать подземные сооружения неглубокого заложения.



Рисунок 1.1 - Распространение многолетней мерзлоты по территории России

Климатические, геологические и инженерно-геокриологические условия центральной части полуострова Ямал, о котором преимущественно пойдет речь далее, несколько отличаются от районов севера Дальнего Востока (рисунок 1.2) [69].



Рисунок 1.2 – Месторождения полуострова Ямал

Описываемый регион расположен в пределах криолитозоны. Его территория представляет собой плоскую, в разной степени расчленённую речной и овражной сетью аккумулятивную низменную равнину. Наиболее низкие отметки характерны для пойм рек (3-6 м). Водораздельные участки представлены главным образом склонами и останцами третьей морской террасы с абсолютными отметками 30-40 м.

Климат исследуемого района характеризуется как арктический с холодной продолжительной зимой (до 9,5 месяцев) и коротким прохладным летом. Средняя многолетняя годовая температура воздуха колеблется от минус 9,8° до минус 8,3°С. Средняя минимальная температура воздуха в феврале составляет у мыса Харасавэй – минус 28,2°, у фактории Марре-Сале – минус 25,7°. Средняя максимальная температура воздуха самого тёплого

месяца – июля составляет, по данным метеостанций Харасавэй и Марре-Сале, 9,8° и 11,0°С, соответственно. Продолжительность тёплого периода по многолетним наблюдениям составляет в среднем 110-115 дней. Среднее число дней со снежным покровом – 236.

В литолого-стратиграфическом отношении разрез рассматриваемой территории до глубины 150 м представлен тремя комплексами пород (сверху вниз).

I-й комплекс сложен покровными голоценовыми озерно-болотными отложениями (Ib IV) и представленными в основном сильнольдистым торфом мощностью до 1,0 м и льдистыми (сильнольдистыми) дисперсными суглинисто-супесчаными грунтами мощностью до 9,4 м, подстилающими его. Общая мощность отложений составляет 1,5-10 м.

II-й комплекс представлен нерасчленёнными средне-верхнеплейстоценовыми морскими и прибрежно-морскими глинисто-песчаными отложениями (m, pm II-III).

В их разрезе, как правило, чётко выделяются три горизонта. Под покровными суглинками простирается выдержанный горизонт слабльдистых суглинков. Ниже залегает толща пылеватого песка с редкими линзами супесей или суглинков. Песчаный горизонт занимает не менее 30-35% в разрезе. Этот горизонт, благодаря его хорошей размываемости, используется для создания подземных резервуаров. Песчаную толщу подстилает слабльдистый горизонт глинистых отложений (суглинки и глины). На некоторых участках вскрыт пласт подземного льда в интервалах глубин от 15 до 43 м. В основании ледяной залежи преобладает ледогрунт, минеральная часть представлена песком. Мощность пласта льда колеблется от 0,6 м до 23 м.

III-й комплекс – морские среднеплейстоценовые отложения салехардской свиты (m II₂₋₄) вскрыты под песками с глубины 26-28 м. Салехардская толща представлена суглинками, реже глинами темно-серыми, содержащими тонкие (1–2 см) прослойки песков в верхней части разреза до глубины 39-46 м. В

прослоях песков встречаются вкрапления растительного детрита, в суглинках присутствуют примазки чёрного органического вещества. Как показали результаты исследований, геокриологический разрез в пределах изученной мощности отложений 15-150 м характеризуется неоднородным строением. Сплошное распространение многолетнемёрзлых пород (ММП) нарушается наличием криопэгов, которые в разрезе площадки имеют локальное распространение.

Криогенное строение исследованных многолетнемёрзлых пород отличается значительной изменчивостью по разрезу и по простиранию. Верхние горизонты являются сильнольдистыми с видимой льдистостью до 40-50%, криотекстура шлировая, микро- и тонкошлировая, мелкосетчатая, редко массивная. Шлировые и сетчатые текстуры приурочены к суглинистым (реже супесчаным) грунтам, массивная – к песчаным или супесчаным. Реже встречается атакситовая структура с льдистостью до 65%, данные грунты можно отнести к льдогрунтам.

Криогенное строение разреза многолетнемёрзлых пород (ММП) обусловлено содержанием текстурообразующего льда. В верхней части разреза, где грунты льдонасыщены и видимая льдистость высока ($i_l = 0,2-0,6$), для торфов сильнольдистых ($i_l = 0,4-0,6$) характерна атакситовая криотекстура; для льдистых ($i_l = 0,2-0,4$) глин и суглинков – линзовидно-слоистая и слоистая, тонкошлировая часто- и среднеслоистая, с толщиной шлиров льда от долей мм до 2 мм, участками неполносетчатая с вертикальными прослоями льда до 3 мм. С увеличением глубины уменьшается льдистость и толщина шлиров, а расстояние между ними увеличивается. Слабольшедистые ($i_l = 0,05-0,18$) озёрные суглинки и глины характеризуются тонкошлировой средне- и редкослоистой криотекстурой: шлиры льда от долей мм до 1,5 мм через 0,5-3 см. В морских казанцевских песках (m III₁) до глубины 15,9 м наблюдалась тонкошлировая (шлиры льда по 0,5 мм) редкослоистая (3 шлира на 50 см) криотекстура с видимой льдистостью не превышающей 0,03-0,05, в более глубоких горизонтах

казанцевских песков на фоне массивной криотекстуры встречались единичные шлиры льда толщиной до 1-3 мм. Нижележащая салехардская толща (m П₂₋₄) характеризуется массивной криогенной текстурой.

Мёрзлые песчаные отложения на полуострове Ямал мощностью от 11 до 45 м на глубинах от 13 до 60 м, благодаря хорошей размываемости, являются отличной средой для создания в них подземных резервуаров способом скважинной гидродобычи. Присущая этим породам льдистость обеспечивает защиту от фильтрации в массив хранимого или захораниваемого в подземных резервуарах продукта. Температура пород на этих глубинах (от минус 3 до минус 5,5°С) обеспечивает перевод захораниваемых отходов бурения в твёрдомёрзлое состояние [53]. Поднимаемая из резервуара в процессе его создания водно-песковая смесь, благодаря гидравлической крупности оттаявшего песка, достаточно быстро разделяется в отстойниках или на карте намыва на песок и воду, которую сразу можно использовать как обратную при намыве. Поднятый в процессе создания подземного резервуара песок можно использовать для отсыпки дорог и площадок.

Встречающиеся в мёрзлых песчаных отложениях прослой супеси, суглинка и глины в зависимости от их мощности в той или иной степени могут повлиять на развитие подземных резервуаров. Это связано с более ипловой размываемостью по сравнению с мёрзлыми песчаными отложениями.

Мощность и физико-механические свойства песчано-глинистых отложений на территории Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ) позволяют создавать в них устойчивые подземные резервуары объёмом до 5000 м³ и использовать их для захоронения отходов бурения.

1.2 Опыт использования подземного пространства криолитозоны для строительства подземных сооружений

С древнейших времён подземное пространство литосферы использовалось в различных отраслях хозяйственной деятельности. В нём строились жильё, бункеры, склады, естественные природные холодильники и хранилища. Такое широкое использование объясняется рядом преимуществ: экономия строительных и теплоизоляционных материалов, защищённость от внешних воздействий, повышенная пожаробезопасность, низкие затраты на поддержание и эксплуатацию сооружений, небольшие земельные отводы. Особую популярность имели подземные сооружения во время Второй мировой войны. В них размещались промышленные предприятия и склады. К концу войны действовало около 150 подземных заводов и цехов. В США к 1980 году объём подземных холодильников превысил 90 000 м³. Огромный опыт по строительству заводов в прочных породах накоплен в Швеции. Окупаемость подземных объектов по сравнению с наземными значительно выше за счёт низких эксплуатационных расходов. В Финляндии экономия энергии на подземных сооружениях составляет: по холодильникам – 74%, по водным бассейнам – 20%, по спортзалам – 31% [36].

В последние 50-60 лет активно начали использоваться подземные резервуары для хранения газо-нефтепродуктов [24]. Первые подземные нефтехранилища были построены в период Второй мировой войны в США, Германии и Японии. Затем эту идею активно начали развивать в Норвегии, Швеции и Финляндии. Эти подземные хранилища создавались преимущественно в солях. В ФРГ к 1985 г. суммарный объём подземных хранилищ в соляных пластах составил 40 млн. м³. В США в 1985 году, в соляных пластах с мощностью около 1000 м вблизи Мексиканского залива были построены подземные хранилища общим объёмом 200 млн. м³. Подземные ёмкости неподалеку от Вильгельмехафена, расположенные на глубине 1000 м,

имеют диаметр 80 м и высоту более 300 м. Подземные ёмкости строят и для нефтеперерабатывающих заводов. Например, нефтеперерабатывающий завод в Норвегии компании «Норик Гидро» имеет хранилище объёмом более 1 млн. м³ [36]. Сейчас наибольшее количество подземных хранилищ газа (ПХГ) в соляных кавернах эксплуатируется в США – 31 ПХГ, общая активная ёмкость которых составляет около 8 млрд. м³, а суммарный объём отбора более 200 млн. м³/сут. В Германии эксплуатируется 19 ПХГ, созданных в солях, с суммарным объёмом активного газа около 7 млрд. м³, также планируется расширение действующих и строительство новых ПХГ с общей активной ёмкостью около 8 млрд. м³. В настоящее время на территории России строится 3 ПХГ : Калининградское (Калининградская область), Волгоградское (Волгоградская область), Новомосковское (Тульская область); эксплуатируется хранилище гелиевого концентрата (Оренбург). На территории Армении также эксплуатируется ПХГ, общий объём которого составляет 150 млн. м³. Ведутся работы по дальнейшему расширению ПХГ до 380 млн. м³ [66].

Наземные резервуарные парки из-за значительной металлоёмкости и крупных земельных отводов стали нерентабельными [1]. Кроме того, наземные резервуары имеют небольшой срок службы. Для строительства хранилища углеводородов объёмом 40,5 тыс. м³ капитальные вложения составляют для наземного и подземного хранилища шахтного типа соответственно 5,5 и 2,26 млн. долларов. На месторождениях, у которых в составе газа присутствуют сероводород и углекислота, наземное хранение практически невозможно. Из всего выше перечисленного видно, что создание подземных хранилищ, в том числе и в многолетнемёрзлых породах, по своим технико-экономическим показателям превосходит строительство наземных резервуаров.

Первым подземным сооружением в криолитозоне, которое имело важное значение при изучении распространения мёрзлых толщ, была шахта Шергина в городе Якутске. Фёдор Шергин начал проходку колодца в 1828 году и вёл её в течение 9 лет [20]. Шахта была пройдена до глубины 116,4 м. Она позволила

провести первые измерения и исследования. Швецов П.Ф. оценивал значение работы Шергина для геокриологии наравне с вкладом нидерландского натуралиста Антони ван Левенгука в микробиологию [36, 51,52].

Также к числу подземных сооружений в вечной мерзлоте, которые использовались непосредственно для изучения свойств мёрзлых грунтов, относятся подземные лаборатории. Под руководством П.И. Мельникова в 1936 году, на Игарской мерзлотной станции под землёй были сооружены две лаборатории. Затем в 1940 и 1962 годах были построены две подземные лаборатории в городе Якутске.

При использовании криолитозоны наибольшее распространение получили подземные холодильники. Первые промышленные подземные холодильники были построены в посёлке Кюсюр Якутской АССР и в поселке Усть-Порт Красноярского края в 1926 и 1930 годах соответственно. Пик создания подземных холодильников на территории России пришелся на 60-70 годы. К настоящему времени только на территории Якутии построено и эксплуатируется около 400 подземных холодильников с суммарной ёмкостью 30 000 т. Ёмкость холодильников достигает 500 т. Они были построены преимущественно в дисперсных отложениях на глубине до 40 м [36].

В 1967 году была опубликована монография Н. Г. Миронова, посвященная созданию и эксплуатации подземных холодильников. В этой монографии также приводится карта районирования территории севера СССР по условиям строительства (рисунок 1.3). В её основу положены температура мёрзлых грунтов и продолжительность отрицательных температур воздуха.

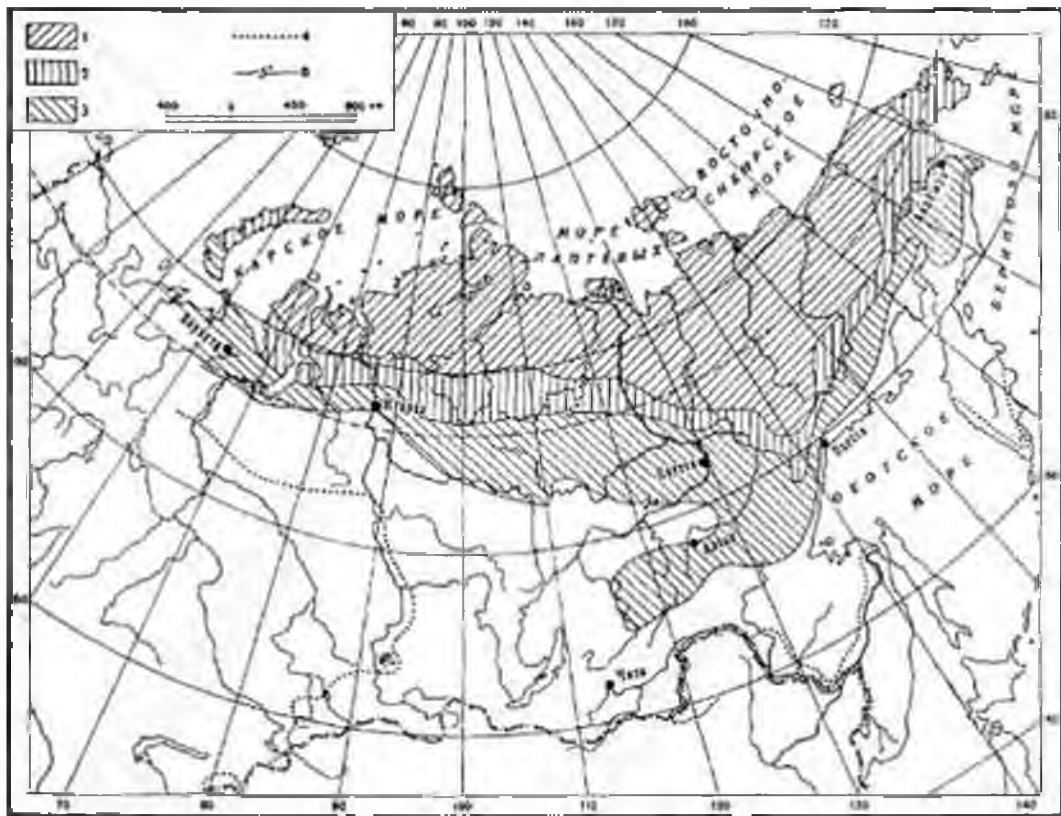


Рисунок 1.3 – Карта зональной разбивки территории Севера СССР по возможности строительства подземных холодильников (Миронов, 1967):
 1 – арктическая и субарктическая зона; 2 – умеренная зона; 3 – зона устойчивых холодных зим; 4 – граница области вечной мерзлоты; 5 – минимальная температура горных пород у подошвы слоя годовых колебаний

Создание технологии строительства и эксплуатации подземных хранилищ базируется на большом объеме экспериментальных и опытно-промышленных работ. В 1964 году близ города Анадырь были введены в эксплуатацию два опытно-промышленных резервуара траншейного и шахтного типа объемом 500 м^3 каждый, для хранения авиационного керосина, товарные качества которого в процессе хранения даже улучшались за счет вымерзания влаги. На севере Магаданской области подземные резервуары шахтного типа применялись для хранения дизельного топлива. На Шмидтовской нефтебазе в 1970-1974 годах было построено и введено в эксплуатацию пять шахтных резервуаров общим объемом 69 тыс. м^3 . На прииске Ленинградский Полярнинского ГОКа в 1977–1989 годы в результате переоборудования

отработанных россыпных шахт введено в эксплуатацию шесть подземных хранилищ дизельного топлива общим объёмом 200 тыс. м³ [73].

Подземные шахтные выработки для хранения продуктов переработки газа, углеводородного топлива и воды активно используются в криолитозоне в республике Якутия, на Урале, севере Тюменской области, а также в Канаде и США. На Крайнем Севере в подземных выработках захораниваются промышленные отходы (в том числе и радиоактивные) [48].

Подземное хранение жидких продуктов в криолитозоне возможно благодаря хорошим экранирующим свойствам мёрзлого массива. Подземное хранение в криолитозоне используется в народном хозяйстве с конца девятнадцатого века. Однако, до 70-х годов двадцатого века, подземные хранилища в мерзлоте создавались исключительно шахтным или траншейным методом с последующим «закапыванием» захораниваемого объекта.

Однако создание шахтных хранилищ требует больших финансовых затрат как на само строительство, так и на последующий этап эксплуатации. Опыт создания подземных резервуаров методом скважинной гидродобычи доказал экономичность и безопасность технологии их сооружения и эксплуатации.

Технология создания подземных резервуаров имеет большое количество аналогий с добычей полезных ископаемых из погребённых россыпей [6, 9, 49, 45, 58]. Скважинная гидродобыча дисперсных грунтов активно применялась с 60-х годов прошлого века. Основным направлением данной технологии являлась разработка россыпных месторождений руд и прослоев угля, мощность которых делала неэффективным шахтный метод. В случае строительства подземных резервуаров с применением метода водотеплового разрушения мёрзлых пород через скважину нет затрат, связанных с ведением вскрышных и горнопроходческих работ, существенно уменьшается стоимость строительства и эксплуатации. Для создания подземных резервуаров достаточно смонтировать

скважинный снаряд, состоящий из системы вложенных друг в друга труб, и на поверхности выделить место под размещение оборудования и карту намыва.

При разработке некоторых полезных ископаемых и создании подземных резервуаров в соляных пластах используется метод скважинной гидродобычи, который позволяет выполнять практически все технологические операции с помощью воды и избежать работ человека под землёй. Этот метод обеспечивает высокие технико-экономические показатели производства и безопасность условий труда. Наряду с разработкой россыпных месторождений, этот метод представляет огромный интерес для создания подземных резервуаров в криолитозоне. Причина интереса к многолетнемёрзлым дисперсным отложениям связана с их активным разрушением под воздействием тепловой и механической энергиями воды. Основной областью применения данной технологии являлась разработка маломощных прослоев угля и россыпных месторождений руд, нерентабельных для освоения шахтным способом. Значительный вклад в развитие гидромеханизации внесли работы Холина Н.Д., Нурока Г.А., Шорохова С.М., Мучника В.С. Изучению различных аспектов скважинной гидродобычи посвящены работы Лобанова Д.П., Бабичева Н.И., Неберы В.П., Чернея Э.И., Аренса В.Ж., Исмагилова Б.В., Шпака Д.Н., Хрулёва А.С., Фридмана Б.Э., Хныкина В.Ф. и других. Впервые метод скважинной гидродобычи для создания подземных резервуаров в мёрзлых дисперсных грунтах был предложен и осуществлен Сильвестровым Л.В., Пястоловым А.Д. и другими сотрудниками ВНИИПромгаза.

Исследованиями взаимодействия водных потоков с мёрзлыми грунтами занимались Бейрахов Г.И., Гольдман В.Г., Лавров Н.П., Перльштейн Г.З., Самышин В.К., Саввин Е.Д., Арэ Ф.Э., Хмызников П.К., Томирдио С.В., Шур Ю.Л., Константинов И.П., Любомиров А.С., Гоголев Е.С., Вдовин Ю.И., Балобаев В.Т., Ершов Э.Д., Малиновский Д.В., Данько В.К. и другие.

Целенаправленное изучение процессов термоэрозии ведется с 1967 года на географическом факультете МГУ. В работе Ершова Э.Д. и других предложена

классификация типов размыва по характеру взаимодействия водного потока с мёрзлыми грунтами: эрозионный, термоэрозионный, предельно-термоэрозионный, мёрзлоэрозионный. Впервые ими были обобщены различные аспекты термоэрозии и приведены результаты камеральных лабораторных и полевых исследований. В настоящее время данная монография является наиболее цельной исследовательской работой в области термоэрозии [31].

В результате этих исследований был намечен комплексный подход к изучению размыва мёрзлых грунтов. Однако их результаты не раскрывают подходов к прогнозированию и управлению развитием подземного резервуара под воздействием тепловой энергии воды.

Устойчивости сооружений в мёрзлых грунтах посвящены многочисленные работы Цытовича Н.А., Вялова С.С., Шафаренко Е.М. и других исследователей. Основой современных представлений о механических свойствах мёрзлых грунтов являются основные положения Цытовича Н.А. о содержании незамёрзшей воды в мёрзлых грунтах и её динамическом равновесии с остальными компонентами в зависимости от температуры и приложенной нагрузки. Вялов С.С. в своих работах исследовал явления ползучести и релаксации в мёрзлых грунтах. Ему принадлежит развитие основ кинетической теории прочности. Разработке геомеханических моделей и устойчивости незакреплённых выработок (в том числе и для мёрзлых грунтов) посвящены работы Зарецкого Ю.К., Баклашова И.В., Картозии Б.А., Хрусталёва Л.Н. и других [11, 39, 42, 60]. Также существенный вклад в развитие и формирование механики мёрзлых грунтов внесли Войтковский К.Ф., Гречищев С.Е., Городецкий С.Э., Зарецкий Ю.К., Далматов Б.И., Пчелинцев А.М., Докучаев В.В., Мазуров Г.П., Вотяков И.Н., Тайбашев В.Н., Пекарская Н.К., Шушерина Е.П., Роман Л.Т. и другие. Благодаря этим учёным были установлены основные закономерности деформирования и разрушения криогенных пород при различном характере приложения нагрузки и изменения температуры. Сейчас

данное направление успешно развивается благодаря численным методам с использованием современной вычислительной техники.

Исследованием тепловых процессов в мёрзлых породах занимались Дмитриев А.П., Гончаров С.А., Будыко М.И., Бакакин В.П., Богословский П.А., Кроник Я.А. [10, 16, 26, 29, 35].

Сейчас подземные сооружения в многолетнемёрзлых породах широко используются в республике Якутия, в Тюменской области, на Полярном Урале, в США и Канаде для хранения продуктов переработки газа, углеводородного топлива и воды.

Технология создания подземных резервуаров способом скважинной геотехнологии активно развивалась в 1980-е года. Привлекательность данной технологии заключается в простоте реализации и дистанционности строительства. Впервые технология оттаивания мёрзлых пород через скважину была опробована на прииске «Светлый» треста Лензолото в 1884 году [25]. Суть скважиной гидротехнологии заключается в бурении скважины, как правило, с поверхности, монтаже скважинного снаряда, разрушении грунта с использованием энергии воды и подъёме образующейся гидросмеси на поверхность [56].

Исследования по сооружению подземных резервуаров способом скважинной гидродобычи связаны с такими именами, как Лобанов Д.П., Бабичев Н.И., Аренс В.Ж., Смирнов В.И., Кузьмин Г.П., Теплов М.К., Яковлев А.В., Сильвестров Л.К., Казарян В.А., Хрулёв А.С., Гридин О.М., Скосарева Т.В., Борисов В.В., Рочев В.Ф., Сурин С. Д., Литвинцев В.С., Козлов В.А., Бобков Ю.П., Пястолов А.Д., Фёдоров Б.Н.

Исследование теплового режима мёрзлых грунтов непосредственно в процессе строительства подземных резервуаров скважинным методом и при добыче полезных ископаемых методом скважинной гидродобычи представлено в работах Смирнова В.И., Хрулёва А.С., Сильвестрова Л.К., Бобкова Ю.П. Сурина С.Д. [14, 22, 37, 47].

Технология создания подземных резервуаров в многолетнемёрзлых грунтах во многом схожа со строительством подземных резервуаров в соляных массивах и с технологией по добыче полезных ископаемых из погребённых россыпей через скважину (работы Аренса В.Ж., Бабичева Н.И., Гридина О.М., Хрулёва А.С., Башкатова А.Д. и других) [7, 9, 8, 31, 40].

Данная технология основана на разрушении многолетнемёрзлых дисперсных грунтов через скважину при тепловом воздействии воды, заполняющей подземный резервуар. Создание подземных резервуаров предусматривается в основном в многолетнемёрзлых песчаных отложениях, но оно также возможно в многолетнемёрзлых суглинистых и глинистых отложениях. Следует отметить тот факт, что на разрушение мёрзлых глинистых пород требуется значительно больше времени, чем на разрушение мёрзлых песчаных пород. Оттаявший со стенок подземного резервуара грунт опускается на дно. Затем его поднимают на земную поверхность эрлифтом, гидроэлеватором, шнеком или вытеснением.

Развитие методов оттаивания мёрзлых грунтов через скважину проводилось в нескольких направлениях: метод многослойного оттаивания (Рейнюк, Балобаев, Павлов, Оловин), гидроигловой метод, дождевальная метод (Кузьмин, Яковлев), фильтрационно-дренажный метод (Гольдман).

Проблема непрерывного подъёма грунтовой смеси на поверхность была решена в схеме строительства подземных резервуаров при полном заполнении выработки и использовании эрлифтного снаряда. Развитию данной технологии в 90-х годах двадцатого века посвящены работы Хрулёва А.С. [58, 59].

Размыв мёрзлых пород можно вести путём заполнения или орошения стенок (дождевания) разрабатываемой полости тёплой водой. В первом случае превалирует тепловое разрушение водой мёрзлых грунтов, а во втором – механическое. Обе технологии включают в себя совокупность производственных операций по разрушению мёрзлой породы, её подъёму на поверхность одним из вышеописанных способов и укладке [37].

В восьмидесятих годах двадцатого века Кузьминым Г.П. и Яковлевым А.В. была разработана конструкция скважинного гидродобывного снаряда, изображённая на рисунке 1.4.

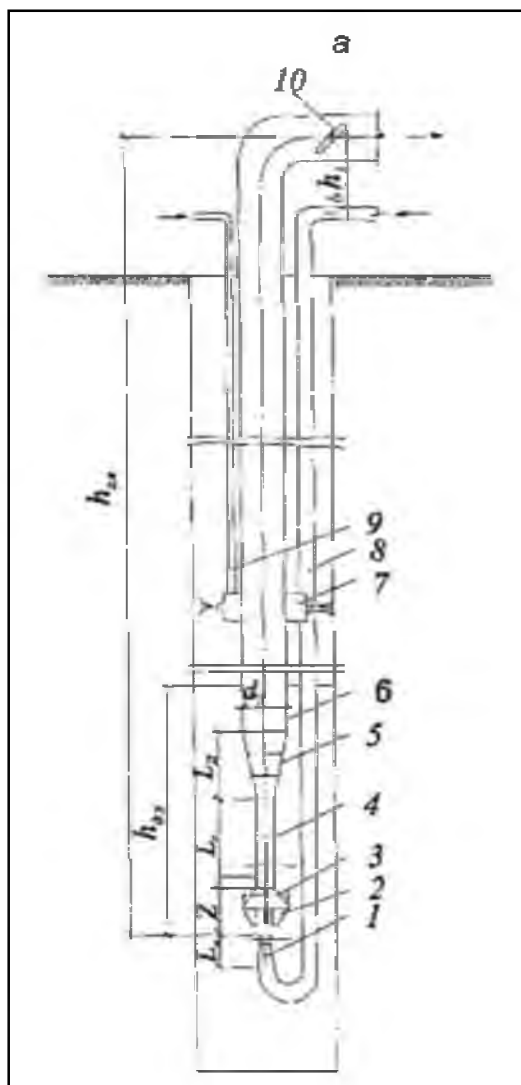


Рисунок 1.4 – Чертёж гидроэлеватора

Вода, подаваемая в насадку (1) гидроэлеватора под давлением, с большой скоростью выходила из неё, увлекая инжестируемую жидкость с частицами грунта, а затем поступала в смесительную камеру (4). Из неё гидросмесь следовала вначале в диффузор (5), а затем в пульповод (6). В основу расчёта гидроэлеватора была положена методика Фридмана Б.Э. [52].

Испытания данной установки они производили на опытной площадке Института мерзлотоведения СО РАН и на территории совхозов Якутского и Ненецкого районов Республики Саха (Якутия), в зоне распространения

многолетнемёрзлых грунтов. Их метод был испытан при сооружении восьми подземных резервуаров. При сооружении резервуаров выдача водно-песковой смеси (пульпы) производилась путём отжатия воздухом.

Основным недостатком этого способа была невозможность создания большего давления сжатого воздуха из-за низкой прочности этих грунтов на разрыв. В связи с этим, сотрудниками ИМЗ СО РАН была разработана технология скважинного метода разработки мёрзлых грунтов, основанная на выдаче водно-песковой смеси гидроагрегатами (гидроэлеватором, эрлифтом) без создания противодействия в разрабатываемой полости.

Использование гидроэлеватора для выдачи разрушенного грунта на поверхность в отличие от способа выдачи водно-песковой смеси отжатием исключала вынужденное прекращение процесса размыва из-за нарушения герметичности полости и обеспечивает простоту технологической схемы, экономичность и возможность достижения больших скоростей сооружения полостей в мёрзлых грунтах [37].

Отличительной чертой всех построенных резервуаров было то, что размыв мёрзлого грунта производился струями воды из насадок оросителя. Разрушенный грунт вместе с водой в виде водно-песковой смеси отсасывался гидроэлеватором и выдавался на поверхность по пульповоду.

Другой способ предусматривает создание подземных резервуаров через скважину при полном заполнении выработки водой в процессе строительства с отбором водно-песковой смеси эрлифтом. Эта технология предусматривает монтаж в скважине гидродобычного снаряда, состоящего из колонн труб для подачи воды, воздуха, теплоносителя (пара) и подъёма гидросмеси песка на поверхность. Так как затопленная струя воды в заполненном резервуаре через 3 метра практически полностью рассеивается, размыв резервуара происходит преимущественно за счёт оттаивания стенок подземного резервуара под воздействием тепловой энергии воды, которая доходит до мёрзлой стенки за

счёт конвективного теплообмена. Данный способ полностью исключает дождевание.

По этой технологии в Якутии, на Мастахском газоконденсатном месторождении, в 1982-1984 годах в песчаных отложениях было построено три подземных резервуара общим объёмом около 10 000 м³ для хранения газового конденсата. Интервал создания резервуаров – 15-85 м. Они создавались с помощью подогретой воды. Подъём оттаявшего грунта осуществлялся вытеснением, за счёт повышения давления в резервуаре. Данный резервуарный парк был создан для хранения дизельного топлива и газового конденсата. В настоящее время два из трёх резервуаров используются по назначению. Средняя производительность оттаивания мёрзлых грунтов составила 6 м³/ч, при расходе оборотной воды 50-60 м³/ч с температурой 7-12°С [22].

Как видно из данных звуколокационной съёмки наибольшее развитие резервуара произошло в нижней его части (рисунок 1.5). Донная часть (20,5-31 м) имеет коническую форму с характерным для песка, находящегося под водой, углом естественного откоса, равным 28°.

В процессе строительства Мастахского парка наблюдения за температурами подаваемой и извлекаемой воды, производительностью насосного оборудования и расходом подаваемого пара носили не систематический характер. Поэтому сопоставлять натурный размыв с какой-либо математической моделью не представляется возможным.

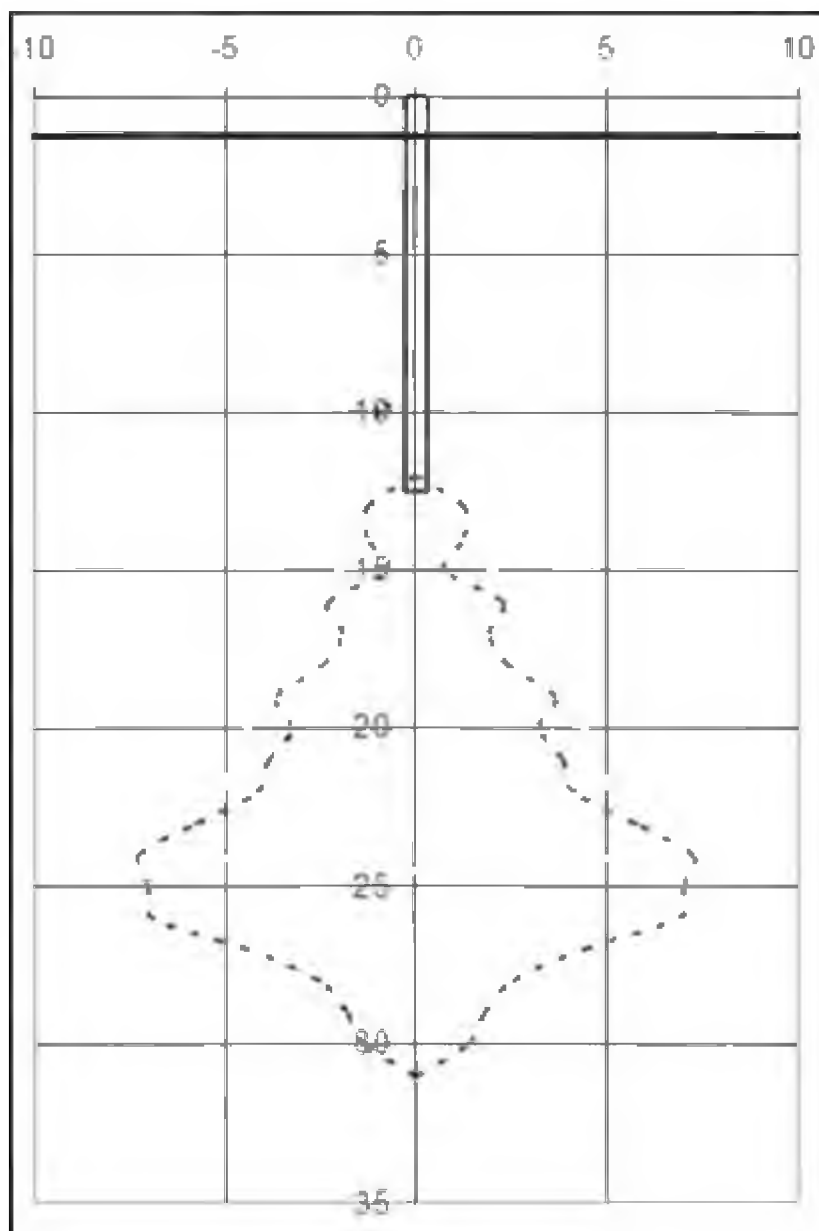


Рисунок 1.5 – Форма подземного резервуара на Мастахском ГКМ по данным звуколокационной съёмки

Также подземные резервуары для хранения газового конденсата были сооружены на Жалтейской (Якутской) нефтебазе и на Мессояхском газовом промысле в районе города Норильска.

В мае 1995 года под руководством Скосаревой Т.В. на территории Бованенковского НГКМ был создан опытный подземный резервуар объёмом около 300 м^3 путём плавления подземных льдов [50]. Формирование устойчивой выработки велось путём подачи пара, откачек воды и изменения

положения перфорированного наконечника паропровода по глубине скважины (рисунки 1.6, 1.7).

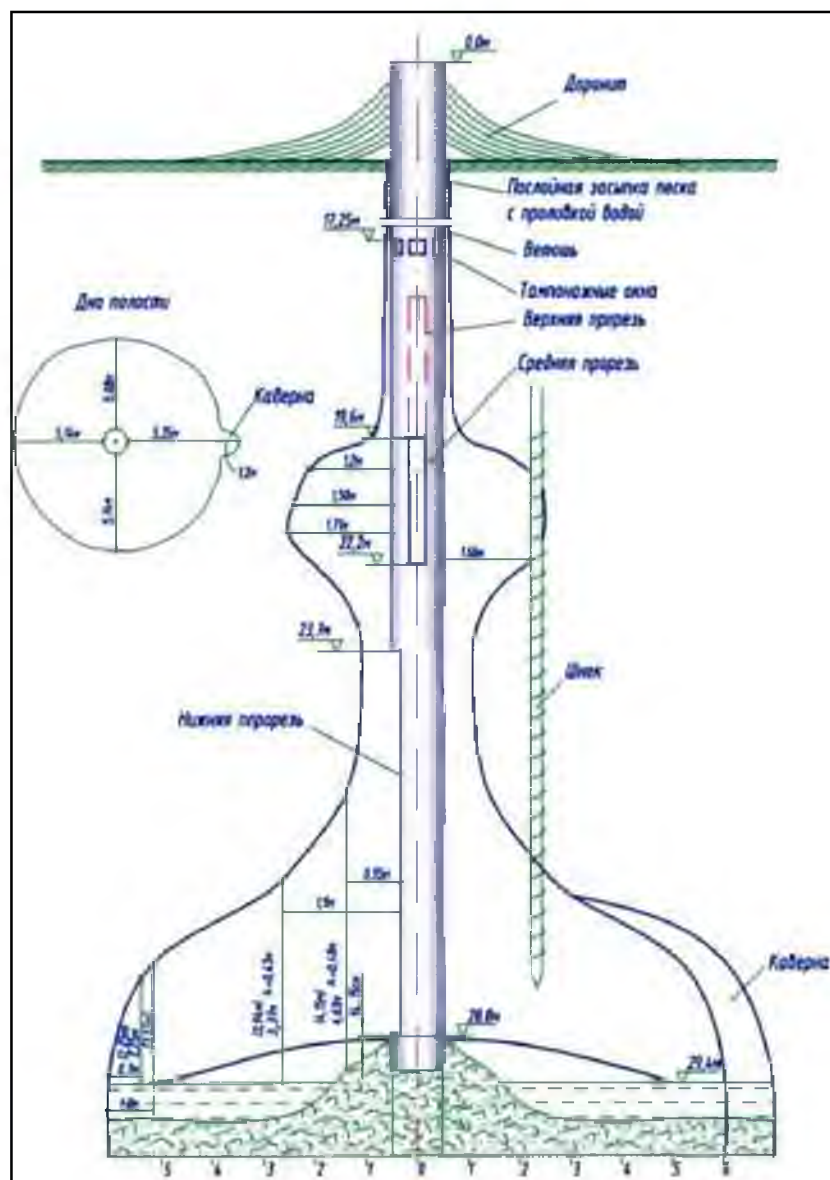


Рисунок 1.6 – Форма сечения экспериментального резервуара, сооружённого в подземном льду



Рисунок 1.7 – Форма боковой поверхности экспериментального подземного резервуара сооруженного в подземном льду

В настоящий момент работы по совершенствованию данной технологии проводятся в ООО «Газпром геотехнологии». В результате была разработана и успешно реализована технология создания подземных резервуаров в отложениях подземного льда, позволяющая круглогодично создавать подземные резервуары. В 2012 году было построено 6 подземных резервуаров в пластовых льдах на глубине 35 метров под отложениями мёрзлых глин и суглинков общим полезным объёмом около 12 000 м³ (рисунок 1.8). Принцип создания подземного резервуара во льду аналогичен созданию в многолетнемёрзлых песках за исключением подъёма оттаявшего грунта на поверхность. Данные резервуары были использованы для захоронения в них отходов бурения.

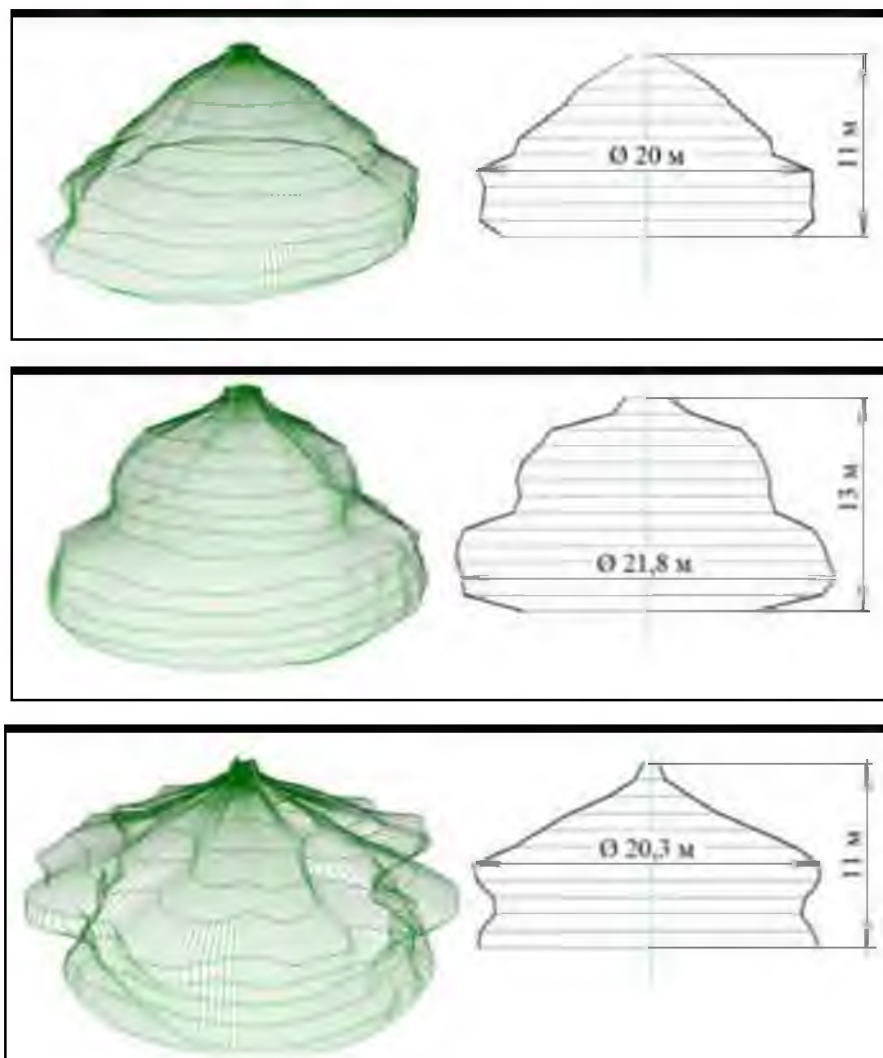


Рисунок 1.8 – Формы подземных резервуаров, созданных в пластовых льдах

Современное опытно-промышленное и промышленное строительство подземных резервуаров в многолетнемёрзлых осадочных породах способом скважинной гидродобычи производится организацией ООО «Газпром геотехнологии». Данная технология, о которой более подробно написано в разделе диссертации 1.4, включает опыт предыдущих лет. Построенные по данной технологии резервуары на Бованенковском НГКМ были использованы для захоронения отходов бурения.

1.3 Сравнение других способов утилизации и ликвидации отходов бурения, преимущества подземного захоронения

В настоящее время экологическая проблема является очень актуальной. Темпы роста промышленности постоянно повышаются, увеличивая выбросы в экосистему. Процесс сооружения скважин сопровождается применением материалов и химических реагентов различной степени экологической опасности. В буровой раствор, который обеспечивает процесс бурения, добавляют самые разные химические реагенты. Одни должны понижать водоотдачу пласта, другие – снизить вязкость раствора, третьи – способствовать термостабилизации. Сюда же добавляются ингибиторы, пеногасители, поглотители сероводорода, стабилизаторы pH. Всё это представляет достаточно опасную для экологии среду [65].

Источники загрязнения при бурении скважин условно можно разделить на постоянные и временные. К первым относятся фильтрация и утечка жидких отходов бурения из шламовых амбаров. Второй группе принадлежат источники временного действия – поглощение бурового раствора при бурении; выбросы пластового флюида на поверхность земли; нарушение герметичности заколонного пространства, приводящее к межпластовым перетокам и заколонным проявлениям; затопление территории буровой вследствие паводка в период половодья или интенсивного таяния снегов и разлив при этом содержимого шламовых амбаров [41].

Наибольшую опасность для природной среды представляют производственно-технологические отходы бурения, которые накапливаются и хранятся непосредственно на территории буровой. Они содержат в своём составе широкий спектр загрязнителей минеральной и органической природы, представленных материалами и химреагентами, используемыми для приготовления буровых растворов [13].

Традиционно применяемые и известные способы захоронения или утилизации буровых отходов: огневое обезвреживание сжиганием на факеле, захоронение в земляных амбарах или открытых карьерах, закачка в глубокие поглощающие горизонты, наземное амбарное хранение, захоронение в специально оборудованном могильнике, капсулирование или отверждение, а также перевод в состояние геля.

Общеизвестным является процесс самоочищения природных экосистем, однако их способность перерабатывать такие объёмы загрязнения не безгранична. Вода рек и озёр Крайнего Севера, по сравнению с водой умеренных и южных широт, слабо насыщена кислородом, органическая жизнь не столь многообразна и обильна. Если в районах средней полосы вода рек может самоочищаться на участках в 100-500 км, то для самоочищения воды в северных условиях часто оказывается недостаточной протяженность реки до 2000 км. Такая низкая эффективность процесса самоочищения рек и озёр в условиях Крайнего Севера ограничивает сброс в водоёмы буровых отходов [19].

При углеводородных загрязнениях почв из них вытесняется кислород, теряется плодородный слой и долго не восстанавливается. Самоочищение почв происходит очень медленно. Строительство амбаров-накопителей практически заключается в выемке некоторого объёма грунта и обваловании полученного котлована. Гидроизоляция дна и стенок данного амбара не производится. При такой конструкции избежать фильтрации жидкой фазы и попадания её в окружающий ландшафт практически невозможно. За счёт адсорбции на поверхности частиц бурового шлама химических реагентов, используемых для обработки буровых растворов, он проявляет ярко выраженные загрязняющие свойства [18].

Один из способов утилизации буровых отходов включает создание котлована в минеральном грунте. После извлечения грунт используется для обвалования котлована и гидроизоляции полости котлована слоем глины. Затем

котлован заполняют отходами бурения. Далее проходит процесс расслоения отходов бурения на загущенную и жидкую фазы.

Воду из жидкой фазы можно удалять путём испарения. После чего загущенные отходы бурения засыпают минеральным грунтом. Следующий способ ликвидации буровых отходов предусматривает сооружение котлованов в минеральном грунте с гидроизоляцией синтетической пленкой, металлическими листами, железобетонными плитами, деревянными щитами с битумным покрытием или композициями на основе глины, извести, цемента. После отвода осветлённой воды и заполнения котлована-отстойника загущенным отстоявшимся осадком его периодически чистят или выключают из работы. Эта система довольно широко применяется в бурении. Однако её нельзя назвать удовлетворительной. Во-первых, потому что она не решает проблемы обезвоживания осадка, во-вторых, потому что непрерывно загрязняет окрестности, прилегающие к котлованам.

В Великобритании предложен метод термического обезвоживания буровых растворов и сточных вод, предусматривающий создание высокопроизводительных бездымных горелок. Фирма Бритиш Петролеум разработала горелки, производительность которых изменяется в широком диапазоне от 150 до 8500 м³/сут. Газа [41].

Аналогичные разработки были предприняты ещё в СССР. В Северном филиале ВНИИСТА была создана установка для переработки буровых растворов с использованием метода распылительной сушки. Для получения теплоносителя использовали природный или сжиженный газ, мазут, дизельное топливо, нефть. Схема состояла из передвижной сушильной камеры распылительного типа и оборудования для очистки раствора. Буровой раствор, поступающий из скважины, последовательно очищали на вибросите и батареях гидроциклонных песко- и илоотделителей [34].

Шлам поступал в ороситель, где его отмывали от глины и химических реагентов в подогретой воде и осаждали под действием сил гравитации на

конусообразное дно, откуда шнеком подавали в бункер для сбора и хранения. Нагрев и подчу воды в ороситель осуществляли за счёт нагнетания вентилятором отработанного теплоносителя и пара, которые постоянно удаляли из распылительной сушильной камеры. В процессе горения топлива образовывались загрязняющие атмосферу сернистые соединения. Поступая в ороситель с отработанным теплоносителем, они взаимодействовали с подогретой жидкостью и образовывали водные сернистые соединения, что предотвращало загрязнение атмосферы.

Данная установка экономически выгодна лишь при нейтрализации отработанных буровых растворов, а не сточных вод. Исследования химической коагуляции показали эффективность данного метода. Они позволили установить активность реагентов коагулянтов в среде буровых сточных вод. Данный способ коагуляции нашёл большое распространение в очистке буровых сточных вод при морском бурении. Институт Гипроморнефтегаз разработал технологию коагуляции буровых сточных вод повышенной минерализации с помощью литиевых и натриевых солей сополимера малеинового ангидрида со стиролом. Подобные исследования проводились и Дальневосточной морской нефтегазоразведочной экспедицией глубокого бурения. Коагулянт в этом случае применяли широко распространённый сульфат алюминия с концентрацией 10%. Полученные результаты характеризуются как довольно эффективные [72].

В США буровые сточные воды тоже нейтрализовали химическими реагентами. В состав очистных сооружений входили ёмкости объёмом 150-320 м³ для смешивания химических реагентов, отстойники и центрифуги. Параметры очищенной жидкости по взвешенным веществам не превышали 50 мг/л, по нефтепродуктам – 15 мг/л, по растворенным веществам – 3 г/л.

В объединении Укрнефть была разработана установка очистки сточных вод, которая прошла испытания на буровых Борисоглебского УБР в режиме очистки буровых сточных вод методом химической коагуляции и покаскадного

отстаивания. В зимних условиях эксплуатации установки необходимы термоизоляция трубопроводов и обогрев помещения ангара. В процессе испытания установки выявили отдельные конструктивные и технологические недоработки: установка недостаточно автономна, что вызывает неудобство при её монтаже в условиях буровых. Шлам, полученный при очистке буровых сточных вод не утилизировался, а вывозился для захоронения. Благодаря отсутствию котлованов-отстойников, применение данной установки позволяло значительно сократить площадь занимаемую буровой и снизить потребность последней в технической воде [41].

Гипроморнефтегазом были проведены исследования по окислению и гидрофобизации шлама. Исследования должны были уменьшить диффузию органических веществ с поверхности шлама. Окислителем служила перекись водорода, концентрация которой составила 15-20%. Время реакции не превышало 2 часа.

Филиалом ВНИИГаза в Коми была разработана и испытана в промышленных условиях установка УОБС-1М, основанная на принципе электрокоагуляции с эффектом тонкослойного отстаивания. Она предназначалась для разделения буровых сточных вод на загущенный осадок и осветлённую воду. Утилизацию остатка в данной установке не предусматривали. Осветлённую воду использовали для водоснабжения буровой и других нужд. Но установка не была лишена нескольких недостатков: вертикальный габарит не позволяет транспортировать её без полного демонтажа; замену отработанного электрода можно производить только при наличии грузоподъёмного устройства; не решена проблема пассивации электродов. Широкого использования в промышленности она не нашла [68].

В США и Канаде были получены хорошие результаты по внесению отработанных буровых растворов в почву. Данный способ заключался в распределении содержимого котлована-отстойника по поверхности земли и механическом перемешивании его с отходами бурения.

Технология такой обработки почв применяется сравнительно недавно, и в США к ней относятся сдержанно. Однако первоначальные результаты, которые были получены в Канаде, дают основание считать её перспективной с точки зрения повышения плодородности полей, при условии, абсолютного отсутствия в составе буровых отходов вредных примесей и элементов, оказывающих отрицательное влияние на качественный состав земель. В условиях Крайнего Севера данная технология неприменима.

Другой широко распространённый метод обезвоживания – фильтрование буровых сточных вод через слой проницаемых грунтов с последующим подсушиванием осадка до 80% влажности. Однако этот способ отделения твёрдой фазы буровых отходов также неприемлем для криолитозоны.

Опыт обезвоживания твёрдых отходов сточных вод методом замораживания-оттаивания, который используется вместе с методом вакуумирования, позволяет снизить влагосодержание твёрдого остатка до 64%. Однако из-за сложности данной технологии этот способ практического использования не нашёл.

В последнее время практическое применение получила кислотная обработка загущенных влажных отходов. В результате добавления кислоты к влажному гидрокислому осадку образуется реакционная смесь, жидкая фаза которой представляет собой раствор регенерированного коагулянта, а твёрдая фаза – нерастворимые органические и минеральные вещества, а также гипс. После разделения фаз раствор регенерированного коагулянта используется для очистки исходной воды, а вторичный кислый шлам подвергается нейтрализации и обезвоживанию. Объём вторичного шлама обычно составляет 8-20% исходного осадка, который также необходимо утилизировать или ликвидировать [41].

На нескольких предприятиях Главтюменнефтегаза по разработанной ВНИИКРНефтью технологии практиковалось подземное захоронение жидких отходов бурения (буровой раствор и буровые сточные воды). Отходы собирают

в амбары. Стоки попадают сначала в шламовый амбар, где оседает значительная часть механических примесей, а затем жидкая часть отходов перетекает в накопительный амбар. В поглощающие пласты закачивают отходы из накопительного амбара. Оставшиеся в котловане твёрдые отходы (буровой шлам и выпавшие в осадок взвеси) засыпают минеральным грунтом при рекультивации площади. Для нагнетания отходов используют поршневой насос с индивидуальным приводом. В поглощающие объекты отходы бурения поступают по насосно-компрессорным трубам. Объекты захоронения отходов бурения вскрывают кумулятивной перфорацией. Данная технология требует значительных капиталовложений.

Технология ReInjection – закачивание буровых отходов в затрубное пространство или в специально пробуренную скважину, закачивание в скважину после завершения буровых работ. Основные условия для применения ReInjection – наличие принимающего пласта, водоупорных пластов над и под принимающим пластом, чтобы предотвратить загрязнение грунтовых вод. Компания "Сахалин Энерджи" установила специальное оборудование для обратной закачки бурового шлама и раствора в пласты. При бурении верхних интервалов скважин сбрасывали только буровой раствор на водной основе. Такой практике следуют нефтедобывающие компании Аляски и Норвегии. Все отходы от бурения и нефтедобычи на Кенайском газовом месторождении (Аляска) компания "Маратон" закачивает под землю. Данная станция была построена в 1995 году. Кроме отходов, поступающих с работающих месторождений, на ней закачивались отходы со старых шламонакопителей и амбаров. В день на этой станции можно закачать до 3000 м³ жидких отходов. Для пластовой воды бурится специальная скважина, в которую закачивают от 50 до 200 м³ в день. Кроме того, пластовая вода закачивается ещё и в эксплуатационные скважины для повышения интенсивности газодобычи месторождения. Следует отметить, что бурение поглощающих скважин

запрещается в зонах санитарной охраны источников хозяйственно-питьевого водоснабжения [41].

Перспективным способом обращения с буровыми отходами можно считать их отверждение с последующим захоронением под слой минерального грунта или использованием в хозяйственной деятельности человека. Глиноподобная отверждённая масса служит как удобрение или как строительный материал. Для отверждения отходов бурения их обрабатывают активирующими добавками.

Отверждение отработанных буровых растворов осуществляют с помощью портландцемента и форполимера (отхода цементной промышленности) проводили во ВНИИКРнефти. Отличительной особенностью форполимера является его селективная способность к отверждению в воде. При взаимодействии с буровым раствором образуется пластичное резиноподобное вещество. Однако оно не обладает достаточной устойчивостью по отношению к воздействию пластовых вод. Расход цемента составил не менее $4/5$ от массы бурового раствора. Недостатком данного способа относят значительный расход минерального вяжущего [63].

Компанией ACS 530 (США) была разработана мобильная система обработки и очистки гряземаслонефтяных отходов MTU 530. Эта установка способна разделять нефтешламы на различные фазы: нефть, воду, твёрдые вещества за счёт центрифугирования нагретого бурового шлама. Вода пригодна для последующей биологической очистки. Отделённая нефть может быть использована в технических целях. Обезвоженный осадок используют для производства строительных материалов. Эта установка применялась в России для устранения последствий аварии нефтепровода в Республике Коми [41].

Все известные технологии переработки буровых шламов в зависимости от методов переработки можно разделить на группы, которые представлены в таблице 1.1 [64].

Таблица 1.1

Классификация технологий переработки бурового шлама по методам переработки

Метод	Основной классификационный признак
1.Термический	Сжигание в открытых амбарах, печах различных типов. Получение битуминозных остатков.
2.Физический	Захоронение в специальных могильниках, разделение в центробежном поле, вакуумное фильтрование и фильтрование под давлением, замораживание.
3.Химический	Экстрагирование с помощью растворителей, отверждение с применением неорганических (цемент, жидкое стекло, глина) и органических (эпоксидные и полистирольные смолы, полиуретаны и другие) добавок, применение коагулянтов и флокулянтов.
4.Физико-механический	Применение специально подобранных реагентов, изменяющих физико-химические свойства, с последующей обработкой на специальном оборудовании.
5.Биологический	Микробиологическое разложение в почве непосредственно в местах хранения, биотремическое разложение.

Все выше представленные способы захоронения или утилизации буровых отходов трудоёмки, не универсальны, требуют больших энергетических и финансовых затрат, связаны с перевозками буровых отходов на значительные расстояния и не гарантируют надежной долговременной защиты окружающей среды и нераспространения вредных компонентов поверхностными водами и ветрами на неопределённо большие расстояния от кустовой площадки.

Использование подземных резервуаров для захоронения отходов бурения позволяет существенно сократить затраты и исключить негативное воздействие на природу Крайнего Севера. Благодаря высоким экранирующим свойствам вмещающих пород, исключается миграция захороненных отходов, а низкая температура массива пород (минус 3,5-6°C) приводит к промерзанию отходов бурения с переходом их в твёрдомёрзлое состояние. Кроме того, данная технология не требует дорогостоящего оборудования и специальных заводов по доведению отходов бурения до необходимого состояния. Создание и эксплуатация таких резервуаров может осуществляться бригадой из 5-15 человек. Всё вышперечисленное доказывает перспективность данной технологии в сравнении с имеющимися технологиями по утилизации и ликвидации отходов бурения.

1.4 Метод скважинной гидродобычи и технология создания подземных резервуаров в многолетнемёрзлых осадочных породах для захоронения отходов бурения

Скважинная гидродобыча является одной из физико-химических технологий, в которой гидравлическая энергия, подводимая через скважины (скважину), используется для разрушения горных пород в призабойной зоне и выдачи (в ряде случаев с воздухом) разрушенного материала на поверхность. Скважинная гидродобыча используется для добычи полезных ископаемых, а также для создания и обустройства подземных резервуаров [3].

Скважинная гидродобыча появилась как альтернатива традиционному открытому и подземному способам разработки месторождений полезных ископаемых. Она использует известные ранее элементы традиционных технологий, такие как бурение скважин, гидроразрушение, самотёчный и напорный гидротранспорт, управление горным давлением, средства и способы контроля и регулирования. При этом, в связи со специфическими особенностями скважинной гидродобычи, возникает новое качество –

дистанционность выемки твёрдого полезного ископаемого, которая исключает присутствие человека на месте горных работ, обеспечивая тем самым высокий уровень безопасности и комфортности труда.

Другими преимуществами скважинной гидродобычи являются: более низкие по сравнению с альтернативными способами добычи капитальные вложения при отработке глубокозалегающих пластов, их быстрая окупаемость, возможность применения мобильного и автономного скважинного гидродобычного комплекса, использование серийного технологического оборудования (буровые станки, насосы, компрессоры).

При освоении нефтегазоконденсатных месторождений Крайнего Севера скважинная гидротехнология позволяет добывать строительный материал – песок и гравий, создавать подземные резервуары в многолетнемёрзлых песчаных осадочных породах и в отложениях подземного льда. Основными направлениями использования данной технологии в районах газонефтедобычи являются:

- создание подземных хранилищ дизельного топлива, газового конденсата, сжиженных углеводородных газов, нефти;
- создание подземных резервуаров для захоронения промышленных отходов, образующихся при освоении и эксплуатации нефтегазоконденсатных месторождений;
- добыча песка и гравия для строительства оснований промышленных площадок и дорог, а так же производства бетона;
- создание ёмкостей для аварийного запаса воды и сепараторов, используемых при капитальном ремонте скважин [56].

В 2007 году специалистами ООО «Газпром геотехнологии» был предложен способ захоронения отходов бурения в подземных резервуарах создаваемых в непроницаемых многолетнемёрзлых песчаных породах. Данная технология включает в себя исследовательский и экспериментальный опыт предыдущих лет.

Строительство подземных резервуаров можно проводить в любых мёрзлых осадочных породах, но за счёт низкой сопротивляемости размыву, более предпочтительны в качестве среды для создания подземных резервуаров являются многолетнемёрзлые песчаные породы. Благодаря их высокой льдистости, фильтрация хранимого продукта в массив практически исключена [38]. В глинистых породах строительство более энергозатратно. Сроки создания подземных резервуаров в многолетнемёрзлых суглинках превышают сроки создания в многолетнемёрзлых песчаных отложениях почти вдвое [12, 37].

Технологическая схема сооружения подземного резервуара в многолетнемёрзлых осадочных породах показана на рисунке 1.9. В её состав входят: скважинный снаряд с платформой управления (1); передвижная парогенераторная установка (2); компрессор (3); обезвоживатель гидросмеси песка с насосом оборотной воды (4); временный склад песка (5); бульдозер (6); автоцистерна (7); ёмкость для воды (8) с подпиточным насосом (9); дизельная электростанция (10) и ёмкость для дизтоплива (11) (рисунок 1.9).

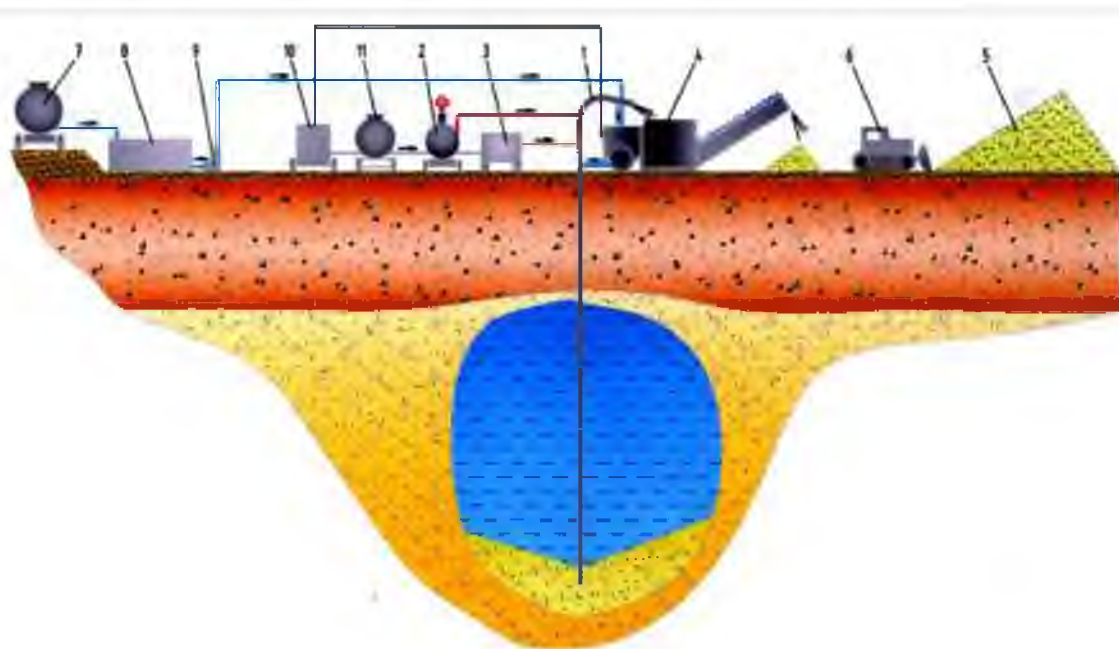


Рисунок 1.9 – Технологическая схема сооружения подземного резервуара в многолетнемёрзлых осадочных породах

Перед началом намыва подземного резервуара бурят скважину с отбором керна до подошвы песчаного пласта. По результатам бурения производят

подробное описание геологического разреза с указанием мощности прослоев песка, супеси, суглинка, льда, растительных включений, выхода керна, наличия водопритока в скважину и газопроявлений. По этим данным принимают решение о возможности создания подземного резервуара. При положительном решении в скважину монтируется скважинный гидродобычный снаряд, который состоит из колонн труб для подачи оборотной воды, воздуха и подъёма гидросмеси песка (пульпы) на поверхность с помощью эрлифта [57].

Теплоноситель (пар) от парогенераторной установки (2) подают в водоподающую колонну труб скважинного гидродобычного снаряда (1). В результате теплообмена с мёрзлыми породами происходит оттаивание и разрушение отложений многолетнемёрзлых пород. Оттаявший грунт опускается на дно образующегося подземного резервуара. Вода, подаваемая в нижнюю часть скважинного снаряда (1) от насоса оборотной воды обезвоживателя (4), взвешивает оседающий на дне резервуара песок, который поднимают в виде гидросмеси на поверхность. Подъём гидросмеси песка (пульпы) осуществляют с помощью эрлифта. Для этого в скважинный гидродобычный снаряд подают сжатый воздух от компрессора (3). Поднятую скважинным снарядом гидросмесь песка направляют в обезвоживатель (4), в котором производят отделение песка от жидкой фазы гидросмеси. Жидкую фазу насосом оборотной воды направляют в скважинный снаряд, а песок конвейером обезвоживателя выгружают на поверхность полигона и с помощью бульдозера (6) размещают на складе песка (5). Для поддержания заданного уровня воды в подземном резервуаре при выемке песка производят её подкачку в бункер обезвоживателя (4) насосом оборотной воды (9). Подачу воды из ёмкости (8) осуществляют с помощью электронасоса с расходом, равным производительности комплекса по извлекаемому из резервуара песку.

В летний период возможна схема строительства без использования обезвоживателя. Роль очистки гидросмеси от грунта выполняет карта намыва. Проходя по ней, твёрдые частицы водно-песковой смеси оседают на дно, и к

водозабору насоса подходит достаточно чистая для её дальнейшего использования вода.

Обустройство скважины на период размыва резервуара в многолетнемёрзлых песчаных отложениях показано на рисунке 1.10.

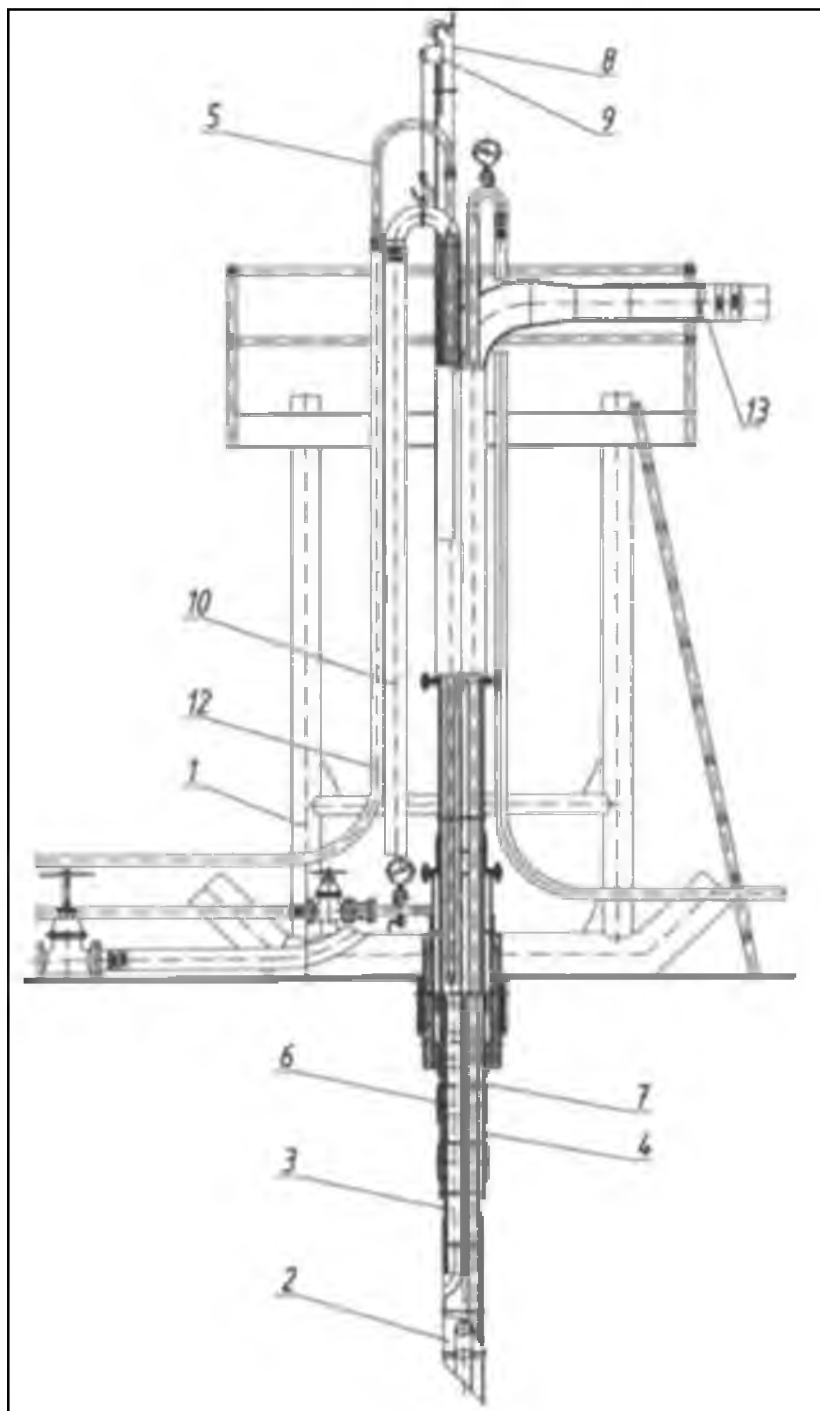


Рисунок 1.10 – Эрлифтный снаряд: 1 – монтажная платформа; 2 – хвостовик; 3 – колонна водоподающая; 4 - колонна воздухоподающая; 5 – колонна

пароподающая; 6 – трубы полиэтиленовые; 7 – колонна пульпоподъёмная;
8 – рама монтажная; 9 – цепной подъёмник; 10 – водоподающий рукав;
11 – воздухоподающий рукав; 12 - пароподающий рукав

Для предотвращения растепления мёрзлых грунтов вокруг скважины в процессе строительства подземных резервуаров скважину оборудуют двойной обсадной колонной, состоящей из внешней колонны и внутренней колонны, башмак которой устанавливают на глубине залегания кровли песчаного пласта или принятого регламентом размыва уровне дна подземного резервуара.

Скважинный снаряд (2) состоит из хвостовика, соединённого с двумя колоннами труб, одна из которых является водоподающей (3), а вторая служит для подачи сжатого воздуха (4). Для подачи в скважину пара внутри водоподающей колонны размещена пароподающая колонна труб (5). Внутри водоподающей колонны ниже пароподающей трубы установлены полиэтиленовые трубы для минимизации тепловых потерь (6). По пульпоподъёмной трубе (7) осуществляется подъём гидросмеси оттаявшего грунта с водой на поверхность.

В заполненном водой подземном резервуаре разрушение мёрзлых пород происходит за счёт оттаивания, размокания мёрзлых пород и выноса оттаявших частиц. Ввиду того, что в заполненной водой полости, при радиусе выработки более 2-3 м, разрушительное действие водной струи практически неощутимо [2], развитие формы резервуара идет за счёт теплового воздействия на мёрзлые породы. Тепло, подаваемое в резервуар с водой и паром, доставляется до мёрзлой стенки за счёт конвективного теплообмена. Мёрзлые породы на контуре подземного резервуара оттаивают и, при достижении талого слоя некоторой величины, отрываются от вертикальной стенки, и оседают на дне резервуара с образованием угла естественного откоса. Для песчаных грунтов мощность талой зоны может составлять несколько миллиметров, глинистые грунты могут образовывать талый слой от нескольких миллиметров до 5 см и отделяться от вертикальной стенки в результате размокания [44].

Создание подземного резервуара производят с последовательным подъёмом уровня воды снизу вверх (ступенчатый подъём), что позволяет сформировать свод устойчивого равновесия в его кровле, а также минимизировать накопление метана в случае его присутствия в массиве.

Динамика прироста объёма подземного резервуара определяется по формуле:

$$V_n = \frac{V_s \cdot w}{100 + w} \quad (1)$$

где: V_s – объём поданной воды за необходимый интервал времени (м^3);
 w - объёмное содержание грунта в гидросмеси (%).

В процессе создания подземного резервуара и по окончании работ производят его обследование для определения фактических размеров, формы и герметичности. С помощью звуколокационной съёмки определяется форма и объём подземного резервуара с точностью $\pm 10\%$.

После проведения обследования из резервуара откачивают воду и производят загрузку в него отходов бурения. После этого подземный резервуар консервируют и ликвидируют. В обсадной колонне устанавливают цементный мост на глубину 8 м от поверхности, а обсадные колонны на устье скважины обрезают на глубине 1 м от поверхности отсыпки. После затвердевания бетона устье скважины засыпают грунтом, производят рекультивацию и устанавливают стальной репер.

На рисунке 1.11 показан общий вид площадки строительства с изображением трех основных этапов:

- I) бурение скважины и монтаж скважинного гидродобычного снаряда;
- II) создание подземного резервуара;
- III) заполнение подземного резервуара отходами бурения с последующей ликвидацией.



Рисунок 1.11 – Изображение этапов создания подземных резервуаров в многолетнемёрзлых породах: 1 – буровая установка; 2 – технологическая скважина; 3 – скважинный гидродобычный снаряд; 4 – подземный резервуар; 5 – установка по обезвоживанию гидросмеси; 6 – бульдозер; 7 – временный склад песка; 8 – парогенераторная установка; 9 – компрессорная станция; 10 - ёмкость для воды; 11 – мобильное здание; 12 – автобетоносмеситель; 13 - подземный резервуар с буровыми отходами

Объём подземного резервуара, который можно создать в определённых геологических условиях, определяется исходя из мощности вмещающего мёрзлого песчаного пласта, физико-механических свойств этого пласта, а также свойств покрывающих и подстилающих пород. Глубина кровли подземного резервуара должна быть ниже глубины нулевых годовых амплитуд, которая составляет в среднем по территории Ямала 3-3,5 м [21]. Данная мощность покрывающих пород обеспечивает необходимую герметичность скважины и

устойчивость свода кровли подземного резервуара. Из опыта работ по скважинной гидродобыче при глубине отработки мёрзлых дисперсных грунтов более 100-120 м образование провалов на поверхности не зафиксировано [4, 5, 6]. Выбранные интервалы строительства и форма подземного резервуара в данных геологических условиях должны обеспечивать его устойчивость в период эксплуатации.

С точки зрения геокриологических условий, оптимальной вмещающей породой для подземных резервуаров являются многолетнемёрзлые песчаные отложения с температурой не выше минус 3 °С. Учитывая геотермический градиент для равнинных участков, составляющий около 2,5-3,0 °С на 100 м, на Ямальском полуострове максимальная глубина заложения выработок составляет 100-120 м, в Якутии – до 250 м [53].

Подземные резервуары достаточно герметичны и не допускают миграции хранимого продукта, так как пылеватые песчаные и глинистые многолетнемёрзлые грунты, в которых они строятся, практически не фильтруют жидкости и газы при температуре ниже минус 4 °С (температура грунтов в интервале строительства подземных резервуаров).

Экологическая безопасность подземного захоронения обеспечивается: за счёт непроницаемости мёрзлых пород; достаточной мощности покрывающих пород (15 м от земной поверхности), исключаяющей контакт отходов бурения с окружающей средой; незначительной площади нарушаемых земель. В процессе создания резервуаров ведётся геотехнический и экологический мониторинг.

Данная технология успешно применялась при строительстве подземных резервуаров на Бованенковском месторождении полуострова Ямал. Однако к настоящему моменту не было разработано методики определения параметров создания подземных резервуаров и прогнозирования их развития, которая учитывала бы неоднородность мёрзлых пород и изменяющуюся в процессе строительства температурную стратификацию воды в резервуаре.

1.5 Обзор существующих методик определения параметров создания подземных резервуаров в многолетнемёрзлых породах и прогнозирования их развития

В результате анализа опубликованных работ в области сооружения подземных резервуаров в многолетнемёрзлых породах способом скважинной гидродобычи можно сделать вывод, что до сих пор не исследованными остаются вопросы, связанные с механизмом развития резервуара при оттаивании мёрзлых пород. Результаты существующих методик дают лишь приближенные значения объёма оттаявшего грунта при подаче теплоносителя и достаточно грубую расчётную форму проектируемого резервуара. Разработкой методик определения параметров создания подземных резервуаров и прогнозирования развития их формы занимались Смирнов В.И, Казарян В.А., Хрулёв А.С., Сильвестров Л.К., Теплов М.К., Скосарева Т.В., Штилькин С.Т. и другие.

Создание первых подземных резервуаров в криолитозоне производилось с постоянным контролем образующейся формы путём периодического откачивания воды. Количество подаваемого теплоносителя и уровень воды на каждом следующем этапе определялись в зависимости от формы резервуара, сформировавшегося на предыдущем этапе.

Для промышленных нужд данный способ непригоден, ввиду того, что он не позволяет на этапе проектирования определять технологические параметры создания будущего подземного резервуара и прогнозировать развитие его геометрии. Сроки строительства таких резервуаров также были весьма приближёнными.

Методика расчёта параметров выемки мощных погребённых россыпей способом скважинной гидродобычи, предложенная А. С. Хрулёвым, позволяет, зная льдистость, гранулометрический состав, температуру мёрзлых грунтов, а также расход и температуру подаваемой в скважину подогретой воды,

используя уравнение теплового баланса, а также некоторые эмпирические зависимости, определять среднюю производительность оттаивания и разрушения мёрзлого грунта и время развития резервуара. Для расчёта использовались средняя льдистость и гранулометрический состав массива. Данная методика позволяет определить лишь максимальный радиус резервуара при максимальной производительности, допуская, что боковая поверхность подземного резервуара по всей его высоте разрушается равномерно. Определить форму будущего подземного резервуара данная методика не позволяет.

Сейчас для определения технологических параметров создания подземных резервуаров используется программа для расчёта их развития в солях (RZ Version 2.1), адаптированная для решения задачи прогнозирования развития подземных резервуаров в многолетнемёрзлых грунтах. Исходными данными данной программы являются: расход подаваемой воды, изменение уровня воды в резервуаре. Данная программа также оказалась мало пригодной ввиду выявленных значительных отличий процесса оттаивания и разрушения стенок подземного резервуара в многолетнемёрзлых грунтах от процесса растворения соли при создании подземных резервуаров в соляном массиве. Данная программа не позволяет учитывать отличия в свойствах пород по высоте резервуара и изменение температурной стратификации воды по высоте подземного резервуара.

Вышеперечисленное свидетельствует о необходимости разработки новой методики определения параметров создания скважинных подземных резервуаров в песчано-глинистых многолетнемёрзлых породах. Данная методика будет учитывать природные и технологические факторы, отличия свойств массива по высоте, особенности процесса разрушения мёрзлых песчано-глинистых пород в воде, а также изменение распределения температуры воды в подземном резервуаре по вертикали в процессе его создания.

1.6 Опыт и проблемы создания подземных резервуаров

Проведённые фирмой ООО «Газпром геотехнологии» опытно-промышленные испытания на Бованенковском месторождении показали хорошие результаты по применению разработанной технологии. Были испытаны различные режимы и схемы работы оборудования, сформирована база параметров размыва, а также необходимых условий заложения подземных резервуаров.

Для захоронения отходов бурения в 2006 году на Бованенковском месторождении полуострова Ямал был построен опытный подземный резервуар объёмом 4131 м³ (рисунок 1.12). Интервал строительства соответствовал глубине заложения песчаного пласта – 29-60 м.

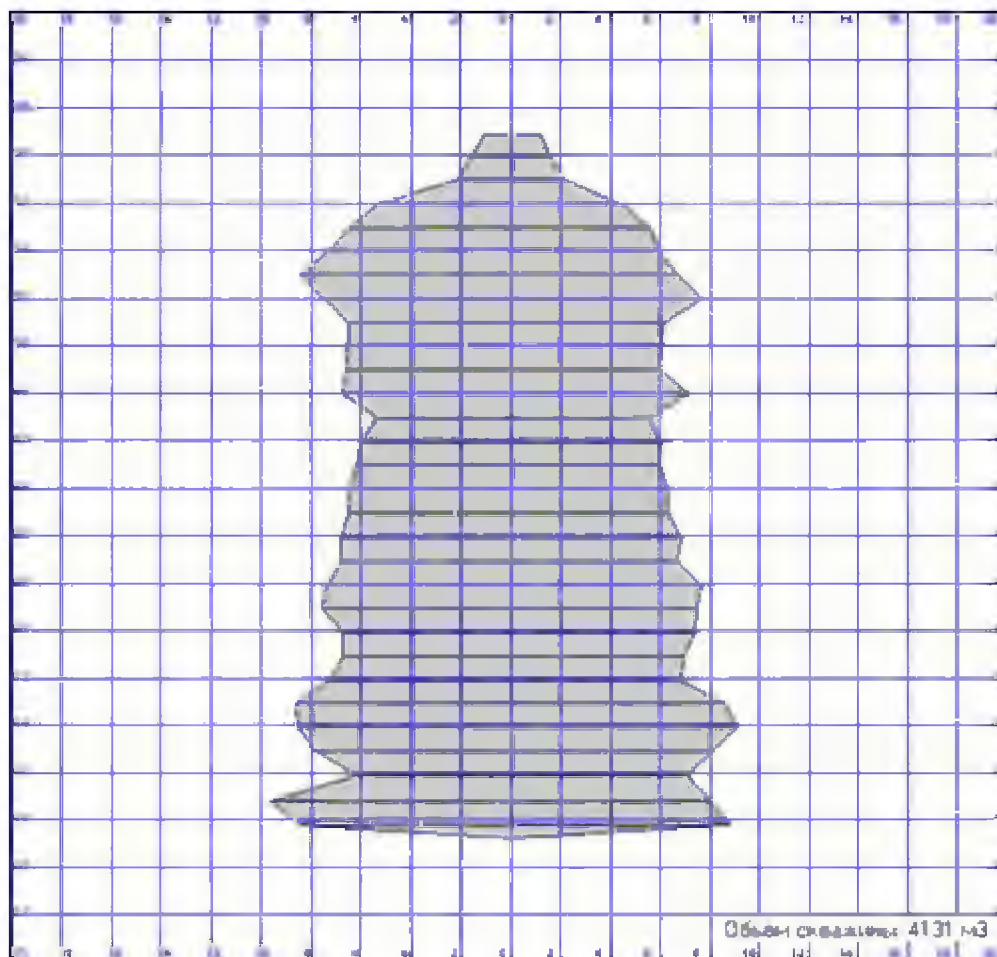


Рисунок 1.12 – Изображение вертикального сечения опытного подземного резервуара на Бованенковском НГКМ объёмом 4131 м³

В 2008 году на кусте газовых скважин Бованенковского НГКМ в мёрзлых песчаных отложениях был построен подземный резервуар объёмом 4860 м³ (рисунок 1.13). После строительства он был заполнен отходами бурения и ликвидирован.

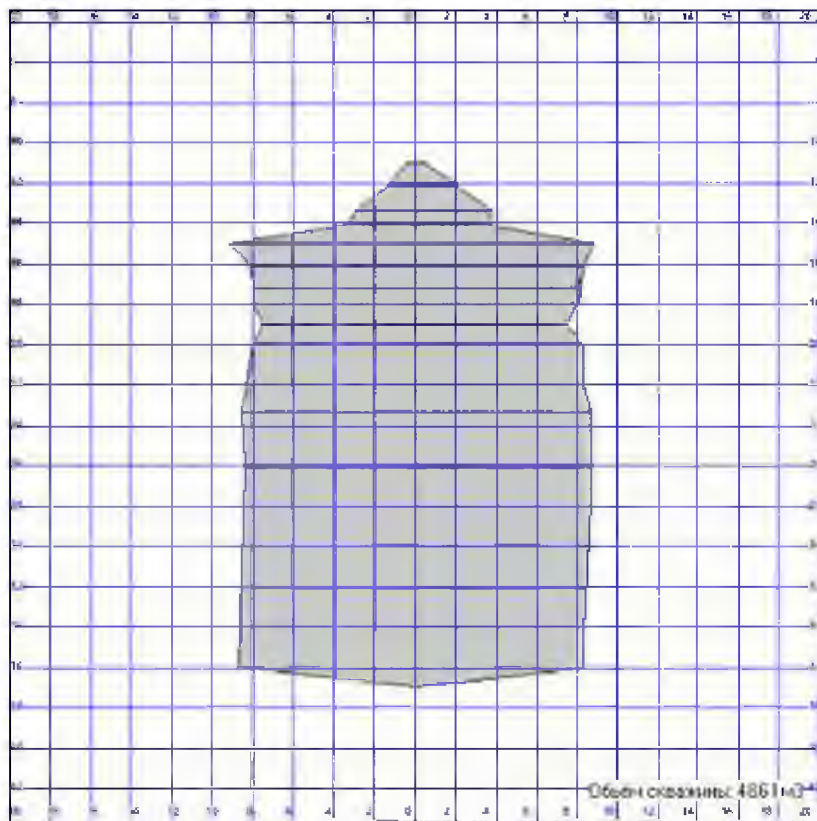


Рисунок 1.13 – Изображение вертикального сечения опытного подземного резервуара на Бованенковском НГКМ

Получив положительный результат, ООО «Газпром геотехнологии» продолжило работы по усовершенствованию оборудования, средств контроля и управления процессом ведения работ и, к настоящему моменту, обладает несколькими патентами на изобретения (RU 2422347 C1 – «Способ подземного захоронения буровых отходов в многолетнемёрзлых породах»; RU 2299986 C1 – «Способ скважинной гидродобычи полезных ископаемых»; RU 2327624 C1 – «Способ создания подземного резервуара в мёрзлых породах»; RU 2413843 C1 – «Способ создания подземного резервуара в многолетнемёрзлых осадочных породах»; RU 2141442 C1 – «Способ сооружения подземного резервуара в грунте»; RU 2413844 C1 – «Устройство

для создания подземного резервуара в многолетнемёрзлых осадочных породах»).

В 2011-2013 годах на Бованенковском месторождении было построено более 30 промышленных подземных резервуаров общим объёмом около 60 тыс. м³. Единичный объём резервуаров составил 2000-5000 м³. Они были построены на кустовых площадках эксплуатационных газовых скважин (рисунок 1.14). К настоящему времени эти резервуары заполнены отходами бурения и ликвидированы.



Рисунок 1.14 – Площадка подземных резервуаров, примыкающая к кусту газовых скважин

В процессе их создания была накоплена большая статистическая база, которая показала, что результаты прогнозирования формы проектируемых подземных резервуаров обладают плохой сходимостью с формами построенных резервуаров. На рисунке 1.15 показано наложение контуров подземных резервуаров, полученных в результате расчёта с помощью программы применяемой в настоящее время – RZ Version 2.1, на контуры, полученные в результате звуколокационной съёмки построенных резервуаров.

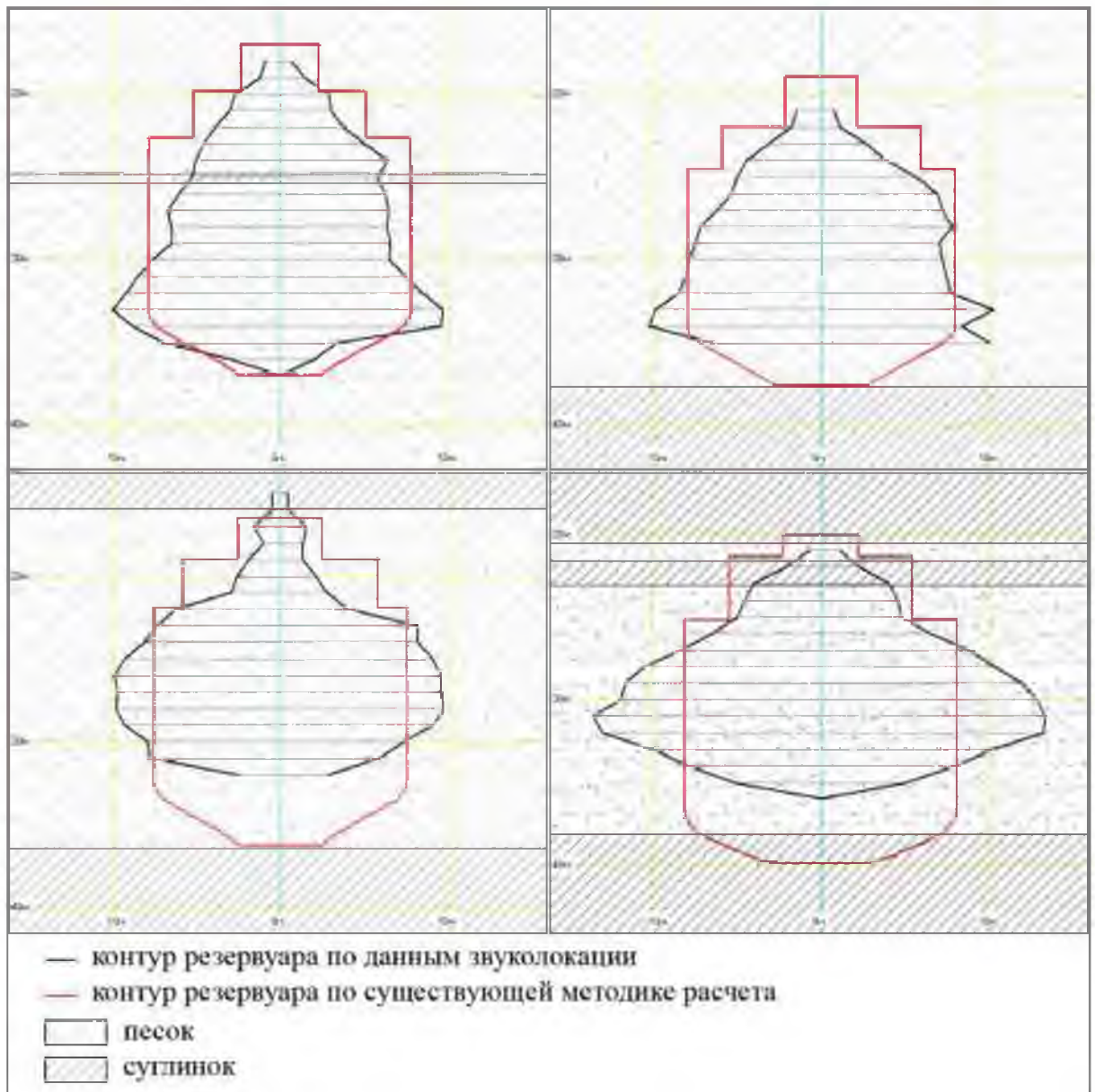


Рисунок 1.15 – Расчётные проектные контуры и контуры построенных подземных резервуаров

Программа, по которой велся расчёт, создавалась для прогнозирования развития резервуара в соляном массиве способом скважинной гидродобычи. Данная программа (RZ Version 2.1) была адаптирована под создание резервуаров в мёрзлых грунтах.

Из сравнения контуров построенных резервуаров и их расчётных форм можно сделать вывод, что расчётные параметры создания резервуаров не позволили достичь необходимой формы. У большинства резервуаров радиус в кровле меньше запроектированного, а пролёт выработки в нижней части

наоборот превысил проектные значения. Это связано с некорректным расчётом времени поддержания уровня воды в резервуаре на определённых глубинах. При создании нескольких резервуаров неправильное определение параметров их создания спровоцировало вывалы мёрзлой породы и просадку земной поверхности. Вследствие вывалов, происходил подъём дна подземного резервуара, что приводило к уменьшению полезного объёма. Объём построенных подземных резервуаров оказался в среднем на 27% меньше проектного объёма. Неправильный расчёт формы и параметров создания подземных резервуаров может привести к потере устойчивости и их обрушению.

Систематичность плохой проработки кровли и образование запредельных радиусов в нижней и центральной частях подземных резервуаров говорят о несовершенстве существующей методики. Расхождение прогнозируемой формы от формы построенных резервуаров объясняется существенными отличиями процесса оттаивания поверхности мёрзлых осадочных пород под воздействием тёплой воды от процесса растворения соли под воздействием пресной воды, для расчёта которого создавалась используемая программа.

Основные наблюдения в различии расчётов и полученной формы подземных резервуаров заключаются в следующем:

- скорость оттаивания и разрушения горизонтальной стенки на порядок ниже расчётной, а скорость вертикальной наоборот выше;
- расчёт показывает равномерное разрушение стенки резервуара по всей его высоте, чего не наблюдается на практике; нижняя часть подземных резервуаров развивается активнее верхней;
- применяемая программа не учитывает различие свойств мёрзлых грунтов по высоте скважины;
- применяемая программа не учитывает распределение температуры воды по высоте резервуара и влияние этого распределения на скорость разрушения мёрзлых грунтов в воде.

Для правильного расчёта параметров создания подземных резервуаров и прогнозирования его развития в многолетнемёрзлых песчано-глинистых породах под воздействием тепловой энергии воды необходим принципиально новый подход, который бы учитывал влияние природных и технологических факторов, особенности разрушения этих пород при тепловом воздействии воды, заполняющей подземный резервуар, а также распределение её температуры.

1.7 Обзор исследований влияния природных и технологических факторов на размываемость мёрзлых песчано-глинистых пород

Для повышения эффективности строительства подземных резервуаров необходимо определить особенности и закономерности процессов, происходящих в заполненных водой резервуарах в процессе их создания. Сроки создания подземных резервуаров и развитие их формы зависят от размываемости тех пород, в которых производится строительство. Факторы, влияющие на размываемость мёрзлых грунтов и на процесс развития подземных резервуаров, можно разделить на две группы: природные и технологические. Тогда как на вторую группу факторов можно непосредственно влиять в процессе создания подземного резервуара, первая группа представляет собой комплекс многочисленных свойств мёрзлых грунтов, влияние которых необходимо учитывать. Различия в свойствах грунтов по высоте могут значительно повлиять на развитие формы подземного резервуара (рисунок 1.16).

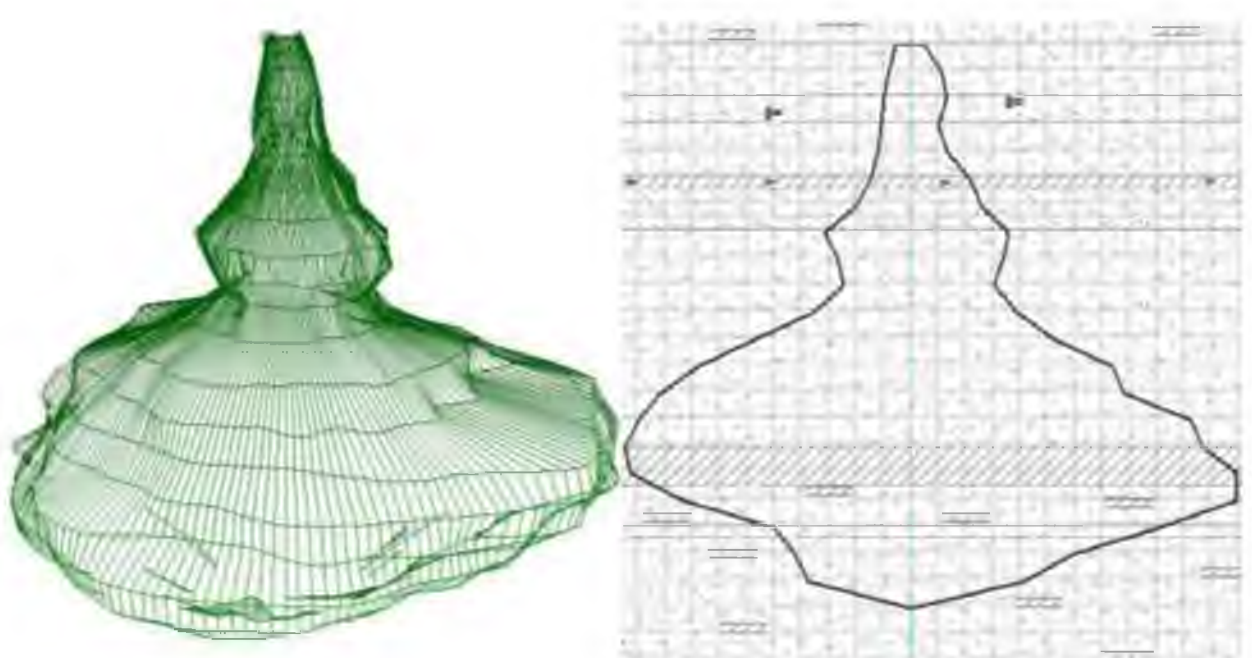


Рисунок 1.16 – Форма подземного резервуара

Под размываемостью мёрзлых дисперсных пород понимают их способность разрушаться с отрывом частиц и агрегатов от массива горных пород в результате одновременного теплового и механического воздействия воды. В данной технологии при разрушении мёрзлых грунтов доля механического воздействия практически несущественна ввиду того, что расход подаваемой воды по сравнению с общим сечением подземного резервуара значительно меньше.

К основным природным факторам, влияющим на развитие подземного резервуара, относятся: льдистость, гранулометрический состав и температура грунта, содержание глинистых частиц, текстура грунта, количество незамёрзшей воды, засоленность, температура грунта, размокаемость.

Влияние льдистости и количества незамёрзшей воды в мёрзлых песчано-глинистых породах на их размываемость

Основным природным фактором, определяющим тепловые затраты на разрушение мёрзлых дисперсных грунтов, является их льдистость. Среднее значение суммарной льдистости песчаных отложений по территории Бованенковского НГКМ варьируется от 0,23 до 0,44, среднее значение

суммарной льдистости суглинков – от 0,16 до 0,49, глины – от 0,16 до 0,33, супеси – от 0,19 до 0,46. Также встречаются зоны, в которых лёд из-за низкого содержания не является цементирующим материалом. Наряду с этим, встречаются пласты, в которых объёмное содержание льда превышает поровый объём скелета грунта. В этом случае экранирующие свойства мёрзлых грунтов достаточны для хранения жидких продуктов, однако, длительная прочность данных пластов оказывается ниже из-за отсутствия сцепления между песчаными частицами.

Влияние влажности и льдистости на интенсивность размыва суглинков и супесей отражено в работе Самышина В.К. [46]. Из его работ следует, что скорость разрушения супеси в воде максимальна при влажности 15% и минимальна при влажности 25 %.

В своих исследованиях Рочев В.Ф. оценил зависимость интенсивности размываемости от льдистости.

Подготовку образцов песчано-глинистых горных пород и проведение экспериментов он производил по методике, разработанной на кафедре мерзлотоведения МГУ. Глину смешивали с песком в различных пропорциях. Добавляли воду, для получения определённой влажности породы. Полученную грунтовую массу помещали в специальные кубические пластмассовые формы. Экспериментальная установка (рисунок 1.17) состояла из металлического сосуда ёмкостью 10 литров (1), заполненного водной средой требуемой температуры. Поддержание постоянного температурного режима достигалось с помощью теплоизоляции из поролона (2). Образцы (7) замораживали до температуры минус 17°C, а затем выдерживали не менее суток при температуре минус 3°C в морозильной камере [43].

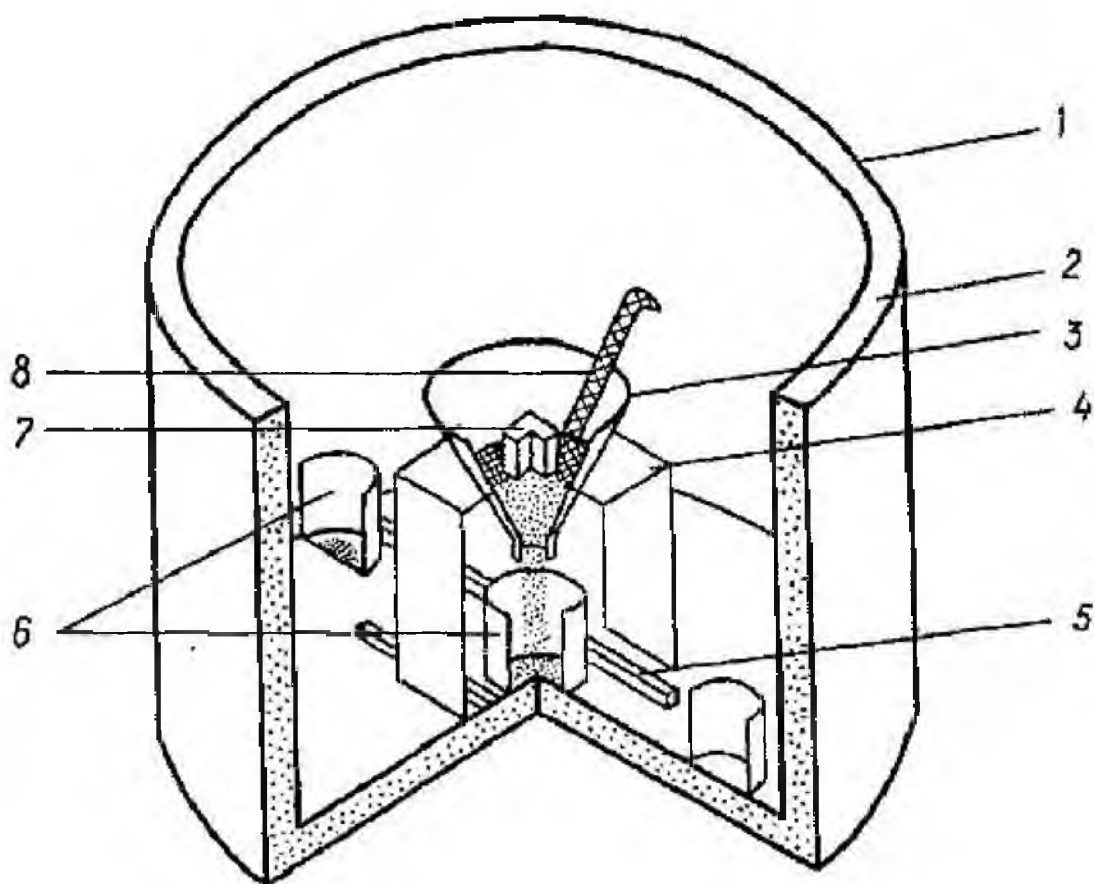


Рисунок 1.17 – Экспериментальная установка

В ходе экспериментов образец мёрзлой горной породы погружался в водную среду на металлическую сетку (8), которая фиксировалась в горизонтальном положении на подставке (4). Отделившиеся от образца частицы породы собирались с помощью воронки (3) в бюксе (6). Через каждые 30 секунд бюкса с отделившимися частицами горной породы замещалась на порожнюю по направляющим (5). Когда эксперимент прекращался, бюксы с отделившимися частицами породы извлекались из установки, вода сливалась, а осадок выпаривался при температуре 105°C для определения сухой массы осыпавшейся породы.

В качестве основного показателя разрушения горной породы принимался «удельный показатель разрушения» – масса осыпавшихся частиц породы с 1 м^2 поверхности образца породы за секунду q ($\text{кг}/\text{м}^2\cdot\text{с}$).

Выполненные экспериментальные исследования позволили установить закономерность интенсивности разрушения мёрзлых песчано-глинистых пород в воде в зависимости от льдистости (рисунок 1.18).

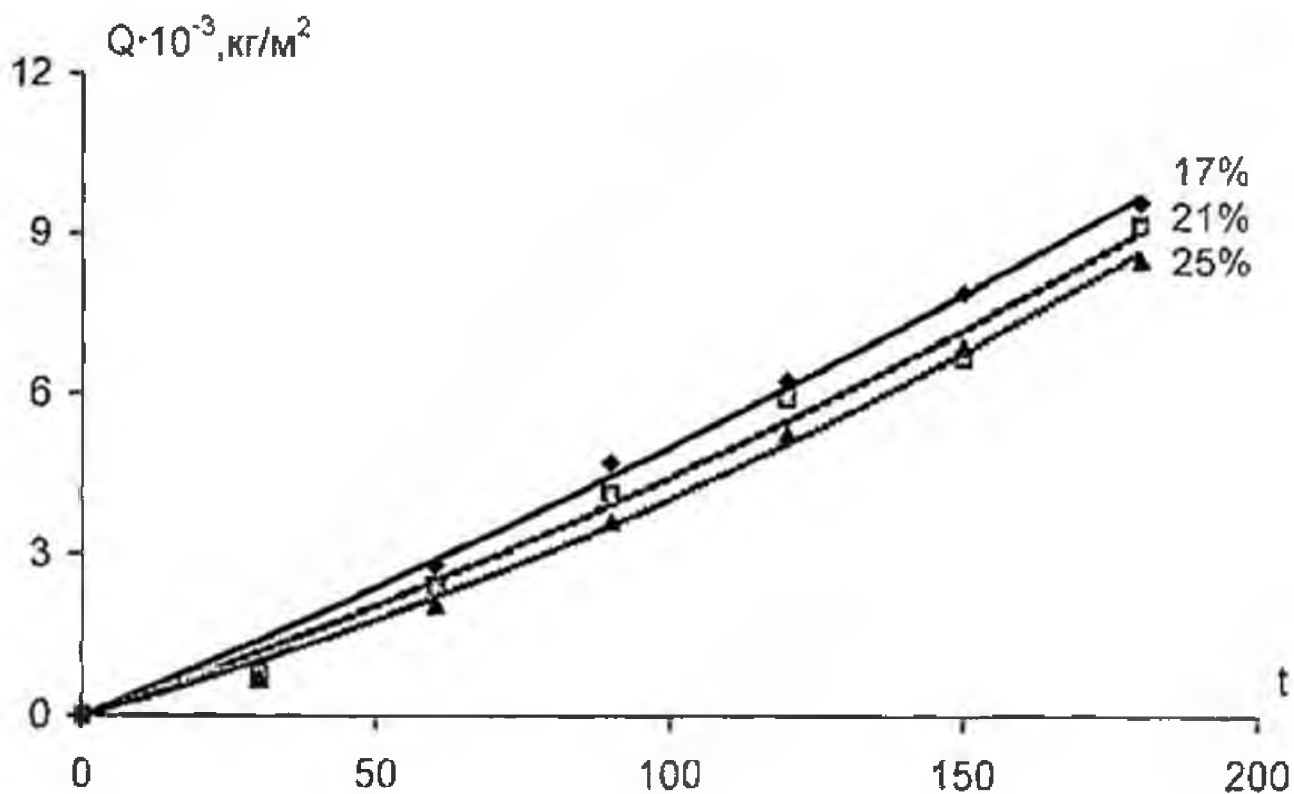


Рисунок 1.18 – Зависимость массы осыпавшихся частиц мёрзлой песчано-глинистой породы от времени нахождения в воде, при различной льдистости (%): $T_{в} = 10^0 \text{ C}$, $j = 10\%$, $T_{обр.} = -3^0 \text{ C}$.

При увеличении льдистости в мёрзлой породе интенсивность разрушения уменьшается, что связано с большими затратами энергии на плавление льда.

Также на тепловые затраты разрушения мёрзлого грунта в воде влияет количество незамёрзшей воды. Из принципа равновесного состояния [62] следует, что количество незамёрзшей воды в мёрзлых грунтах данной разновидности определяется в основном температурой. Так при понижении её от минус 0,5 до минус 4,5°C, содержание незамёрзшей воды уменьшается в песках от 0,002 до 0, в супеси – от 0,05 до 0,04, в суглинке – от 0,10 до 0,07. Влияние внешнего давления в мёрзлых грунтах на количество незамёрзшей воды незначительно [37, 43].

Влияние текстуры мёрзлых песчано-глинистых пород на их размываемость

Влияние текстуры мёрзлых грунтов на их размываемость исследовал в своих экспериментах Данько В.К. Он установил, что мёрзлые пески и глинистые грунты с сетчатой текстурой размываются интенсивнее, чем с массивной [27, 28].

Влияние размокаемости мёрзлых песчано-глинистых пород на их размываемость

Размокаемость мёрзлых горных пород также влияет на скорость разрушения многолетнемёрзлых пород. При большей размокаемости пород происходит их более интенсивный размыв. Глинистые же породы с массивной криогенной текстурой не дезинтегрируются полностью в отличие от мёрзлых песков [30]. Эта особенность глинистых пород делает затруднительным строительство подземных резервуаров в глинистых и суглинистых отложениях.

Влияние температуры мёрзлых песчано-глинистых пород на их размываемость

Также на скорость разрушения влияет температура массива мёрзлых пород, в котором производится создание подземных резервуаров. Чем она ниже, тем, соответственно, большие затраты энергии потребуется на нагрев льда-цемента в мёрзлых породах до точки его плавления.

На рисунке 1.19 представлены результаты проведённых испытаний Рочевым В.Ф. На нём видно, что масса осыпавшихся частиц с мёрзлого грунта, имевшего начальную температуру минус 3°C, в воде в 1,53 раза превысила массу осыпавшихся частиц с мёрзлого грунта, имевшего начальную температуру минус 17°C [43].

Исследования, проведённые в лаборатории ООО «Газпром геотехнологии» показали, что у мёрзлых песчано-глинистых пород с температурой минус 2°C масса осыпавшихся частиц лишь на 3,5% превысила массу осыпавшихся частиц с грунта температурой минус 5°C.

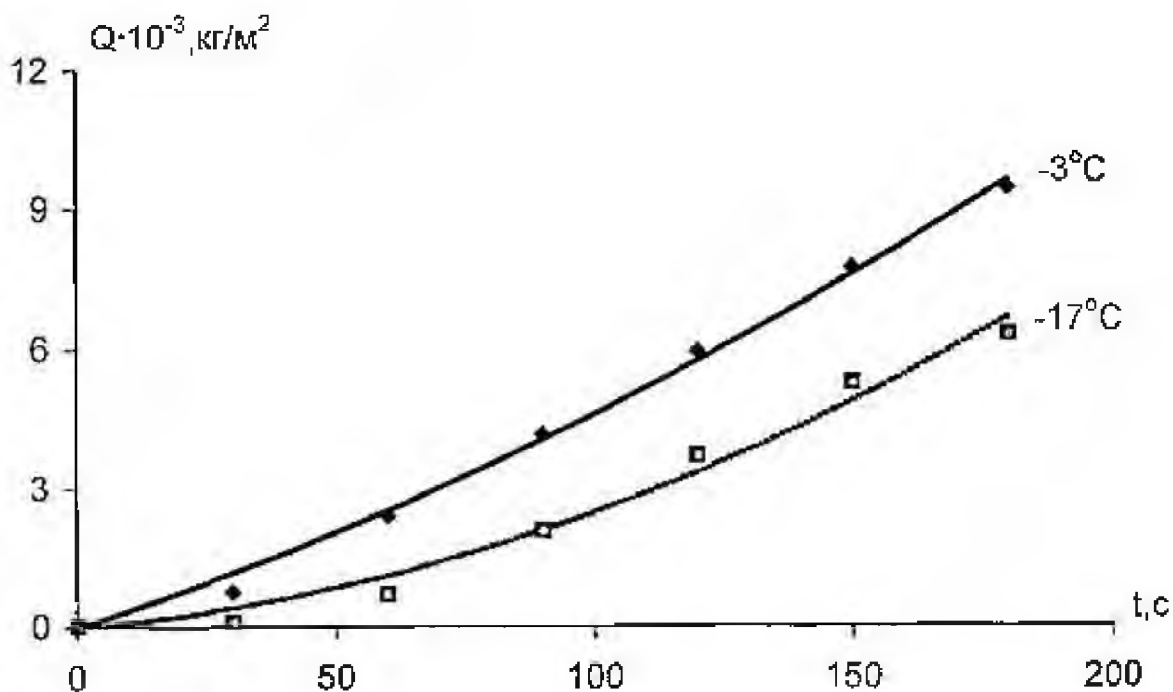


Рисунок 1.19 – Зависимость массы осыпавшихся частиц мёрзлой песчано-глинистой породы от времени нахождения в воде с температурой 10°C, при различной температуре породы (°C)

Влияние засолённости мёрзлых песчано-глинистых пород на их размываемость

Чем выше засолённость мёрзлого грунта, тем выше скорость разрушения в воде. Это связано с тем, что при увеличении засолённости, граница температуры перехода грунта из мёрзлого состояния в талое смещается в сторону более низких отметок, следовательно, необходимо меньшее количество тепловой энергии, чтобы дезинтегрировать мёрзлый засолённый грунт.

Влияние содержания глинистых частиц в мёрзлых песчано-глинистых породах на их размываемость

Присутствие глинистых фракций в песчаных грунтах повышает силы сцепления [55]. Однако физика этого процесса изучена ещё недостаточно. Влияние содержания глинистых частиц в мёрзлом грунте исследовалось Рочевым В.Ф. на лабораторных моделях.

На рисунках 1.20 и 1.21 показаны результаты проведённых им исследований по изучению разрушения мёрзлой песчано-глинистой породы в воде в зависимости от содержания в породе глинистых частиц при температуре породы минус 3°C и минус 17°C.

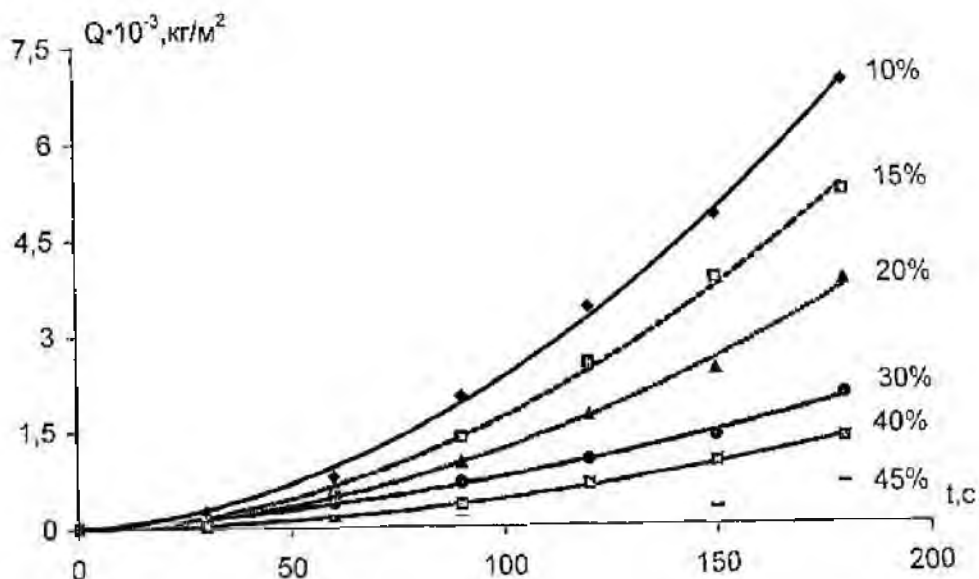


Рисунок 1.20 – Зависимость массы осевших частиц мёрзлой песчано-глинистой породы с температурой минус 17°C от времени нахождения в воде с температурой 10°C при различном содержании глинистых частиц

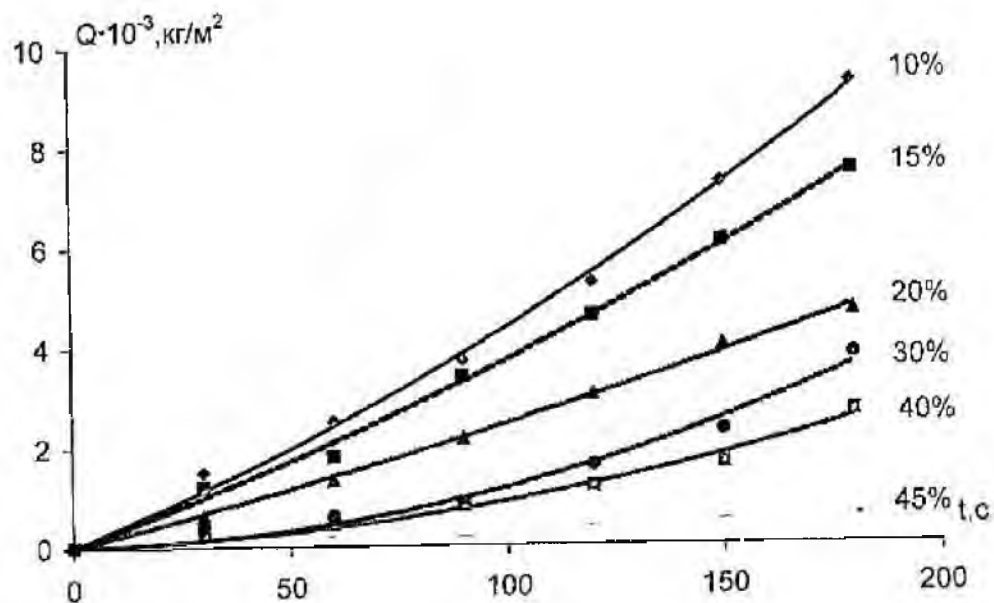


Рисунок 1.21 – Зависимость массы осевших частиц мёрзлой песчано-глинистой породы с температурой минус 3°C от времени нахождения в воде с температурой 10°C при различном содержании глинистых частиц

По характеру зависимости скорости разрушения стенки песчано-глинистого мёрзлого образца в воде от содержания глинистых частиц в нём видно, что даже при незначительном увеличении их содержания, интенсивность разрушения убывает, что объясняется связующей ролью глинистых частиц.

Влияние гранулометрического состава мёрзлых песчано-глинистых пород и включений органики на их размываемость

Гранулометрический состав также существенно влияет на размываемость многолетнемёрзлых грунтов и развитие резервуара. От размеров частиц грунта зависит скорость и характер движения водно-грунтовой смеси от стенок к нижней части резервуара. Также размер частиц мёрзлой породы влияет на межагрегатные связи и количество незамёрзшей воды.

Такие включения, как галька, гравий, щебень, дресва практически не влияют на скорость оттаивания и разрушения, так как не оказывают связующего воздействия на частицы мёрзлого грунта. Включения растительного детрита, который иногда встречается в морских среднеплейстоценовых отложениях салехардской свиты полуострова Ямал, в значительной степени снижают интенсивность разрушения мёрзлых осадочных пород в воде, связывая их частички. На рисунке 1.22 представлен образец керна с глубины 35 м после полуторачасового нахождения в воде с температурой 7°C. Как видно из фотографии, включения растительного детрита не позволили образцу разрушиться несмотря на то, что его температура поднялась с минус 5°C до плюс 7°C.



Рисунок 1.22 – Фотография оттаявшего образца кернового материала с включениями растительного детрита

1.8 Выводы, цели и задачи исследований

Существующие на данный момент методики прогнозирования развития подземных резервуаров и определения параметров их создания в многолетнемёрзлых осадочных породах методом скважинной гидродобычи не учитывают влияние всего спектра природных и технологических факторов. Также в данных методиках не учитывается влияние изменяющейся в процессе строительства температурной стратификации воды, которая, как показывает практика, существенным образом влияет на форму подземных резервуаров.

Различие свойств мёрзлых пород по высоте не учитывались ранее в определении параметров создания резервуаров. Здесь также следует отметить отсутствие в печатных изданиях исследований по влиянию прослоев мёрзлых

пород с худшей размываемостью, по сравнению с основным интервалом создания подземного резервуара.

Из анализа построенных в мёрзлых осадочных породах резервуаров видно, что следствием неправильного определения параметров их создания является сооружение подземных резервуаров с меньшим объёмом в конкретных геологических условиях. Это связано с плохой проработкой верхней части резервуаров и образованием запредельных радиусов в их нижней части, не позволяющей продолжать строительство. Неправильное прогнозирование развития подземного резервуара может привести к просадкам земной поверхности или большой конвергенции выработанного пространства в процессе его эксплуатации, что может привести к вытеканию жидкой фазы буровых отходов на земную поверхность.

Указанные выводы позволяют сформулировать следующие **основные задачи исследования**:

- исследовать механизм разрушения мёрзлых песчано-глинистых грунтов в воде и определить зависимость скорости их разрушения от температуры воды;
- изучить влияние наклона оттаиваемой поверхности грунта на скорость её разрушения;
- определить влияние геологического строения мёрзлого массива на развитие формы подземных резервуаров;
- исследовать влияние распределения температуры воды в подземном резервуаре на развитие его формы;
- разработать методику определения параметров создания скважинных подземных резервуаров в многолетнемёрзлых породах.

ГЛАВА 2 – ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРИРОДНЫХ ФАКТОРОВ НА РАЗМЫВАЕМОСТЬ МЁРЗЛЫХ ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ ПОРОД И НА ПРОЦЕСС СОЗДАНИЯ В НИХ ПОДЗЕМНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ

2.1 Исследование механизма разрушения мёрзлых осадочных пород в воде

Рассматриваемая технология предусматривает создание подземных резервуаров в многолетнемёрзлых песчаных отложениях, однако мест с достаточной мощностью чистого песка не так много. Геологический разрез в интервале сооружения подземного резервуара может быть представлен переслаиванием песка и суглинка. Пропластки суглинка могут быть, как незначительными (2-10 см), так и весьма мощными (до 2-4 м). На некоторых участках также встречаются интервалы пластового льда. Чтобы спрогнозировать развитие подземных резервуаров в таких сложных геологических условиях необходимо определить особенности процесса оттаивания и разрушения этих грунтов в воде.

С целью изучения механизма разрушения мёрзлых пород в воде были проведены лабораторные эксперименты. Исследование проводили с помощью физического моделирования на специально изготовленных в лабораторных условиях цилиндрических образцах мёрзлых пород (песок, суглинок, лед), максимально приближенных по физическим свойствам к природным многолетнемёрзлым породам. Образцы диаметром и высотой 100 мм создавали из мелкозернистого песка и суглинка, отобранных на Бованенковском месторождении полуострова Ямал (рисунок 2.1). Влажность песчаного грунта доводили до полного влагонасыщения, а суглинка – до влажности 35%. Для создания одинаковых условий промерзания и получения одинаковых криогенных текстур, образцы (4) замораживали до температуры минус 17°C, а затем выдерживали не менее суток при температуре минус 5°C (средняя температура массива на глубине строительства подземных резервуаров) в

морозильной камере. Замораживание образцов до минус 17°C необходимо для создания массивной криогенной текстуры горной породы, так как при этой температуре полностью замерзает большая часть прочно связанной воды.

В начале эксперимента образцы мёрзлого грунта и льда (4) помещали в теплоизолированный стеклянный сосуд объёмом 10 л (5, 6) с водой (2) при температуре от плюс 2°C до плюс 18°C (рисунок 2.1). Образцы испытывали в условиях естественной конвекции. Во время эксперимента фиксировали температуру воды в ёмкости, а также изменение массы и радиуса образцов со временем. Температуру фиксировали с помощью двух сертифицированных термометров «Замер-1» (7) с точностью измерения $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Показания снимали через каждые 10 минут. Образцы находились в ёмкости до их полного разрушения.

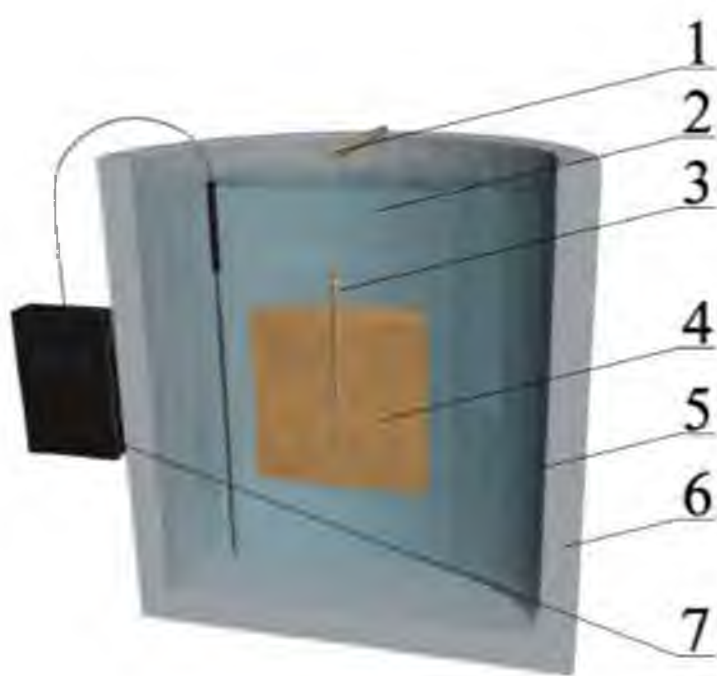


Рисунок 2.1 – Общий вид установки по разрушению образца мёрзлого грунта в воде (в разрезе): 1 – перекладина и удерживающая нить; 2 – вода; 3 – деревянная рейка; 4 – образец мёрзлого грунта; 5 – стеклянный аквариум; 6 – теплоизоляция из пенопласта; 7 – электронный термометр

В результате проведения эксперимента было исследовано 10 образцов мёрзлого песка, 10 образцов мёрзлого суглинка и 7 образцов мёрзлого льда при температуре воды от 1,5 до 18°C.

Данный эксперимент позволил определить различия в механизме и скорости оттаивания и разрушения данных образцов при различной температуре воды в аквариуме. При помещении образца мёрзлой породы в воду начинается его разрушение с отделением от его поверхности частиц породы. Разрушение образцов мёрзлого песка в воде происходит значительно быстрее, чем суглинка и льда. Такое различие в скорости разрушения объясняется различием в льдистости, а также интенсивным движением твёрдых частиц в пограничном слое, активизирующим теплообмен воды с мёрзлой поверхностью. Скорость нисходящего потока при оттаивании различных грунтов отличается. Это связано с различием в гидравлической крупности оттаявших частиц и агрегатов грунта. Средняя скорость падения частиц песка в эксперименте вдоль стенок составила 0,08 м/с, а суглинка – 0,05 м/с. Она достигает своего максимального значения уже в течение первой секунды после отрыва от образца (массива). На рисунке 2.2 показан момент разрушения образцов мёрзлого песка, суглинка и льда в воде.

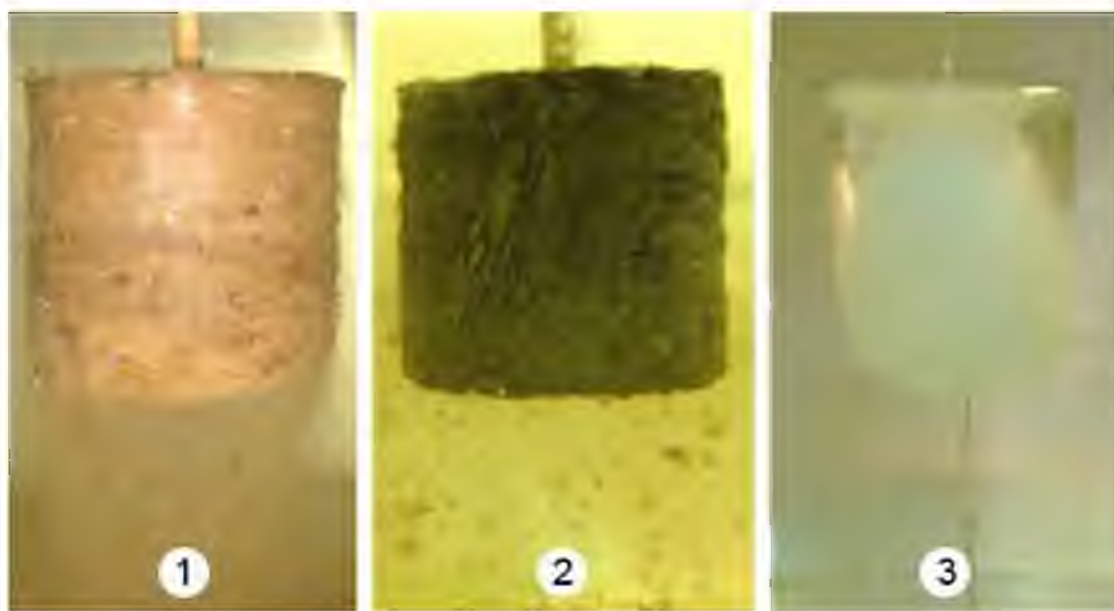


Рисунок 2.2 – Изображение момента оттаивания образцов песка (1), суглинка (2) и льда (3)

Интенсивное движение частиц песка вдоль мёрзлой поверхности обеспечивает более высокую скорость теплового разрушения за счёт образования конвективного турбулентного потока. Оттаивание и разрушение суглинка происходит с выпадением мелких глинистых «чешуек», обладающих меньшей гидравлической крупностью, и незначительно повышающих турбулентность в пограничном слое. Процесс разрушения мёрзлых суглинков также сопровождается отрывом единичных крупных агрегатов, несмотря на то, что при изготовлении образца суглинка были тщательно растерты и перемешаны с водой до однородной консистенции. Это связано с текстурой суглинка, образующейся в процессе его промерзания. Вследствие силы сцепления между глинистыми частицами на образце суглинка в процессе оттаивания образуется талая оболочка, которая играет роль теплоизолятора, замедляющего оттаивание и разрушение.

Наименьшая скорость движения воды в пограничном слое отмечена при таянии льда. Нисходящий поток образуется лишь за счёт разницы в плотностях, которая связана с разницей температуры воды в аквариуме и у поверхности образца. Скорость оттаивания вертикальной стенки ледяных образцов оказалась значительно меньше по сравнению с песчаными и суглинистыми образцами.

Динамика разрушения образца показана на рисунке 2.3. На нём отражены контуры мёрзлого песчаного образца через равные промежутки времени.



Рисунок 2.3 – Динамика разрушения образца мёрзлого грунта

По результатам эксперимента была определена зависимость скорости перемещения оттаиваемой разрушающейся поверхности мёрзлых образцов от температуры воды. Для образцов с температурой минус 5°C графики зависимости скорости разрушения от средней температуры воды в аквариуме изображены на рисунке 2.4. Скорость разрушения мёрзлой поверхности образца в воде находилась как частное от деления радиуса образца на время его разрушения.

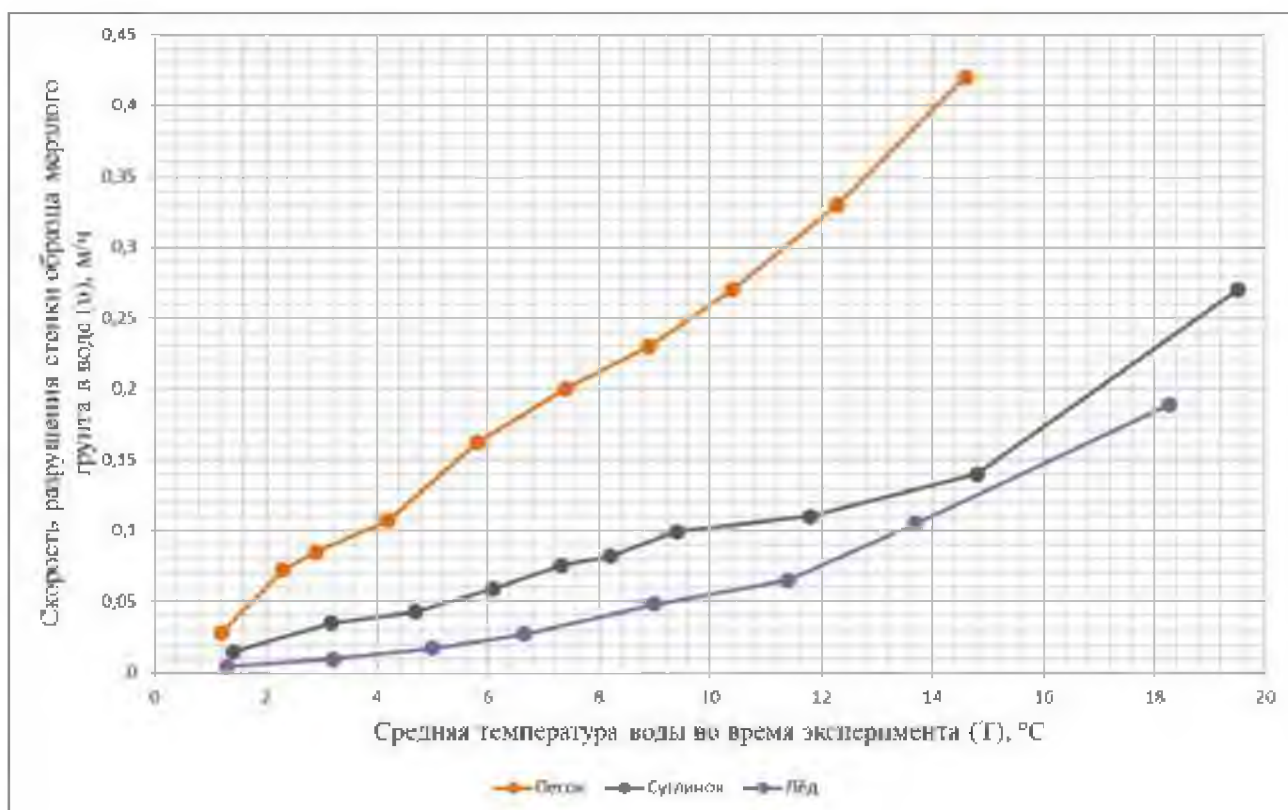


Рисунок 2.4 – Графики зависимости скорости разрушения стенки образца мерзлого грунта с температурой минус 7°C в воде от средней температуры воды в ёмкости

Скорости разрушения данных образцов мерзлого песка, суглинка и льда при одинаковой температуре воды относятся соответственно как 6,5:2,5:1.

Из данных графиков видно, что при 10-15°C происходит перелом графиков зависимости скорости разрушения от температуры.

В подземном резервуаре средняя температура воды у мерзлой стенки не превышает 6-10°C. В этом температурном интервале зависимость скорости разрушения стенки мерзлого грунта в воде от её температуры можно с необходимой для инженерных расчётов принять за линейную (рисунок 2.5). Как видно, полученные формулы аппроксимирует 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 многолетнемерзлого грунта

при конкретной температуре воды к оси абсцисс, в работе названо приведённой скоростью разрушения многолетнемёрзлых пород в воде.

Так как температура воды в подземном резервуаре при его строительстве 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 подземном резервуаре на всём указанном выше интервале.

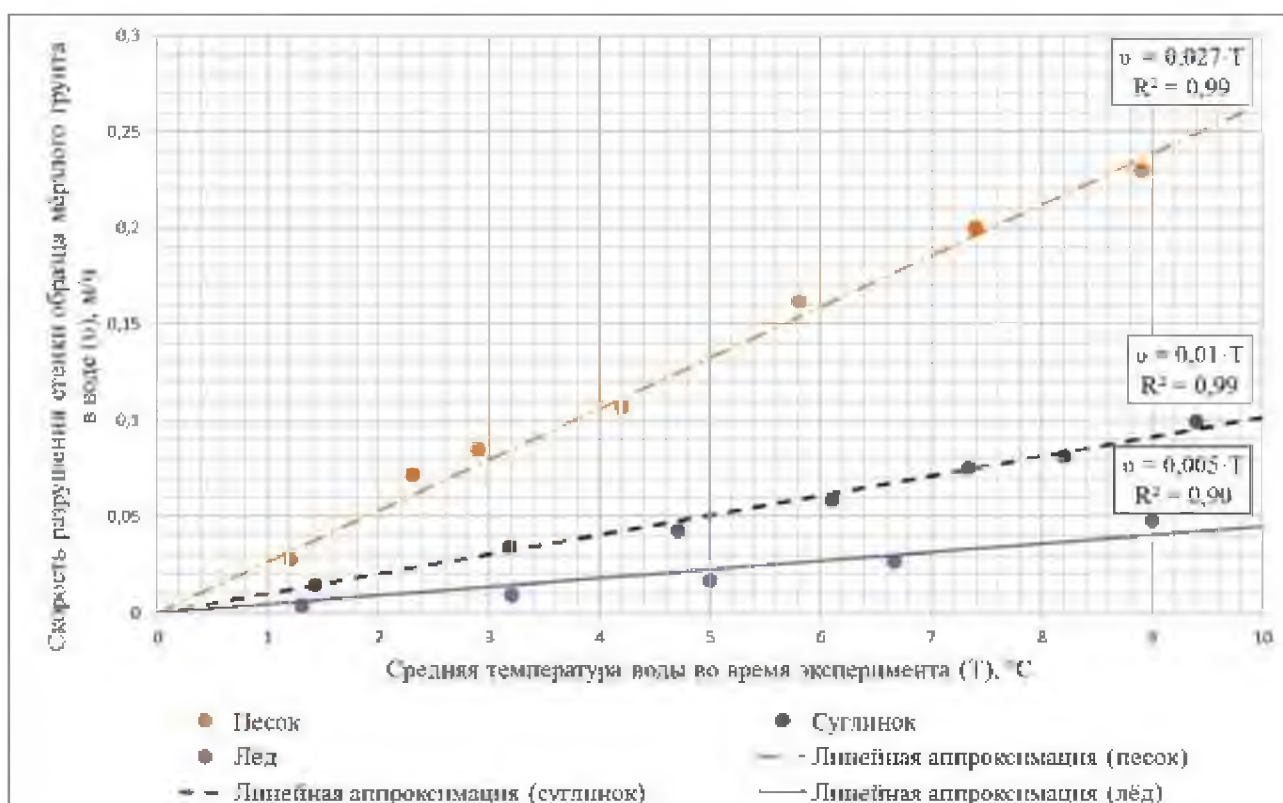


Рисунок 2.5 – Графики зависимости скорости разрушения стенки образца мёрзлого грунта с температурой минус 7°C в воде от средней температуры воды в ёмкости

Для определения влияния размера радиуса образца на скорость разрушения его стенки в воде был проведён аналогичный эксперимент на образцах с радиусами 2 см, 5 см, 10 см и 15 см. Результаты эксперимента показали, что до момента достижения в процессе оттаивания образцом радиуса 1,5-2,5 см, его размеры не влияли на скорость разрушения. Скорость

разрушения мёрзлых образцов в воде в первые минуты испытаний в некоторых случаях оказалась завышена в связи с пониженной льдистостью на поверхности образцов, связанной с сублимацией льда, а также в связи с началом процесса оттаивания в воздушной среде ещё до начала эксперимента. Отсюда следует, что на образцах, изготовленных из kernового материала, диаметром и радиусом равными 70-100 мм можно с необходимой и достаточной степенью точности определять скорость разрушения мёрзлой породы. Однако для повышения точности расчётов следует исключить замеры, сделанные в первые 2 минуты для мёрзлых песчаных пород, и замеры, сделанные в первые 5 минут для мёрзлых суглинистых пород, а также замеры, сделанные после разрушения образца до радиуса 2,5 см.

Содержание глинистых частиц в мёрзлой песчаной породе также значительно влияет на скорость разрушения. Исследования показали, что скорость разрушения песчано-глинистой породы с необходимой для инженерных расчётов точностью может быть описана линейным уравнением (рисунок 2.6). Высокий коэффициент детерминации ($R^2=0,98$) показывает, что полученное линейное уравнение с большой степенью близости аппроксимирует экспериментальные данные. Данные исследования проводились по той же методике: несколько искусственных цилиндрических образцов мёрзлого песчано-глинистого грунта с разным содержанием глинистых частиц были помещены в воду при температуре 8°C и находились в ней до полного разрушения.

Определение данных зависимостей позволяет, зная среднюю скорость разрушения многолетнемёрзлых песчаных пород в воде и содержание глинистых частиц в песчано-глинистых породах, приближённо определять скорость разрушения многолетнемёрзлой песчано-глинистой породы при воздействии воды с различной температурой.

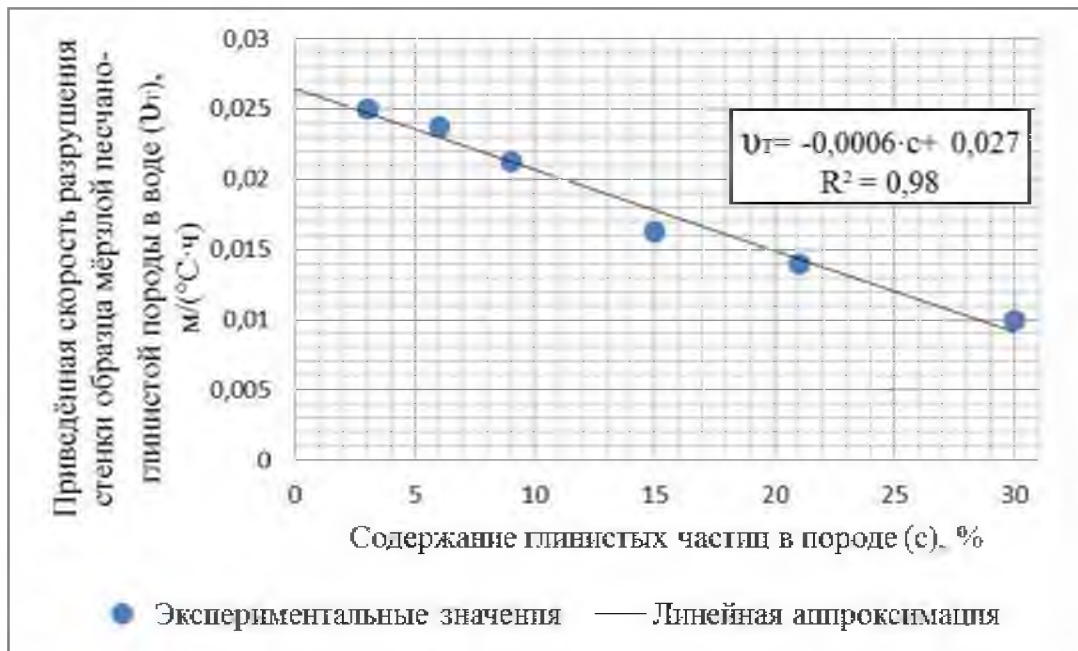


Рисунок 2.6 – Зависимость приведённой скорости разрушения стенки образца мерзлой песчано-глинистой породы в воде от содержания глинистых частиц

Немаловажным является влияние движения оттаявших частиц грунта в пограничном слое на скорость разрушения вертикальной, горизонтальной и наклонной оттаиваемой поверхности стенки подземного резервуара. За счёт механического воздействия частиц и агрегатов грунта и производимого ими перемешивания воды вдоль вертикальной поверхности, разрушение происходит на порядок быстрее, чем при оттаивании с горизонтальной потолочины. При наклонной поверхности частицы и агрегаты грунта, оттаяв, устремляются вниз, а не вдоль оттаиваемой поверхности. В результате этого, с увеличением отклонения оттаиваемой поверхности стенки резервуара от вертикального положения, скорость её разрушения уменьшается (рисунок 2.7).



Рисунок 2.7 – Изображение начального и конечного моментов разрушения наклонённого мёрзлого образца в воде

В данном эксперименте скорость разрушения вертикальной поверхности в 2,3 раза превысила скорость разрушения наклонной поверхности для угла 63° к вертикали.

При горизонтальном положении образца с формой прямого параллелепипеда скорость разрушения нижней его поверхности оказалась в 14 раз ниже, чем вертикальной (боковые грани) при тех же условиях.

Зависимость скорости разрушения поверхности образца в воде от угла её наклона к вертикали представлена на рисунке 2.8 и в таблице 2.1.

Таблица 2

Зависимость скорости разрушения поверхности образца мёрзлой песчаной породы в воде от угла её наклона к вертикали при температуре воды 4°C

Угол наклона поверхности образца	Скорость разрушения поверхности мёрзлого песчаного образца в воде при её температуре 4°C, м/ч
0°	0,102
32°	0,092
47°	0,072
63°	0,045
90°	0,007286

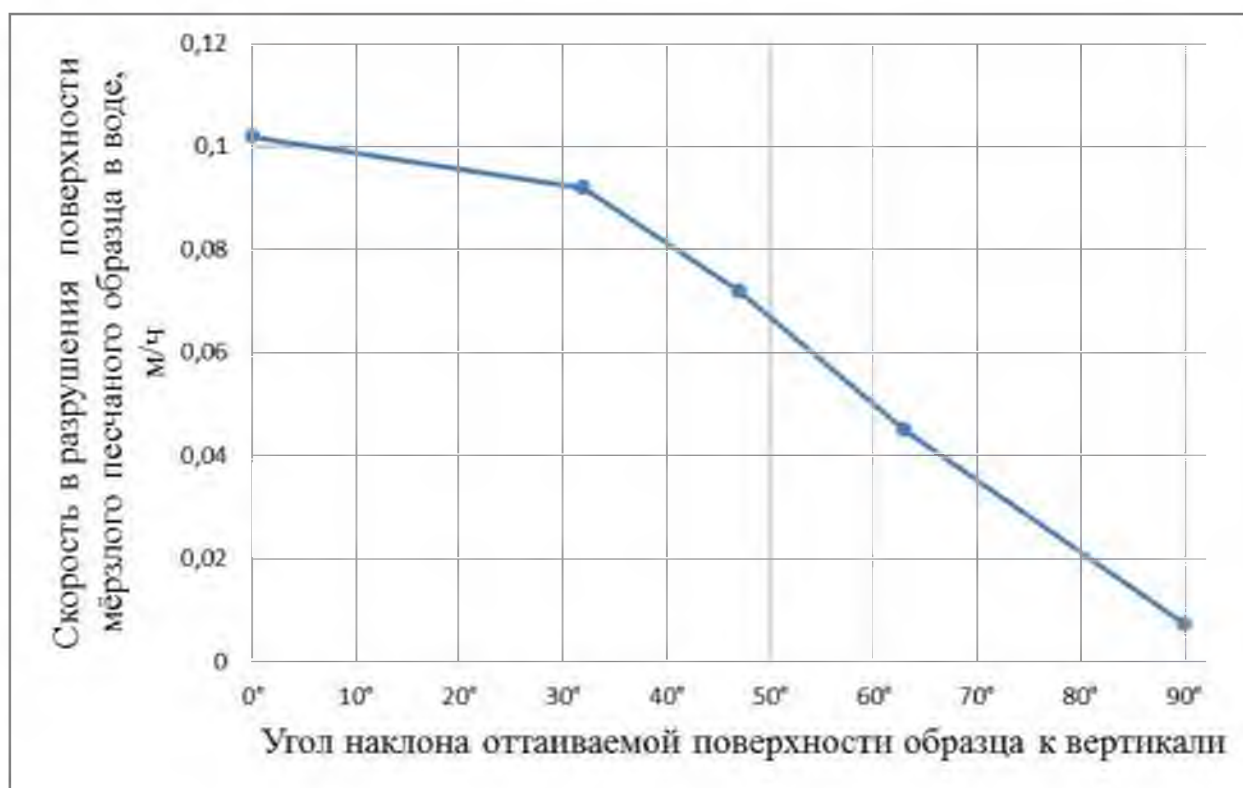


Рисунок 2.8 – График зависимости скорости разрушения поверхности мёрзлого песчаного образца от её угла наклона к вертикали при температуре воды 4°C

2.2 Влияние геологического строения массива мёрзлых песчано-глинистых пород на развитие подземного резервуара

Согласно проекту создания подземных резервуаров, разработанному в ООО «Газпром геотехнологии», подземные резервуары строятся в многолетнемёрзлом песчаном массиве. Однако не всегда вмещающий резервуар пласт сложен песчаными отложениями. Иногда встречаются пропластки суглинка или глины.

В некоторых случаях мощность песчаного пласта недостаточна для создания в нём подземного резервуара необходимого объёма. Тогда нижнюю часть резервуара создают в суглинке. Для того чтобы определить особенности развития резервуара в мёрзлых песчано-глинистых породах, были проведены лабораторные и натурные эксперименты.

2.2.1 Развитие подземного резервуара в мёрзлом песчаном массиве

Для определения основных закономерностей развития подземного резервуара в многолетнемёрзлом песчаном грунте была создана его объёмная модель (камера в блоке мёрзлого грунта). Камера создавалась в замороженном до температуры минус 5°C песчаном блоке с влажностью 34%, который представлял собой цилиндр диаметром 300 мм и высотой 350 мм (рисунок 2.9, 2.10). Для уменьшения влияния окружающей среды модель была теплоизолирована с помощью пенопласта толщиной 30 мм.

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.

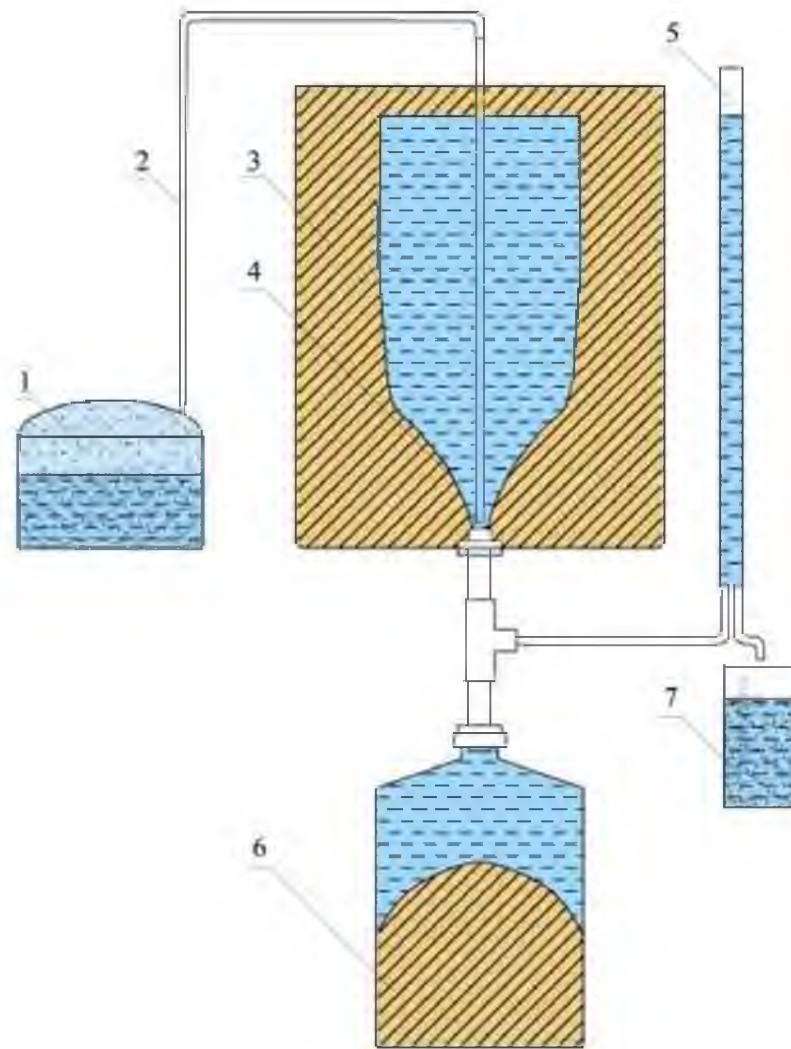


Рисунок 2.9 – Схематическое изображение модели подземного резервуара в мёрзлой песчаной породе: 1 – парогенератор; 2 – пароподающая трубка; 3 – мёрзлый песчаный грунт; 4 – резервуар; 5 – стеклянная проградуированная трубка; 6 – ёмкость для оттаявшего грунта; 7 – мерный стакан



Рисунок 2.10 – Лабораторная установка по созданию модели резервуара в мёрзлом грунте

В данной модели было соблюдено важное условие подобия натурному объекту – геометрическое подобие. По аналогии со строительством реального подземного резервуара, в подготовленную «скважину» модели была закачена вода и спущена пароподающая трубка. Так как, по сравнению со строительством резервуаров в натуральных условиях, подача пара в одном из экспериментов была выше (при проведении эксперимента подавалось 25 мг пара в час, тогда как по условиям подобия должно было подаваться лишь 13,5 мг пара в час), данный эксперимент позволил проследить формирование резервуара при средней температуре воды в нём больше 4°C .

В задачу моделирования не входило изучение параметров гидротранспорта, которые нельзя осуществить в данной модели ввиду невозможности сохранения гидродинамического подобия режимов течения. Удаление оттаявшего грунта производилось не за счёт подъёма на поверхность, а за счёт осаждения частиц под действием сил гравитации в ёмкость для складирования оттаявшего грунта (6), заполненный водой.

Процесс создания камеры был разбит на этапы. На первом этапе уровень воды в течение 20 минут поддерживали на высоте 9 см (согласно рисунку 2.11), на втором этапе уровень воды в течение 30 минут поддерживали на высоте 11 см, на третьем этапе уровень воды в течение 30 минут поддерживали на высоте 19 см, на четвертом этапе в течение 15 минут уровень воды поддерживали на высоте 28 см. После окончания каждого этапа проводили откачку воды с тарированием образующейся камеры для построения её контура и определения скорости оттаивания и разрушения боковой поверхности. Во время всего эксперимента фиксировалась температура грунта и воды в камере.

Эксперимент продолжался 2 часа 15 минут. В результате была создана камера общим объёмом 1,3 л.

Были построены вертикальные сечения контура камеры для разных моментов времени её создания (рисунок 2.11), а также рассчитана скорость разрушения мёрзлой поверхности на основных этапах (таблица 2.2).

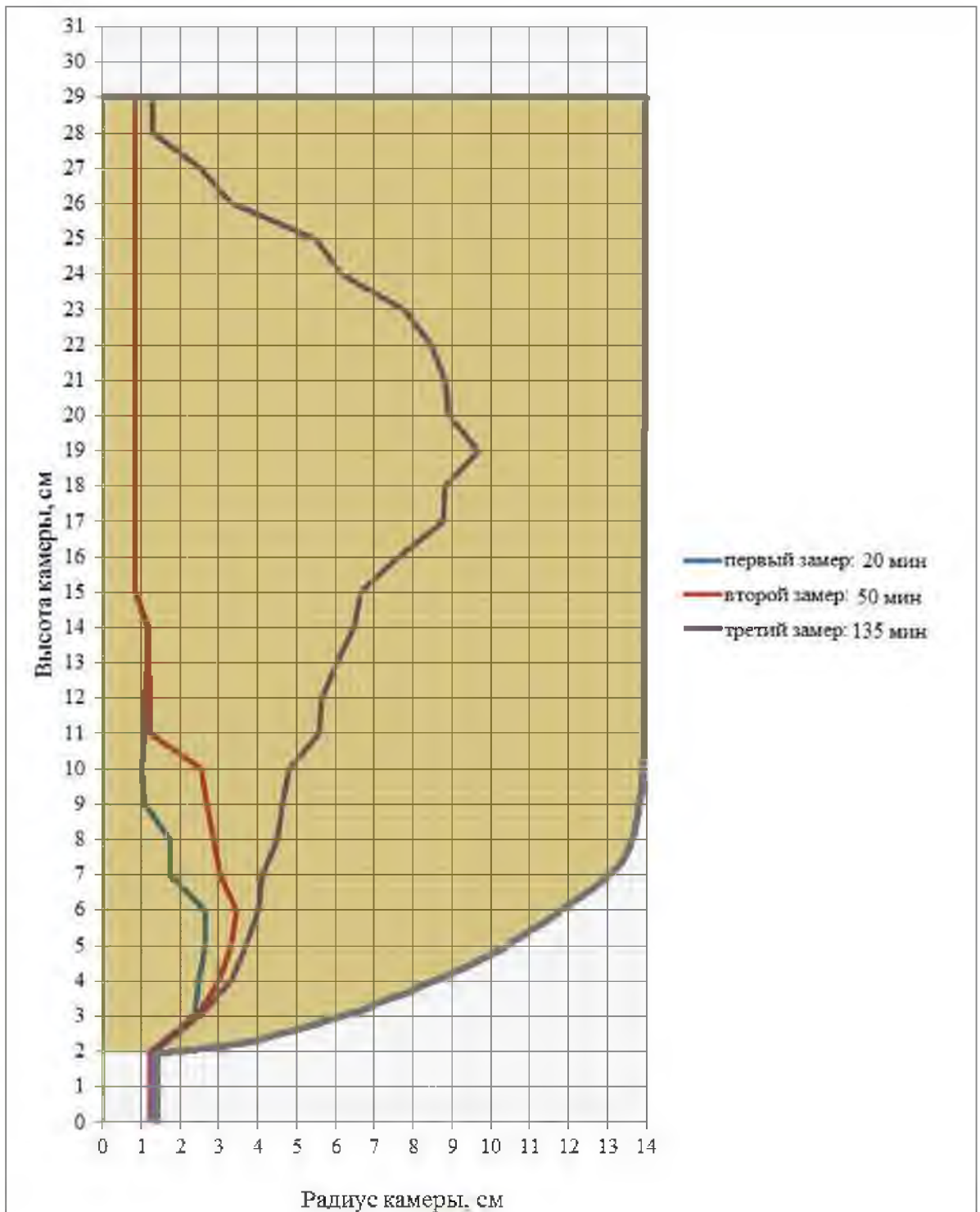


Рисунок 2.11 – Вертикальные сечения контура камеры в разные моменты времени

Средняя температура воды вдоль центральной оси резервуара (вдоль пароподающей трубки) на четвертом этапе размыва имела следующие значения по высоте:

- нижняя часть камеры: +10°C;

- средняя часть камеры: +5°C;
- верхняя часть камеры: +6°C.

Средняя температура воды в камере на четвёртом этапе на удалении от пароподающей трубки, вблизи к оттаиваемой поверхности, имела следующие средние значения по высоте:

- нижняя часть камеры: +4°C;
- средняя часть камеры: +5°C;
- верхняя часть камеры: +7°C.

Результатом такого распределения температуры воды у боковой поверхности резервуара стало активное развитие его верхней части и недостаточное развитие нижней.

Таблица 2.2

Результаты моделирования развития резервуара

№ шага	Общее время создания камеры, мин.	Средняя температура этапа, °C	Объём оттаявшего и разрушившегося грунта за этап, мл	Скорость разрушения боковой поверхности, м/ч
1	5	5,5	180	0,15
2	10	8,1	270	0,23
3	25	8	550	0,21
4	28	7,8	300	0,2

По результатам моделирования резервуара в мёрзлом песчаном блоке были сделаны следующие выводы:

- 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, а следовательно и на его форму; если подаётся избыточное количество тепла и средняя температура воды в камере превышает 4°C , то поверхность камеры оттаивает и разрушается равномерно по всей высоте; если средняя температура воды ниже 4°C , то интенсивнее разрушается нижняя часть.

2.2.2 Развитие подземного резервуара в массиве многолетнемёрзлого песчаного грунта с пропластками суглинка

Создание подземных резервуаров производится как правило в многолетнемёрзлых песчаных отложениях. Однако мощности песчаного пласта в некоторых случаях может не хватить для создания в нём камеры с необходимой объёмом и формой. Для решения данной проблемы было предложено использование подстилающего песчаный пласт суглинка для формирования в нём нижней части подземного резервуара.

До натуральных испытаний по строительству подземных резервуаров с предварительным созданием зумпфа в суглинках были проведены лабораторные исследования.

Для определения основных закономерностей развития формы подземного резервуара в массиве, нижняя часть которого является мёрзлым суглинком, а верхняя мёрзлым песком, была создана подобная описанной выше лабораторная модель подземного резервуара. Замороженный блок мёрзлого грунта, в котором создавалась модель резервуара, представляла собой цилиндр с диаметром 300 мм и высотой 350 мм, нижняя часть которого заполнена мёрзлым суглинком с влажностью 49% и высотой слоя 180 мм, а верхняя – песком с влажностью 34% и высотой 120 мм (рисунок 2.12). Рабочий объём модели послойно заполнялся и замораживался вначале суглинком, а затем песком. Начальная температура блока мёрзлого грунта равнялась минус 5°C .

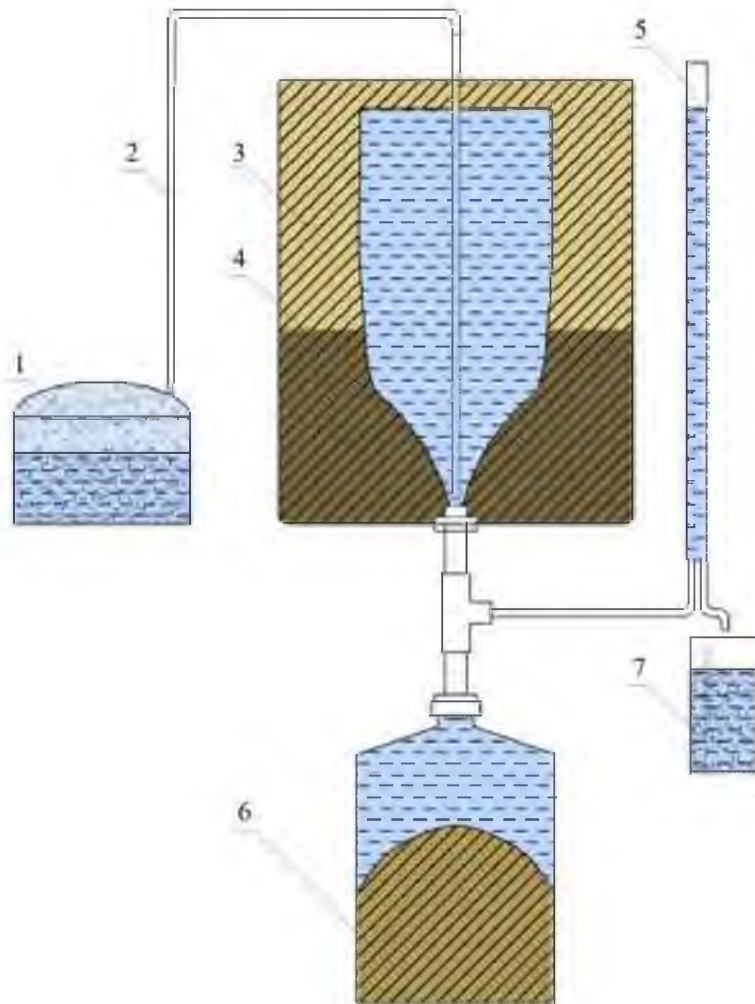


Рисунок 2.12 – Схематическое изображение модели подземного резервуара, верхняя часть которого находится в мёрзлом песчаном массиве, а нижняя – в суглинке: 1 – парогенератор; 2 – пароподающая трубка; 3 – мёрзлый грунт; 4 – резервуар; 5 – стеклянная проградуированная трубка; 6 – ёмкость для оттаявшего грунта; 7 – мерный стакан

По аналогии со строительством реального подземного резервуара, в подготовленную «скважину» модели была закачена вода, уровень которой первые 75 минут поддерживался на границе песок-суглинок, затем был поднят до уровня 270 мм от дна камеры. Каждый час с начала эксперимента проводилась тарировка образующейся полости для построения контура камеры и определения скорости разрушения боковой поверхности. Во время всего эксперимента фиксировалась температура модели массива и воды в резервуаре.

Эксперимент продолжался 3 часа 30 минут. В результате была создана полость общим объёмом 3,8 л.

Были построены вертикальные сечения контура камеры для разных моментов времени создания камеры (рис. 2.13).

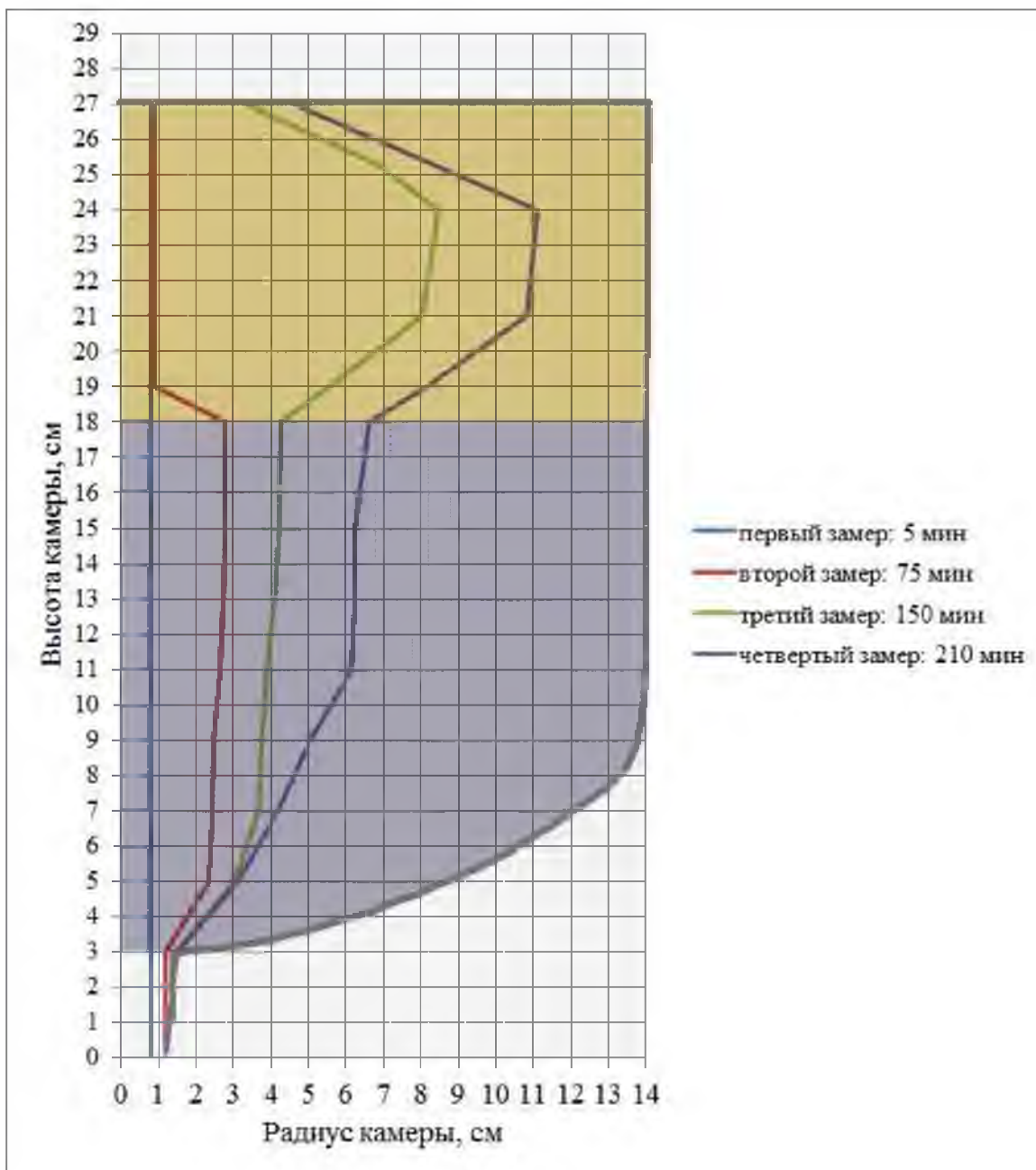


Рисунок 2.13 – Вертикальные сечения контура камеры

По результатам проведённого эксперимента (таблица 2.3) видно, что в массиве, где подстилающей породой для мёрзлого песка является мёрзлый

суглинок, отношение скоростей теплового разрушения песка и суглинка выражается как 2:3.

Средняя температура воды в камере на заключительном этапе вдоль пароподающей трубки имела следующие значения по высоте:

- нижняя часть камеры: +11°C;
- средняя часть камеры: +5°C;
- верхняя часть камеры: +7°C

Средняя температура воды в камере на заключительном этапе на удалении от пароподающей трубки, вблизи к оттаиваемой поверхности, имела следующие средние значения по высоте:

- нижняя часть камеры: +4,2°C;
- средняя часть камеры: +5°C;
- верхняя часть камеры +9°C

Результатом такого распределения температуры воды у стенок резервуара, как и в первом эксперименте, стало активное развитие его верхней части и недостаточное развитие нижней.

Таблица 2.3 – Результаты моделирования развития резервуара

№ шага	Общее время создания камеры, мин.	Средняя температура этапа, °C	Объем оттаявшего и разрушившегося грунта за этап, мл		Общий объем оттаявшего грунта, мл		Скорость разрушения боковой поверхности, м/ч	
			Суглинок	Песок	Суглинок	Песок	Суглинок	Песок
1	5	5,1	0	0	0	0	0,09	0,00
2	10	8,2	282	5	282	5	0,15	0,00
3	23	8,3	360	1392	642	1397	0,16	0,26
4	32	7,6	674	1087	1316	2484	0,14	0,19

По результатам моделирования резервуара в мёрзлом блоке, нижняя часть которого представлена мёрзлым суглинком, а верхняя – мёрзлым песком, были сделаны следующие выводы:

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

- оттаивание и разрушение нижней части резервуара, вследствие заполнения пространства между частицами песка коллоидными частицами, а также вследствие накопления оттаявшего грунта под углом естественного откоса, замедляется и прекращается;

- количество вносимого в резервуар тепла, как и в песчаной модели, оказывает влияние не только на скорость размыва, но и на распределение тепла по высоте скважины, а следовательно и на его форму; если подаётся избыточное количество тепла и средняя температура воды в камере превышает 4°C, то поверхность камеры оттаивает и разрушается равномерно по всей высоте, если средняя температура воды ниже 4°C, то интенсивнее разрушается нижняя часть;

- 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·°C), суглинка – 0,018 м/(ч·°C));

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

В 2012 году на Бованенковском НГКМ было построено 3 подземных резервуара, нижняя часть которых находилась в суглинке. Результаты строительства подтверждают выводы, сделанные в ходе лабораторных экспериментов:

- скорость разрушения мёрзлого суглинка в 1,5 раза меньше скорости разрушения мёрзлого песка;

– угол откоса в песчаной части резервуара, выше пласта суглинка, равен 30-35°;

– в результате заполнения пространства между частицами песка и более крупными фракциями на дне резервуара коллоидным илом оттаивание и разрушение практически прекращается.

При натурном строительстве подземных резервуаров, имеющиеся единичные маломощные пропластки суглинка, оттаивая медленнее, образуют «kozyрьки», которые разрушаются под собственным весом и под механическим воздействием потока оттаявших песчаных частиц и агрегатов.

Однако, если их количество и мощность больше, скорость разрушения стенки подземного резервуара в воде в таком интервале массива мёрзлого грунта приближается к скорости разрушения суглинка (глины). Это подтверждают данные натурных и лабораторных исследований.

Лабораторные исследования показали, что при слоистой структуре многолетнемёрзлых пород происходит замедление скорости разрушения песчаных пропластков и, в конечном счёте, скорость разрушения всей боковой стенки подземного резервуара будет определяться скоростью разрушения суглинка (глины) (рисунок 2.14). Следует отметить, что наличие единичных небольших прослоев суглинка не оказывает заметного влияния на общее развитие подземного резервуара.



Рисунок 2.14 – Форма песчаного образца с переслаиванием суглинка и песка после частичного разрушения

2.3 Выводы

По результатам лабораторных и натурных исследований механизма оттаивания и разрушения многолетнемёрзлых осадочных пород, а также развития подземных резервуаров можно сделать следующие выводы:

- скорость разрушения многолетнемёрзлых осадочных пород в воде определяется интенсивностью и направлением движения оттаявших частиц в пограничном слое, при этом максимальная скорость разрушения достигается у вертикальной поверхности;
- наклон оттаиваемой поверхности мёрзлого грунта относительно вертикали влияет на скорость её разрушения; максимальная скорость достигается на вертикальной поверхности. Скорость разрушения вертикальной

поверхности мёрзлых песчаных пород в воде более чем в 10 раз превышает скорость разрушения горизонтальной поверхности;

- экспериментально установлено, что скорость разрушения мёрзлых песчаных, глинистых пород и природного льда при тепловом воздействии воды, заполняющей подземный резервуар, прямо пропорционально зависит от её температуры в интервале от 0 до плюс 10°C;

- скорость разрушения песчано-глинистых пород линейно снижается с увеличением содержания глинистых частиц, а при слоистой структуре равна скорости разрушения глинистых пород;

- затраты тепла на оттаивание песка, супеси, суглинка и льда определяются главным образом содержанием льда в многолетнемёрзлой породе и площадью поверхности;

- количество вносимого в модель тепла оказывает влияние не только на скорость размыва, но и на распределение тепла по высоте скважины, а следовательно и на его форму; если подаётся избыточное количество тепла и средняя температура воды в камере 4–10°C, то поверхность камеры оттаивает и разрушается равномерно по всей высоте, если средняя температура воды ниже 4°C, то интенсивнее разрушается нижняя часть;

- нижняя часть подземного резервуара представляет собой перевернутый конус с вершиной в точке отбора оттаявшего грунта; угол наклона образующей конуса зависит от грунта; для песка он, как правило, равен 25-40°, для суглинка и глины – 45-65°.

Наблюдения, сделанные в ходе экспериментов на моделях, соответствуют наблюдениям за развитием подземных резервуаров при натурном строительстве. Соответствие скоростей разрушения поверхности многолетнемёрзлых пород в воде при создании резервуаров и скоростей разрушения стенки образца и модели резервуара 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.

2.4 Методика определения приведённой скорости и удельной теплоты разрушения мёрзлых осадочных пород в воде

Учесть, спрогнозировать и рассчитать влияние каждого природного фактора на процесс развития подземного резервуара достаточно сложно, поэтому для расчёта параметров создания резервуаров предлагается определять два комплексных параметра, определяющих размываемость многолетнемёрзлых пород: приведённую скорость и удельную теплоту разрушения мёрзлого грунта в воде. Данные параметры предлагается определять в полевых условиях при исследовании керна (рисунок 2.17) в интервале строительства подземных резервуаров.

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 подземного резервуара, заполненного водой, при различной температуре.

Так как характер зависимости скорости разрушения вертикальной стенки резервуара в воде от температуры воды в интервале температур от 0 до 10°C для инженерных расчётов можно принять за линейный, то приведённая скорость разрушения мёрзлого грунта в воде, она же – значение тангенса угла наклона этой прямой к оси абсцисс, определённая для конкретного мёрзлого грунта при определённой температуре воды ($T_{в.эксп.}$), будет описывать скорость его разрушения ($U_{гр}$) на всем указанном выше интервале температур (рисунок 2.15).

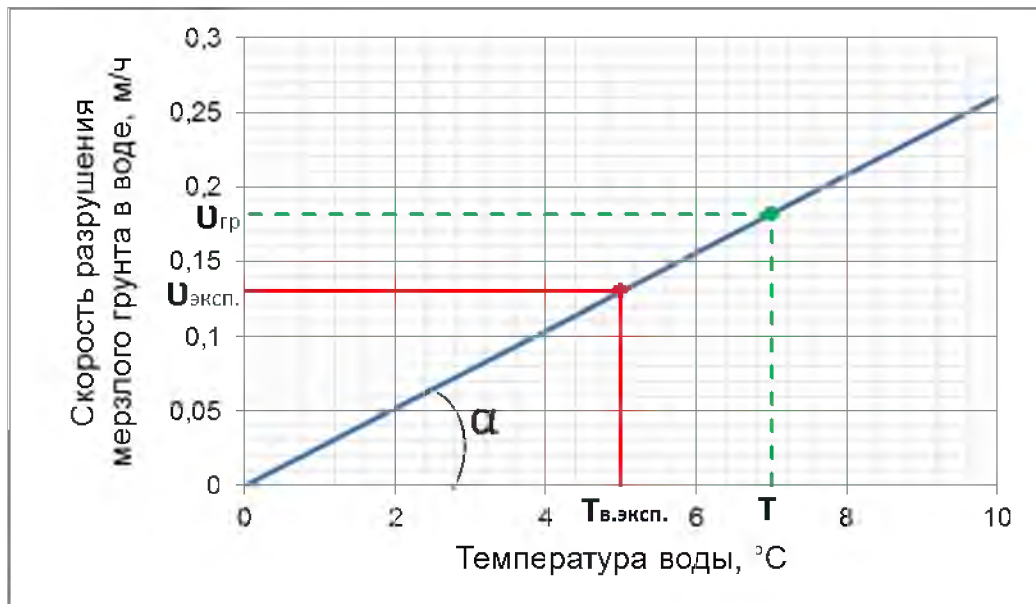


Рисунок 2.15 – График зависимости скорости разрушения образца мёрзлого песка в воде от её температуры, построенный по данным одного испытания

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 повышения точности получаемых данных испытания на образцах керна необходимо проводить сразу после их подъёма из скважины. Экспериментально доказано, что разница температуры образца в пределах 4°C даёт погрешность при определении скорости разрушения мёрзлых грунтов в воде не более 5%. Это делает возможным использование в испытаниях образцов с температурой отличной от температуры массива, с которой они были подняты на $\pm 3^\circ\text{C}$.

Для определения приведённой скорости и удельной теплоты разрушения мёрзлого грунта в воде из каждого ИГЭ, но не реже чем через 3 метра предлагается отбирать монолиты мёрзлого грунта (рисунок 2.16 б). Из монолитов, сохраняя их природную температуру в массиве необходимо изготовить образцы диаметром 80-100 мм и высотой 100-150 мм. Талый слой необходимо счистить, чтобы предотвратить искажения данных расчёта приведённой скорости разрушения мёрзлого грунта в воде. Перед

исследованием нужно измерить их массу, линейные размеры (диаметр, высоту) температуру, вычислить плотность по формуле 2.1.

$$\rho_{обр} = \frac{4 \cdot m_{обр}}{\pi \cdot D_{обр}^2 \cdot H_{обр}}, \quad (2.1)$$

где: $\rho_{обр}$ – плотность образца грунта $\left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}\right)$; $m_{обр}$ – масса образца (кг); D – диаметр образца (м); $H_{обр}$ – высота образца (м).

Для определения приведённой скорости и удельной теплоты разрушения мёрзлого грунта в воде предлагается использовать разработанную установку, включающую теплоизолированный сосуд (термос ТГ-9) с помещённой в него термопарой и весы, к которым подвешивается погружённый в воду образец мёрзлого грунта (рисунок 2.16 а, рисунок 2.17).



а

б

Рисунок 2.16 – Установка по определению приведённой скорости и удельной теплоты разрушения мёрзлого грунта (а) и испытываемый образец керна (б)

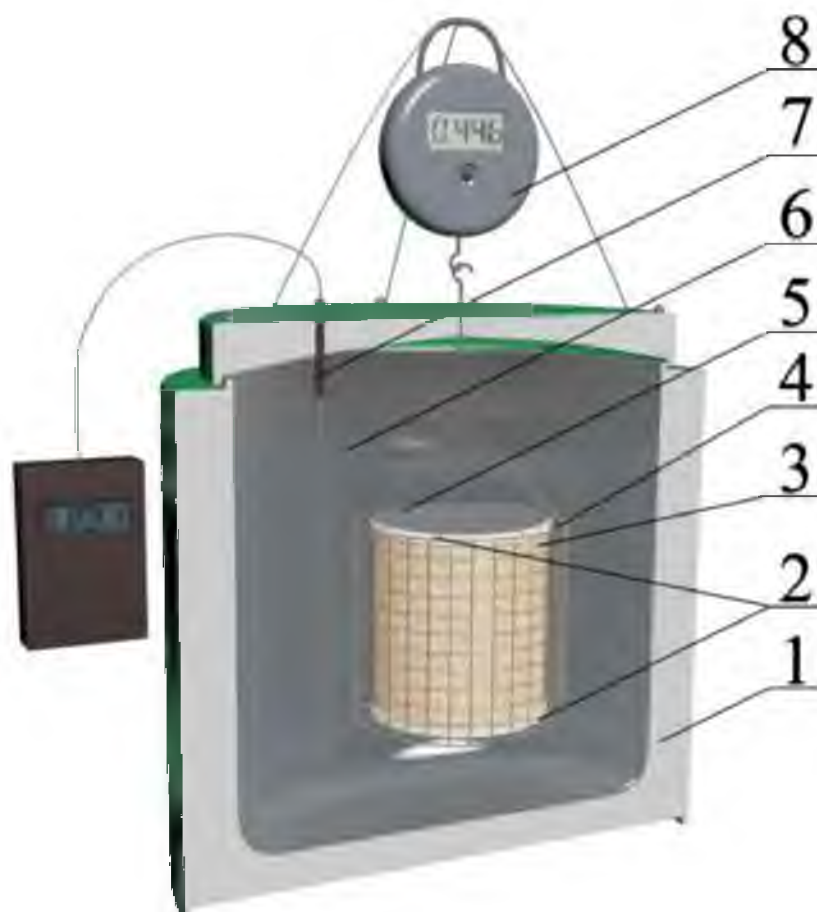


Рисунок 2.17 – Установка по определению приведённой скорости и удельной теплоты разрушения мёрзлых грунтов в воде: 1 – сосуд Дьюара; 2 – теплоизолирующие прокладки; 3 – образец мёрзлого грунта; 4 – сетчатый стакан; 5 – прижимная пластина; 6 – вода; 7 – электронный термометр; 8 – весы

На верхнюю и нижнюю поверхность ненарушенного образца (3) накладывают теплоизолирующие прижимные прокладки (2). Образец устанавливают в сетчатый стакан (4) высотой и диаметром 100 мм, с размерами ячеек около 10 мм, подвешенный на весах (8). Образец погружают в теплоизолированную ёмкость (1), заполненную водой (6) (рисунок 2.17). С помощью термопары (7) фиксируют температуру воды в ёмкости. Замеряют массу воды в ёмкости. Объём воды в ёмкости должен составлять 7-10 л. Термопара должна находиться на расстоянии 30-40 мм от образца, на уровне его середины.

Теплоизолирующие прижимные прокладки можно изготовить из поролона толщиной не более 5 мм. Они необходимы для предотвращения оттаивания и разрушения верхней и нижней поверхностей образца (рисунок 2.18). На верхнюю прокладку устанавливается металлическая прижимная пластина толщиной 0,5-1 мм.



Рисунок 2.18 – Процесс разрушения мёрзлого песчаного образца в воде с использованием прижимных теплоизолирующих прокладок

Во время проведения испытаний рекомендуемая температура воды в ёмкости должна быть равна температуре окружающего воздуха (но не выше 10°C).

Перед погружением образца в журнал испытаний (таблица 2.4) заносят следующие данные:

- дата и время проведения испытания;
- глубина отбора керна ($h_{отб}$);
- геологическое описание образца;
- масса образца мёрзлого грунта ($m_{обр}$);
- диаметр образца мёрзлого грунта ($D_{обр}$);
- высота образца мёрзлого грунта ($H_{обр}$);
- температура образца мёрзлого грунта (по данным термометрии) ($T_{обр}$);
- масса воды в теплоизолированной ёмкости ($m_в$);
- температура воды в теплоизолированной ёмкости ($T_{в.н.}$).

В процессе оттаивания и разрушения частицы грунта проходят сквозь ячейки сетчатого стакана и оседают на дно ёмкости. Испытание проводится до полного разрушения образца либо до прекращения изменения массы образца в воде (при изменении массы образца в воде менее чем на 1 г за 5 мин), что характерно для мёрзлых глин и мёрзлых грунтов с содержанием органики более 10%. Изменение веса образца в процессе его разрушения фиксируется с помощью весов с точностью до 1 г. Температурой воды в ёмкости в конце испытания ($T_{в.к.}$) является температура воды, при которой прекратилось разрушение образца.

В процессе испытания в журнал с интервалом замеров 1 минута для супесчано-песчаных пород и 5 минут для суглинков, глин, льда и грунтов с содержанием органики более 10% заносят:

- текущее время испытания (τ_i);
- температуру воды в ёмкости на данном временном интервале ($T_{в.i}$);
- вес образца в конце данного временного интервала (m_i).

После проведения испытания весь оттаявший грунт и грунт, оставшийся в сетчатом стакане (при его наличии), собирают для определения влажности.

Если начальная температура воды в ёмкости отличалась от температуры воздуха более чем на 2°С или время проведения испытаний превысило 1 час, то по окончании испытаний ёмкость вновь заполняют водой при той же температуре и производят замер изменения температуры воды в ёмкости без образца в течение времени проведения испытаний с образцом. По этим данным производят поправку на количество тепла прошедшего через стенки ёмкости в ходе испытаний. Записывают изменения температуры воды ΔT_i (2.2) (через те же временные интервалы, что и в испытании с образцом). По формуле 2.3 вычисляют откорректированную температуру с учётом влияния окружающей среды на температуру воды в ёмкости для каждого интервала времени ($T_{в.н.i}$).

$$\Delta T_i = T_{в.i} - T_n, \quad (2.2)$$

где: T_n – температура воды в ёмкости в начале температурных замеров воды без образца.

$$T_{в.н.i} = T_{в.i} - \Delta T_i, \quad (2.3)$$

В журнал испытаний заносят следующие данные:

- изменение температуры воды в ёмкости на данном временном интервале (ΔT_i);
- изменение температуры воды в ёмкости с учётом влияния окружающей среды для каждого интервала времени ($T_{в.н.i}$);
- время проведения испытания ($\tau_{исп}$);
- масса оставшегося в сетчатом стакане грунта (при его наличии) ($m_{ост}$);
- температура воды в ёмкости на момент полного разрушения образца (либо прекращения его разрушения) с учётом влияния окружающей среды ($T_{в.к}$);
- плотность образца мёрзлого грунта;
- масса оттаявшего и прошедшего через сетчатый стакан грунта ($m_{разр}$).

Таблица 2.4

Журнал определения удельной скорости и удельной теплоты разрушения мёрзлого грунта

Дата и время проведения испытания:				
Геологическое описание образца:				
$h_{отб} = \text{_____} (мм)$		$\tau_{исп} = \text{_____} (мин.)$		
$m_{обр} = \text{_____} (г)$		$m_{ост} = \text{_____} (г)$		
$D_{обр} = \text{_____} (мм)$		$T_{в.к.} = \text{_____} (°C)$		
$H_{обр} = \text{_____} (мм)$		$\nu_T = \text{_____} (м/(°C \cdot ч))$		
$T_{обр} = \text{_____} (°C)$		$q_{np} = \text{_____} (Дж/м³)$		
$\rho_{обр} = \text{_____} (кг/м³)$		$W = \text{_____} (\%)$		
$m_в = \text{_____} (г)$		$m_{разр} = \text{_____} (г)$		
$T_{в.н.} = \text{_____} (°C)$				
$\tau_i, мин.$	$T_{в.i}, °C$	$m_i, г$	$\Delta T_i, °C$	$T_{в.н.i}, °C$

Приведённую скорость разрушения вертикальной поверхности мёрзлого образца грунта в воде для каждого интервала времени необходимо определять по формуле 2.4:

$$\nu_{Ti} = \frac{\sqrt{\frac{m_i}{(\rho_{обр} - \rho_в) \cdot \pi \cdot H_{обр}}} - \sqrt{\frac{m_{i+1}}{(\rho_{обр} - \rho_в) \cdot \pi \cdot H_{обр}}}}{T_{ср.в.i} \cdot \tau_i}, \quad (2.4)$$

где ν_{Ti} – приведённая скорость разрушения вертикальной поверхности мёрзлого грунта в воде для интервала между ближайшими замерами $\left(\frac{м}{°C \cdot ч}\right)$; $T_{ср.в.i}$ – средняя температура воды в ёмкости за единичный интервал между замерами ($°C$); τ_i – единичный интервал между замерами (ч).

Приведённая скорость разрушения вертикальной поверхности мёрзлого грунта в воде (ν_T) рассчитывается по формуле 2.5.

$$v_T = \frac{v_{T_i} + v_{T_{i+1}} + \dots + v_{T_n}}{n - 2}, \quad (2.5)$$

где: i – номер замера, начиная с 3-его и заканчивая замером, соответствующим разрушению половины образца (n) (момент, когда вес образца в воде станет 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 мёрзлого грунта (q_{np}) под воздействием тепловой энергии воды определяют по формуле 2.6, полученной из уравнения теплового баланса:

$$q_{np} = \frac{c_v \cdot m_v \cdot (T_{в.н.} - T_{в.к.})}{m_{разр}} - T_{в.к.} (c_{ск.г.} \cdot (1 - W) + c_v \cdot W) + c_z \cdot T_{обр.}, \quad (2.6)$$

где: q_{np} – удельная теплота разрушения мёрзлого грунта $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}\right)$; c_v – удельная теплоёмкость воды $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}\right)$ (принимается $c_v = 4190 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$); m_v – масса воды в ёмкости (кг); $T_{в.н.}$ – начальная температура воды в ёмкости ($^\circ\text{C}$); $T_{в.к.}$ – температура воды в ёмкости в конце испытания (момент полного разрушения образца либо прекращения изменения массы образца в воде (при изменении массы образца в воде менее чем на 1 г за 5 мин)) ($^\circ\text{C}$); $m_{разр}$ – масса оттаявшего и прошедшего сквозь сетчатый стакан грунта (кг); $T_{обр.}$ – температура образца в начале испытания ($^\circ\text{C}$) (по данным термометрии); $c_{ск.г.}$ – удельная теплоёмкость минерального скелета грунта (для песка – 0,71; супеси – 0,75; суглинка – 0,80; пылеватого глинистого грунта – 0,84; глины – 0,92) $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}\right)$; $c_z = c_{ск.г.} \cdot (1 - W) + c_l \cdot W$ – удельная теплоёмкость

грунта $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}\right)$; $c_{\text{л}}$ – удельная теплоёмкость льда $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}\right)$ (принимается

$c_{\text{л}} = 2090 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$); W – влажность грунта.

Влажность грунта определяется путём высушивания оттаявшего грунта до постоянной массы по формуле 2.7.

$$W = \frac{m_{\text{обр}} - m_{\text{сух}}}{m_{\text{обр}}}, \quad (2.7)$$

где: $m_{\text{сух}}$ – масса высушенного грунта (разрушившегося и не разрушившегося), отобранного из ёмкости (кг).

В журнал испытаний (таблица 2.4) заносят значения v_{T} , q_{np} и W . Данные параметры определяют для каждого геологического элемента массива, а затем используют для определения параметров создания и прогнозирования развития подземного резервуара.

Данная методика была утверждена в ООО «Газпром» в 2013 году. Текст утверждённой методики определения приведённой скорости и удельной теплоты водно-теплого разрушения мёрзлого грунта в полевых условиях представлен в приложении 1.

С целью проверки методики определения приведённой скорости и удельной теплоты разрушения мёрзлого грунта в воде были произведены испытания кернового материала. Работы производились на второй скважине куста газовых скважин № 13 Бованенковского НГКМ. Выбуриваемый керн испытывали сразу после подъёма из скважины (рисунок 2.19 – 2.21). Было испытано 4 образца, по одному из каждого инженерно-геологического элемента (ИГЭ).



Рисунок 2.19 – Выбуренный керн



Рисунок 2.20 – Керновый материал



Рисунок 2.21 – Процесс проведения испытаний

Полученные результаты совпадают с лабораторными исследованиями (таблица 2.5)

Таблица 2.5

Результаты определения приведённой скорости и удельной теплоты разрушения многолетнемёрзлых грунтов в воде в полевых условиях

Порода	Глубина/интервал ИГЭ (м)	Приведённая скорость разрушения ММП (м/(ч·°С))	Удельная теплота разрушения ММП (кДж/кг)
Песок серый пылеватый	23 / 20,7 – 25,2	0,015	133,2
Песок серый с содержанием органики 30% (растительный детрит)	29 / 25,2 – 31,7	0,004	82
Песок разнотернистый с включениями древесины, гальки, щебня и органики	32,8 / 31,7 – 32,9	0,011	85
Песок серый пылеватый с включениями гравия	37,5 / 32,9 – 38,5	0,015	102

ГЛАВА 3 – ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА РАЗВИТИЕ ФОРМЫ ПОДЗЕМНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ

3.1 Влияние основных технологических параметров на развитие геометрии подземных резервуаров

Основными технологическими параметрами создания подземных резервуаров являются: глубины кровли и дна подземного резервуара, уровень подачи теплоносителя (подогретой воды), расход и температура подачи теплоносителя (воды), уровень воды в подземном резервуаре в процессе его

создания (на каждом этапе создания резервуара свой уровень воды), количество этапов размыва.

Изменяя уровень воды в подземном резервуаре, производительность подачи теплоносителя (воды) и его температуру в процессе создания резервуара, производят управление его развитием. Правильный подбор параметров создания подземных резервуаров позволит создавать камеры с необходимыми объёмом и формой.

Интервал создания подземного резервуара выбирается согласно условию размещения в нём устойчивой в данных геологических условиях выработки ёмкости с необходимым объёмом.

Отбор оттаявшего грунта производится на глубине проектируемого дна резервуара. Уровень подачи теплоносителя находится, согласно применяемой технологии, на 2 метра выше дна резервуара (точки отбора пульпы). Такой разнос точек подачи теплоносителя и отбора водно-грунтовой смеси необходим для минимизации гидравлической связи между ними и уменьшения тепловых потерь.

Уровень воды в подземном резервуаре определяет высоту и площадь контакта теплоносителя (воды) со стенками резервуара (скважины), а следовательно поверхность, по которой идет оттаивание с последующим разрушением. Оперирова уровнем воды в подземном резервуаре в процессе его создания, мы напрямую управляем развитием формы. В принятой технологии строительства подземных резервуаров уровень воды в процессе размыва подземного резервуара ступенчато повышают до его кровли.

Диаметр резервуара определяется временем взаимодействия поверхности мёрзлого массива с водой и средней температурой воды у стенки резервуара. Плавное изменение положения уровня воды формирует более сглаженную форму, чем ступенчатое. Однако в целях упрощения процесса создания подземных резервуаров принято ступенчатое изменение уровня воды.

За счёт изменения производительности подачи теплоносителя (воды) и его температуры управляют подачей тепла в резервуар. Количество подаваемого тепла влияет на температуру воды в подземном резервуаре, на скорость разрушения его стенок, а также на распределение температуры воды вдоль стенки резервуара по вертикали, что описано в следующем разделе.

Размыв подземного резервуара можно вести как с повышением уровня воды, так и с его понижением. Недостатком второго варианта является то, что на заключительном этапе строительства из-за низкого коэффициента затопления и значительного объёма резервуара, заполненного сжатым воздухом, достаточно сложно поддерживать стабильный выход оттаявшей водно-грунтовой смеси. При больших газопроявлениях пустой подземный резервуар может аккумулировать значительный объём метана, что увеличивает риск взрыва. Первый же вариант исключает эти недостатки и позволяет сразу после окончания строительства подземного резервуара провести в нём звуколокационную съёмку.

3.2 Влияние температуры и производительности подачи теплоносителя на распределение температуры воды по высоте подземного резервуара

Особенностью пресной воды является тот факт, что при температуре 4°C её плотность максимальна. Когда средняя температура воды в подземном резервуаре становится меньше 4°C , наблюдается явление, называемое обратной температурной стратификацией: в нижней части концентрируется самая плотная и тёплая вода с температурой 4°C . После того как средняя температура опускается ниже 3°C , в нижней части резервуара температура начинает опускаться.

Данные лабораторных и натурных исследований показывают, что температурная стратификация воды устанавливается в соответствии с распределением плотностей по вертикали и практически не меняется в радиальном направлении. Такое же распределение по плотности (только в

данном случае плотность зависит от засоленности воды) характерно и при создании подземных резервуаров в соляных массивах также создаваемых способом скважинной гидродобычи, что было доказано в ходе лабораторных и натуральных экспериментов, а также с помощью численных методов.

Анализ опыта создания подземных резервуаров в многолетнемёрзлых породах показал (рисунок 3.1), что развитие подземного резервуара зависит от распределения температуры по его высоте, при этом в однотипных многолетнемёрзлых породах, находящихся в одинаковых условиях, при средней температуре воды в подземном резервуаре выше 4°C , поверхность подземного резервуара оттаивает и разрушается равномерно по всей высоте, а при средней температуре воды ниже 4°C , интенсивнее оттаивает нижняя часть подземного резервуара.

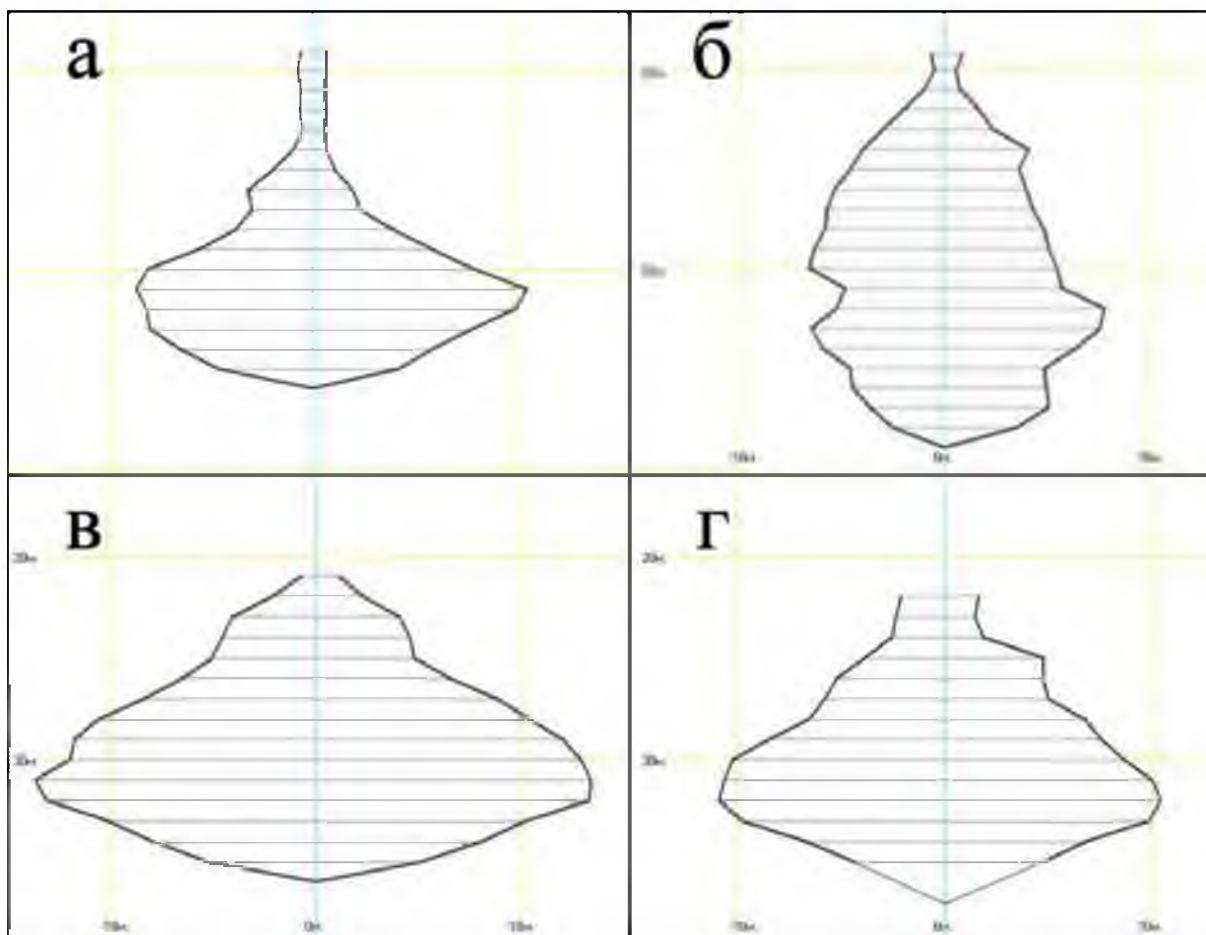


Рисунок 3.1 – Вертикальные контуры подземных резервуаров, построенных на Бованенковском месторождении

На рисунке 3.1 представлены контуры нескольких построенных в 2012-2013 годах подземных резервуаров. В работе производится их сравнение, так как параметры их создания и геологические условия были подобны. Их создание велось в 3 этапа размыва в пласте многолетнемёрзлых песчаных пород. На первом этапе уровень воды поддерживался на уровне 3-4 м от дна резервуара, на втором – на уровне 9-10 м, на третьем этапе уровень воды поддерживался на уровне кровли подземного резервуара. Параметры создания подземных резервуаров были определены с помощью программы RZ Version 2.1 (программа для расчёта полостей в соляных массивах способом скважинной гидродобычи). Из рисунка видно, что формы подземных резервуаров А, В и Г имеют расширение в нижней части (с учётом угла естественного откоса 20 – 35 °). В эти резервуары вода подавалась с карты намыва без её дополнительного подогрева. В результате этого, средняя температура в резервуарах во время их создания была низкая, а самая тёплая вода концентрировалась в нижней части. В результате, практически на весь период строительства в них установилась обратная температурная стратификация воды по вертикали (в нижней части вода была теплее, чем в верхней). Напротив, в процессе создания резервуара Б использовалась пароподающая установка, которая подогревала подаваемую в резервуар оборотную воду. Можно предположить, что вследствие этого средняя температура в резервуаре значительный промежуток времени составляла значение больше 4°C. Это соответствующим образом отразилось на распределении температур по высоте резервуара и на его форме: верхняя часть была проработана лучше, чем в первых трёх резервуарах. Расстояние между резервуарами А и Б равнялось 50 м, что свидетельствует о практически одинаковых геологических условиях строительства.

Из анализа результатов строительства можно сделать вывод о значительном влиянии температурной стратификации воды на развитие формы подземных резервуаров в мёрзлых осадочных породах. Сама температурная

стратификация воды в резервуаре зависит от среднего значения температуры воды в нём.

Результаты лабораторных исследований по созданию объёмных моделей резервуаров в блоках мёрзлых грунтов, описанных ранее в пунктах 2.2.1 и 2.2.2 также подтверждают данную особенность распределения температур в подземном резервуаре и её влияние на развитие камеры. При недостатке подаваемого тепла средняя температура в образующейся камере опускалась ниже 4°C . В результате самая тёплая вода концентрировалась в нижней части, а холодная – в верхней, что соответствующим образом влияло на развитие камеры. При избытке подаваемого тепла средняя температура в камере поднималась выше 4°C и самая тёплая вода ($10-14^{\circ}\text{C}$) оказывалась сверху, а в нижней части температура воды не превышала $5-7^{\circ}\text{C}$. При этом замеряемая температура в разных точках на одном уровне по горизонтали в моделируемой камере была практически одинакова. Расхождения составляли не более $0,2^{\circ}\text{C}$.

Чтобы описать распределение температуры воды в ёмкости, где происходит процесс оттаивания и разрушения поверхности мёрзлого грунта, была подготовлена следующая лабораторная модель. В теплоизолированную ёмкость объёмом 220 л с водой температурой $3,7^{\circ}\text{C}$ был помещен образец с формой прямого параллелепипеда, размерами $400 \times 200 \times 80$ мм (рисунок 3.2). Температура образца была равна минус 5°C . В процессе его оттаивания и разрушения замерялась температура воды по высоте. Термопару перемещали по вертикали с помощью ползунка, на 5 см отстоящего от плоскости мёрзлого песчаного образца. В процессе его разрушения температура воды в ёмкости понижалась, что определённым образом влияло на распределение температуры воды.

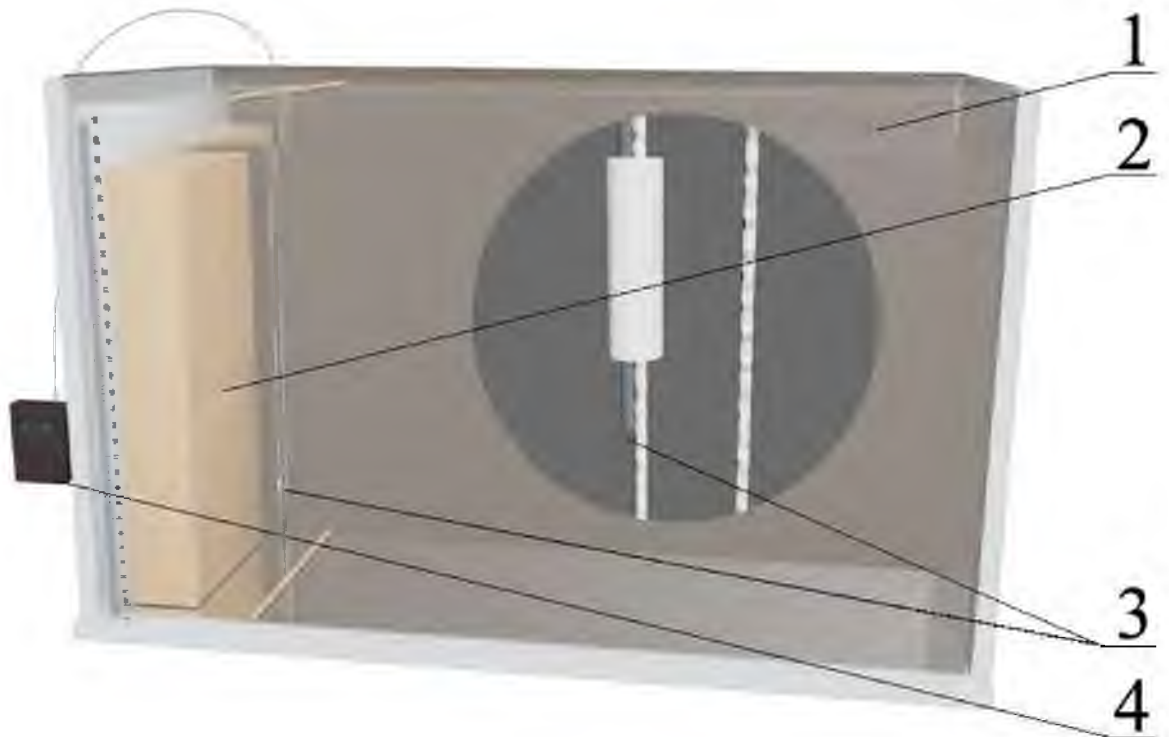


Рисунок 3.2 – Установка по определению распределения температуры воды по вертикали: 1 – теплоизолированный аквариум; 2 – образец мёрзлого песка; 3 – термопара; 4 – электронный термометр

Графики, отображающие зависимость распределения температуры воды по высоте аквариума от её среднего значения, представлены на рисунке 3.3. 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.

$$T_{hi} = k_1 \cdot \sqrt[3]{h - k_2} + k_3, \quad (3.1)$$

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

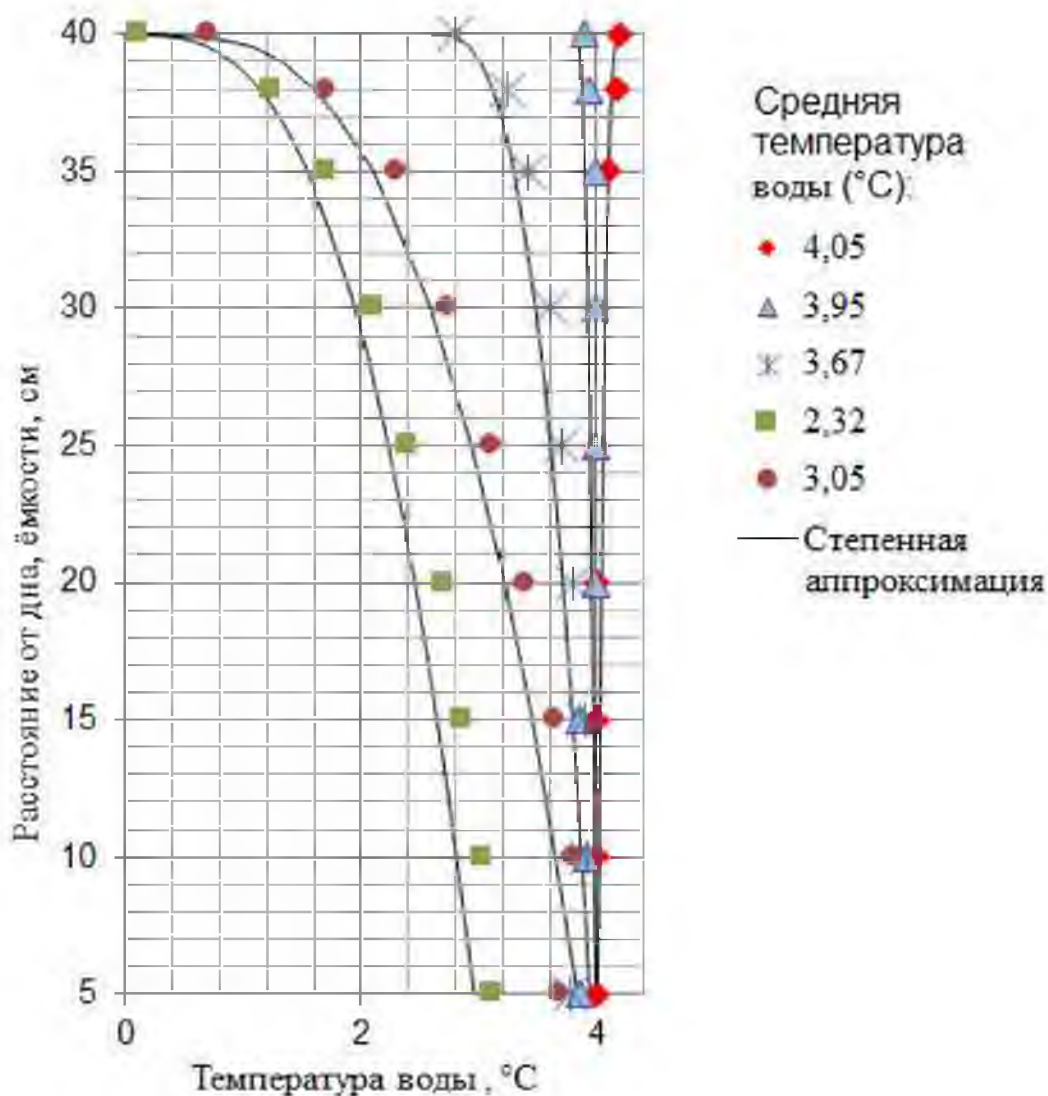


Рисунок 3.3 – Графики зависимости температуры воды от глубины при разных средних температурах воды

Как видно из графиков, при средней температуре воды равной 4°C по всей высоте ёмкости, значение температуры воды практически не отклоняется от значения 4°C , а при понижении средней температуры воды, верхняя часть графика изменения температуры с высотой смещается к нулевой отметке, а сам график начинает принимать форму степенной функции. При достижении температуры воды в верхней точке значения, близкого к 0°C , при дальнейшем понижении температуры происходит смещение всего графика распределения температуры воды по высоте в сторону меньшей температуры. Отклонение температуры воды в сторону меньшего её значения в нижней части ёмкости связано с влиянием холодного оседающего грунта.

На основании анализа натуральных, экспериментальных и литературных данных для инженерного расчёта параметров создания подземных резервуаров в многолетнемёрзлых осадочных породах были выделены 3 расчётные зоны, каждую из которых можно описать своим эмпирическим уравнением распределения температур по высоте подземного резервуара. В качестве функции, которая наилучшим образом описывает распределение температуры воды по высоте, была принята степенная функция (рисунок 3.4).

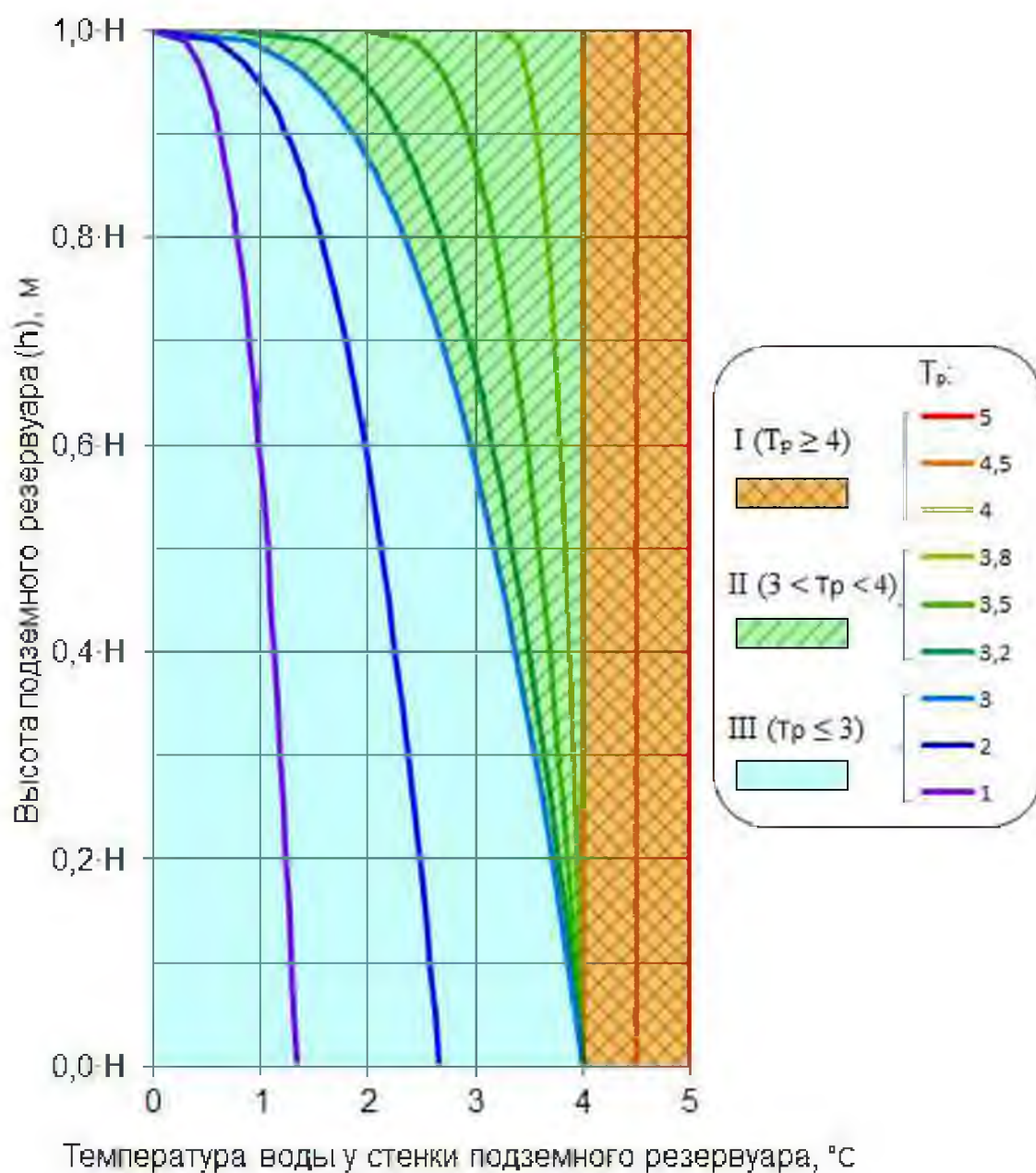


Рисунок 3.4 – Графики распределения температуры воды с глубиной в зависимости от её среднего значения

1 область:

В первой области средняя температура воды в резервуаре (T_p) изменяется в пределах от 4°C до T_v (температуры подаваемой воды, $^\circ\text{C}$).

В данной области температура воды с высотой резервуара ($T_{h.i}$) практически не изменяется ввиду её активного перемешивания по всему объёму. Это связано с соразмерностью величины объёма подземного резервуара на начальной стадии с производительностью подачи оборотной воды. При существующей технологии создания подземных резервуаров на данную область приходится первые часы их строительства. Так как средняя температура воды в резервуаре достаточно быстро опускается ниже 4°C , то влияние такого распределения температуры на общее развитие резервуара минимально (рисунок 4.5).

$$T_{h.i} = T_p \quad (3.2)$$

Температура отбираемой со дна подземного резервуара водно-песковой смеси (T_n) принимается равной температуре подаваемой воды: $T_n = T_p$.

2 область:

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

Закон распределения температуры воды с высотой в этой области:

$$T_{h.i} = 4 \cdot \left(1 + (T_p - 4) \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{h_i}{H_{cm}} - 1} + 1 \right) \right), \quad (3.3)$$

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

Температура отбираемой со дна подземного резервуара водно-песковой смеси равна температуре 4°C : $T_n = 4^\circ\text{C}$.

3 область:

В третьей области T_p изменяется в пределах от 0 до 3°C . Закон распределения температуры воды с высотой в этой области:

$$T_{h,i} = \frac{4}{3} \cdot T_p \sqrt[3]{1 - \frac{h_i}{H_{cm}}} \quad (3.4)$$

Температура отбираемой со дна подземного резервуара водно-песковой смеси равна:

$$T_n = 1 \frac{1}{3} T_p \quad (3.5)$$

3.3 Выводы по главе

Лабораторные и натурные эксперименты показали влияние температурной стратификации воды на развитие формы подземного резервуара. Установлено, что при средней температуре воды в подземном резервуаре, создаваемом в мёрзлых песчано-глинистых породах, 4–10°C, он принимает цилиндрическую форму, что соответствует равенству температуры воды по высоте резервуара, а при средней температуре воды 0–4°C, с опережением развивается его нижняя часть, что связано с образованием в ней зоны повышенной температуры воды, обладающей более высокой плотностью.

На распределение температуры воды по вертикали влияет средняя температура воды в резервуаре, на которую в свою очередь влияет температура и расход подаваемого теплоносителя, теплофизические характеристики массива, а также объём резервуара и площадь оттаиваемой поверхности.

ГЛАВА 4 – МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СОЗДАНИЯ ПОДЗЕМНОГО РЕЗЕРВУАРА

4.1 Методика определения параметров создания подземного резервуара

Предлагаемая методика определения технологических параметров создания подземных резервуаров основана на расчёте теплового баланса.

Суммарное тепло, вносимое в подземный резервуар ($\sum Q_{вн}$), должно быть равно сумме тепловых затрат в процессе его создания и изменению теплосодержания воды в резервуаре ($\sum Q_{затрат}$).

$$\sum Q_{вн} = \sum Q_{затрат}. \quad (4.1)$$

Перед расчётом параметров создания подземного резервуара на основе геологических данных, физических свойств и производственных нужд определяют его необходимый объём и форму. Форма подземного резервуара должна соответствовать критериям устойчивости в конкретных геологических условиях. После этого по предлагаемой методике определяют параметры создания подземного резерва для каждого этапа размыва: расход и температура подаваемого в резервуар теплоносителя (воды), уровень воды в резервуаре, которые позволят достичь заданной формы.

Расчёт динамики развития подземного резервуара и определения параметров его создания состоит из цикла последовательных шагов (рисунок 4.1).

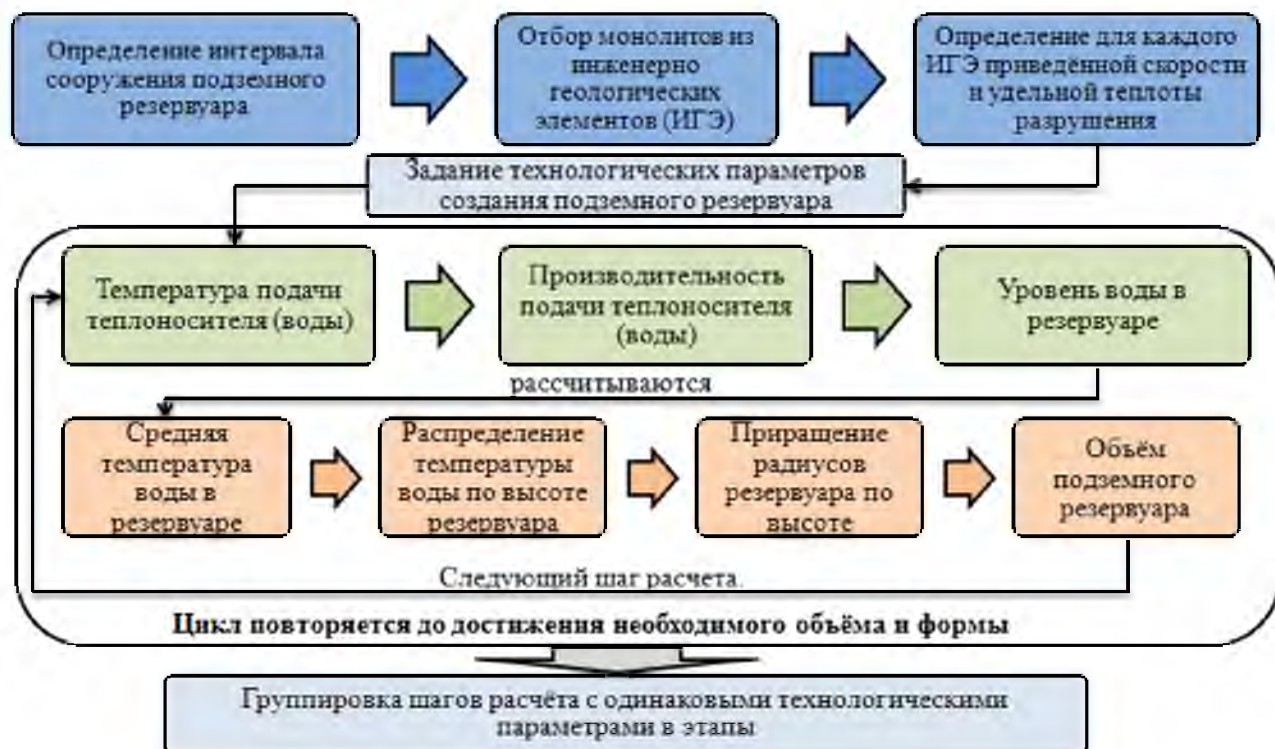


Рисунок 4.1 – Блок-схема расчёта развития подземного резервуара и определения параметров его создания

Перед расчётом задаётся величина разбиения массива грунта, вмещающего резервуар, по высоте.

Алгоритм расчёта:

1. Задаются постоянные технологические параметры: высота резервуара H (м), радиус технологической скважины, через которую будет вестись размыв резервуара ($r_{ск}$), значения приведённых скоростей (v_{Ti}) и удельной теплоты ($q_{прi}$) разрушения мёрзлых грунтов по высоте интервала строительства (h_i) для различных ИГЭ, уровень дна подземного резервуара (h_0) (рисунок 4.2).

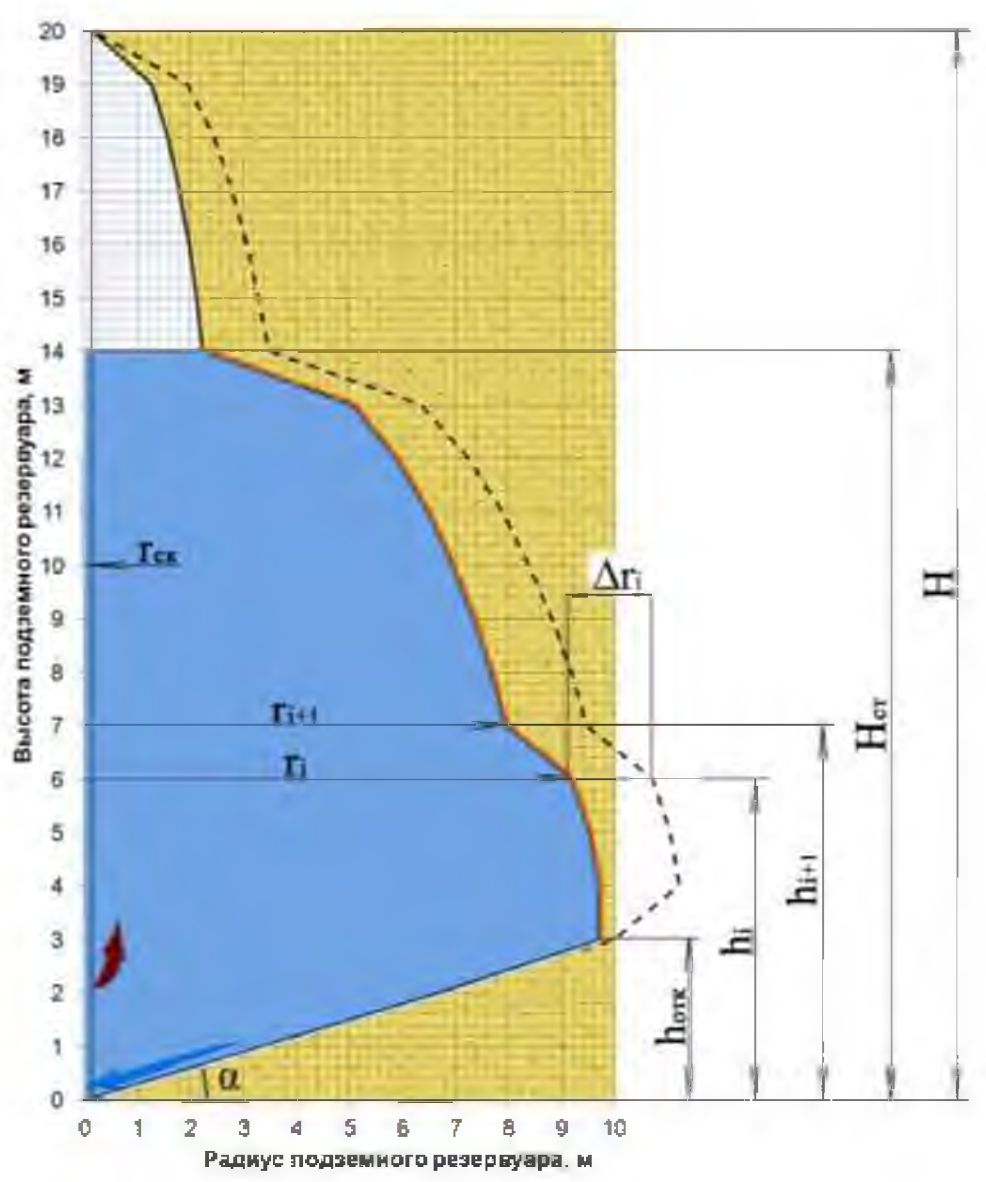


Рисунок 4.2 – Расчётный контур подземного резервуара на промежуточном этапе строительства

2. Для каждого расчётного шага длительностью $\tau_{ин}$ задают технологические параметры, с помощью которых формируют подземный резервуар необходимого объёма и формы:

- высота уровня воды ($H_{см}$) относительно дна выработки (м);
- расход P_e (м³/ч) и температура подаваемой оборотной воды T_e (°C);

3. Рассчитывается объём воды в резервуаре с учётом высоты её уровня в резервуаре по формуле 4.2.

$$V = \frac{\pi}{3} \cdot \sum \left((h_i - h_{i+1}) \cdot (r_i^2 + r_i \cdot r_{i+1} + r_{i+1}^2) \right), \quad (4.2)$$

для h_i от $h_0 = 0$ до $h_{см}$,

где: h_i и h_{i+1} – отметка высоты резервуара и следующая за ней через единичный интервал разбиения отметка высоты (м); r_i и r_{i+1} – соответствующие этим отметкам радиусы.

На первом расчётном шаге r_i и r_{i+1} равняются радиусу скважины $r_{ск}$.

4. Рассчитывают площадь оттаиваемой поверхности подземного резервуара (м²) по формуле 4.3.

$$S = \sum S_i, \quad \text{где } S_i = \pi(r_i + r_{i+1}) \cdot (h_i - h_{i+1}). \quad (4.3)$$

для h_i от $h_{отк}$ до $h_{см}$,

где: $h_{отк}$ – отметка по высоте резервуара, где пересекается контур откоса его дна (соответствующий углу естественного откоса влажного грунта в донной части резервуара) с расчётным контуром подземного резервуара.

5. Из уравнения теплового баланса рассчитывается средняя температура воды в резервуаре (4.4).

$$Q_{вод} + Q_{т.в.н} = Q_{н.м.} + Q_{разр.} + Q_{н.тал.} + Q_{пот.м.} + Q_{отк.} + Q_{т.в.к.} \quad (4.4)$$

$Q_{вод}$ – количество тепла (Дж), вводимое в резервуар путём подачи воды с расходом P_e (м³) и температурой T_e (°C) за время шага $\tau_{ин}$;

$$Q_{\text{ввод}} = c_v \cdot \rho_v \cdot P_v \cdot T_v \cdot \tau_{ш}, \quad (4.5)$$

где: c_v – удельная теплоёмкость воды $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}\right)$; ρ_v – плотность воды $\left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}\right)$;
 T_v – температура подаваемой в резервуар воды ($^\circ\text{C}$); P_v – расход подаваемой в резервуар воды $\left(\frac{\text{м}^3}{\text{ч}}\right)$.

$Q_{\text{т.в.н}}$ – теплосодержание воды, находящейся в резервуаре на начало расчётного шага (Дж);

$$Q_{\text{т.в.н}} = c_v \cdot \rho_v \cdot V_n \cdot T_{p.n}, \quad (4.6)$$

где: V_n и $T_{p.n}$ – объём (м^3) и средняя температура воды ($^\circ\text{C}$) в резервуаре в начале расчётного шага (в конце предыдущего расчётного шага).

$Q_{\text{н.м.}}$ – количество тепла, затрачиваемое на нагрев мёрзлого массива до талого состояния (Дж),

$$Q_{\text{н.м.}} = \Pi \cdot c_z \cdot \rho_z \cdot (-T_m) \cdot \tau_{ш}, \quad (4.7)$$

где: Π – производительность разрушения мёрзлой породы в воде $\left(\frac{\text{м}^3}{\text{ч}}\right)$;

c_z – средняя удельная теплоёмкость массива мёрзлых грунтов в интервале создания подземного резервуара $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}\right)$; ρ_z – средняя плотность массива

мёрзлых грунтов в интервале создания подземного резервуара $\left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}\right)$;

T_m – средняя температура массива мёрзлых грунтов в интервале создания подземного резервуара ($^\circ\text{C}$);

$$\Pi = \nu_T \cdot T_p \cdot S, \quad (4.8)$$

где: ν_T – средняя приведённая скорость разрушения вертикальной поверхности массива мёрзлых грунтов в воде в интервале создания подземного

резервуара $\left(\frac{M}{^{\circ}C \cdot ч}\right)$; T_p – средняя температура воды в резервуаре ($^{\circ}C$); S – суммарная площадь оттаиваемой вертикальной поверхности резервуара (m^2);

$Q_{разр.}$ – количество тепла, расходуемого на разрушение мёрзлого грунта при тепловом воздействии воды, заполняющей подземный резервуар (Дж),

$$Q_{разр.} = \Pi \cdot q_{пр} \cdot \rho_z \cdot \tau_{ш}, \quad (4.9)$$

где: $q_{пр}$ – удельная теплота разрушения мёрзлого грунта под воздействием

тепловой энергии воды $\left(\frac{Дж}{кг}\right)$;

$Q_{н.тал.}$ – количество тепла, расходуемого на нагрев оттаявшего грунта (Дж),

$$Q_{н.тал.} = Q_{н.в.} + Q_{н.т.}, \quad (4.10)$$

где: $Q_{н.в.}$ – количество тепла, расходуемого на нагрев воды, содержащейся в оттаявшем грунте (Дж),

$$Q_{н.в.} = \Pi \cdot c_v \cdot \rho_v \cdot T_p \cdot W \cdot \tau_{ш}, \quad (4.11)$$

где: W – общая влажность грунта,

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0}, \quad (4.12)$$

где: m_1 – масса влажного грунта с бюксой; m_2 – масса высушенного грунта с бюксой; m_0 – масса бюксы.

$Q_{н.т.}$ – количество тепла, расходуемого на нагрев твёрдой составляющей оттаявшего грунта без воды (Дж),

$$Q_{н.т.} = \Pi \cdot c_{ч.г.} \cdot \rho_{ч.г.} \cdot T_p \cdot (1 - W) \cdot \tau_{ш}, \quad (4.13)$$

где: $c_{ч.г.}$ – средняя удельная теплоёмкость минерального скелета мёрзлых

грунтов в интервале создания подземного резервуара $\left(\frac{Дж}{кг \cdot K}\right)$; $\rho_{ч.г.}$ – средняя

плотность минерального скелета мёрзлых грунтов в интервале создания подземного резервуара $\left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}\right)$.

$Q_{\text{пот.м.}}$ – количество тепла, уходящее в массив (Дж),

$$Q_{\text{пот.м.}} = \lambda \cdot S \cdot (-T_m) \cdot \tau_{\text{ш}}, \quad (4.14)$$

где: λ – средний коэффициент теплопроводности массива мёрзлых грунтов в интервале создания подземного резервуара $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град}}\right)$.

Оттаявший грунт оседает на дне, образуя угол естественного откоса. Оттаявший грунт на дне выработки играет роль естественной теплоизоляции и препятствует оттаиванию и разрушению грунта ниже. В расчёте это учтено следующим образом: при достижении стенки резервуара угла естественного откоса, дальнейшее разрушение в этой области прекращается и отвод тепла в этой зоне снижается.

$Q_{\text{отк.}}$ – количество тепла, отводимого из подземного резервуара при подъёме водно-песковой смеси (Дж).

$$Q_{\text{отк.}} = (c_v \cdot \rho_v \cdot (P_v - \Pi \cdot (2 - W)) + c_{\text{ч.з.}} \cdot \rho_{\text{ч.з.}} \cdot \Pi \cdot (1 - W)) \cdot T_n \cdot \tau_{\text{ш}}, \quad (4.15)$$

где: T_n – температура отбираемой из подземного резервуара водно-песковой смеси ($^{\circ}\text{C}$).

$Q_{\text{т.в.к.}}$ – теплосодержание воды, находящейся в резервуаре в конце расчётного шага (Дж),

$$Q_{\text{т.в.к.}} = c_v \cdot \rho_v \cdot V_n \cdot T_p + c_v \cdot \rho_v \cdot \Pi \cdot T_p \cdot \tau_{\text{ш}}, \quad (4.16)$$

Приведя уравнение теплового баланса к виду квадратного уравнения (4.17, 4.18), получаем:

$$a \cdot T_p^2 + b \cdot T_p + c = 0, \quad (4.17)$$

$$T_p = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a} \quad (4.18)$$

где:

для первой области распределения температур:

$$a = \nu_T \cdot S \cdot \tau_{ш} \cdot (c_{\epsilon} \cdot \rho_{\epsilon} \cdot (2 \cdot W - 1) + 2 \cdot c_{\epsilon,2} \cdot \rho_{\epsilon,2} \cdot (1 - W)), \quad (4.19)$$

$$b = \nu_T \cdot S \cdot \tau_{ш} \cdot (q_{np} - c_{\epsilon} \cdot \rho_{\epsilon} \cdot T_M) + c_{\epsilon} \cdot \rho_{\epsilon} \cdot (P_{\epsilon} \cdot \tau_{ш} + V_H), \quad (4.20)$$

$$c = -(c_{\epsilon} \cdot \rho_{\epsilon} \cdot (P_{\epsilon} \cdot T_{\epsilon} \cdot \tau_{ш} + V_H \cdot T_{p,n}) + \lambda \cdot S \cdot T_M \cdot \tau_{ш}), \quad (4.21)$$

для второй области распределения температур:

$$a = \nu_T \cdot S \cdot \tau_{ш} \cdot (c_{\epsilon} \cdot \rho_{\epsilon} \cdot (1 + W) + c_{\epsilon,2} \cdot \rho_{\epsilon,2} \cdot (1 - W)), \quad (4.22)$$

$$b = \nu_T \cdot S \cdot \tau_{ш} \cdot (q_{np} - c_{\epsilon} \cdot \rho_{\epsilon} \cdot T_M - 4 \cdot c_{\epsilon} \cdot \rho_{\epsilon} \cdot (2 - W) + 4 \cdot c_{\epsilon,2} \cdot \rho_{\epsilon,2} \cdot (1 - W)) + c_{\epsilon} \cdot \rho_{\epsilon} \cdot (4 \cdot T_{\epsilon} - 2), \quad (4.23)$$

$$c = c_{\epsilon} \cdot \rho_{\epsilon} \cdot (P_{\epsilon} \cdot \tau_{ш} \cdot (4 - T_{\epsilon}) - V_H \cdot T_{p,n}) - \lambda \cdot S \cdot T_M \cdot \tau_{ш}), \quad (4.24)$$

для третьей области распределения температур:

$$a = \nu_T \cdot S \cdot \tau_{ш} \cdot \left(c_{\epsilon} \cdot \rho_{\epsilon} \cdot \left(2 \frac{1}{3} W - 1 \frac{2}{3} \right) + 2 \frac{1}{3} c_{\epsilon,2} \cdot \rho_{\epsilon,2} \cdot (1 - W) \right), \quad (4.25)$$

$$b = \nu_T \cdot S \cdot \tau_{ш} \cdot (q_{np} - c_{\epsilon} \cdot \rho_{\epsilon} \cdot T_M) + c_{\epsilon} \cdot \rho_{\epsilon} \cdot \left(1 \frac{1}{3} P_{\epsilon} \cdot \tau_{ш} + V_H \right), \quad (4.26)$$

$$c = -(c_{\epsilon} \cdot \rho_{\epsilon} \cdot (P_{\epsilon} \cdot T_{\epsilon} \cdot \tau_{ш} + V_H \cdot T_{p,n}) + \lambda \cdot S \cdot T_M \cdot \tau_{ш}), \quad (4.27)$$

Если получаемая средняя температура (T_p), при подстановке в формулу 4.18 значения a , b и c , рассчитанные по формулам 4.19-4.21, принимает значение 4–10°C, то она принимается за истинную. Если нет, то она (T_p) рассчитывается с использованием переменных a , b и c , значения которых получены по формулам 4.22-4.24. 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 4.25-4.27.

Средние значения параметров, характеризующих свойства массива мёрзлых грунтов в интервале создания подземного резервуара определяются по формуле 4.28.

$$X = X_j \frac{h_{ИГЭj}}{H_{cm}} + X_{j+1} \frac{h_{ИГЭ(j+1)}}{H_{cm}} + \dots + X_{j+n} \frac{h_{ИГЭ(j+n)}}{H_{cm}}, \quad (4.28)$$

где X – среднее значение параметра, характеризующего свойства массива мёрзлых грунтов в интервале создания подземного резервуара; j от 1 до n – представительные интервалы (отличающиеся по составу или структуре пропластки породы); $h_{ИГЭ}$ – мощность инженерно-геологического элемента.

6. Вычисляется температура воды для каждого единичного интервала по высоте резервуара ($T_{h.i}$).

Если $T_p \geq 4^\circ\text{C}$, то значения $T_{h.i}$ вычисляются по формуле 4.29.

$$T_{h.i} = T_p \quad (4.29)$$

Если $3 < T_p < 4^\circ\text{C}$, то $T_{h.i}$ вычисляются по формуле 4.30.

$$T_{h.i} = 4 \cdot \left(1 + (T_p - 4) \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{h_i}{H_{cm}} - 1} + 1 \right) \right), \quad (4.30)$$

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

Если $T_p \leq 3^\circ\text{C}$, то значения $T_{h.i}$ вычисляются по формуле 4.31.

$$T_{h.i} = \frac{4}{3} \cdot T_p \sqrt[3]{1 - \frac{h_i}{H_{cm}}} \quad (4.31)$$

7. На каждом единичном интервале высоты подземного резервуара по формуле 4.32 вычисляется значение (Δr_i), на которое продвинется боковая стенка подземного резервуара в результате её оттаивания и разрушения. Вычисляются новые радиусы резервуара по высоте (r_i) по формуле 4.33.

$$\Delta r_i = v_{T.i} \cdot T_{h.i} \cdot \tau_{ui} \quad (4.32)$$

$$r_i = r_{i,n} + \Delta r_i \quad (4.33)$$

где: $r_{i,n}$ – радиус подземного резервуара на единичном интервале высоты в конце предыдущего шага расчёта (для первого шага расчёта $r_{i,n} = r_{ск}$); $v_{T,i}$ – приведённая скорость разрушения вертикальной поверхности мёрзлых грунтов в воде на единичном интервале высоты подземного резервуара.

Такой подход к расчёту продвижения боковой стенки подземного резервуара вследствие её оттаивания и разрушения согласуется с определённой экспериментально зависимостью скорости разрушения мёрзлого песчаного грунта в воде от угла наклона боковой стенки к вертикали (рисунок 4.3). При таком расчёте расстояние, на которое оттаивает боковая стенка равна $\Delta r_{i,\perp} = \Delta r_i \cdot \cos \beta$, где β – угол наклона оттаиваемой стенки к нормали (рисунок 4.4).



Рисунок 4.3 – Методически задаваемая и экспериментально определённая зависимость скорости разрушения поверхности мёрзлой песчаной породы в воде от её угла наклона к вертикали

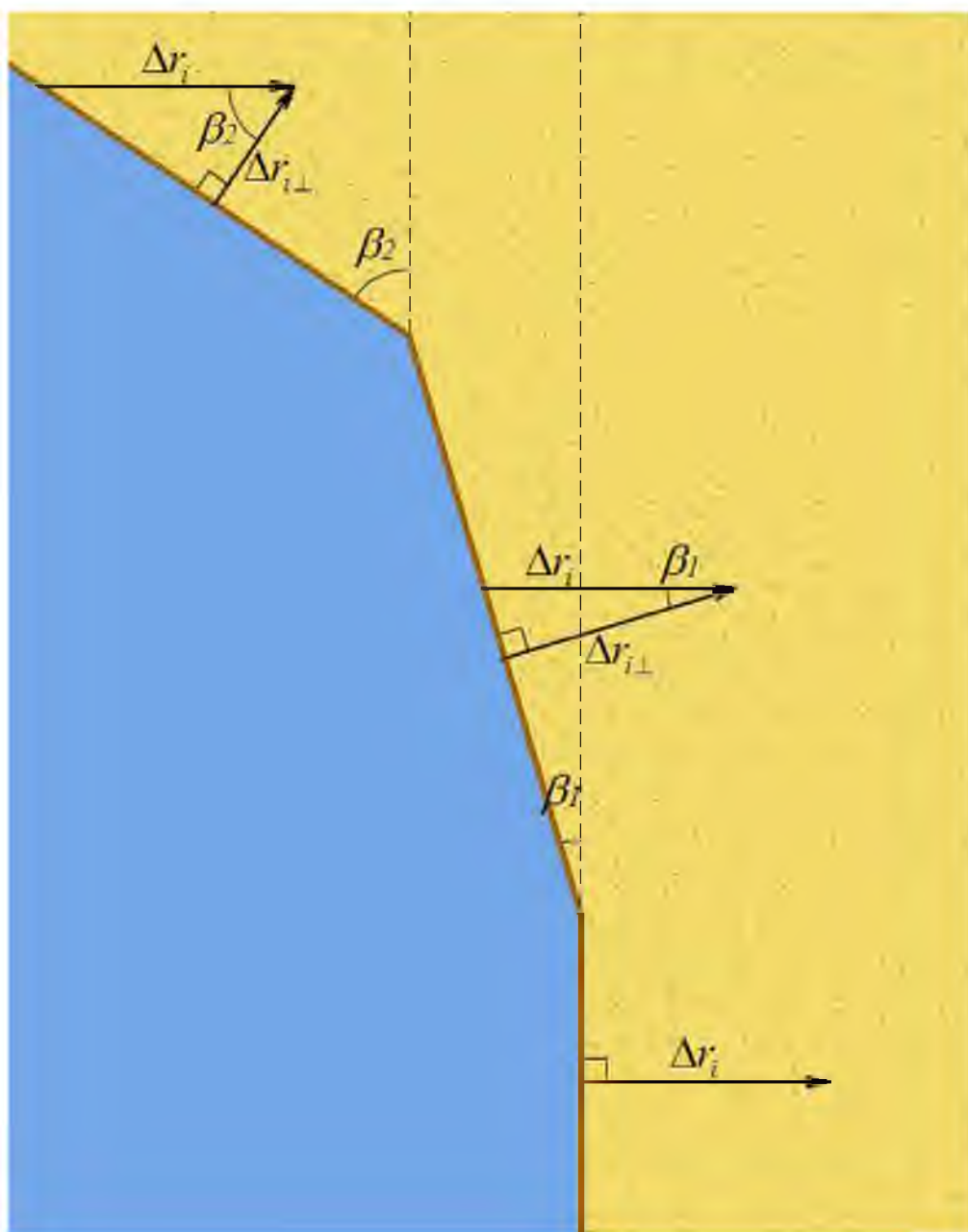


Рисунок 4.4 – Схематическое изображение зависимости приращения радиуса подземного резервуара от угла наклона поверхности мёрзлого массива

8. Отметки радиусов в донной части резервуара по высоте корректируются с учётом угла естественного откоса, характерного для того или иного грунта.

Если в донной части резервуара значения радиуса r_i на высоте h_i превысят значения $r_{отк.i} = \frac{h_i}{\operatorname{tg}\alpha}$ (м), то радиус на этой высоте принимают

равным $r_{отк.i}$, где $r_{отк.i}$ – радиус в донной части резервуара на высоте h_i от дна резервуара, сформированный за счёт формирования нижней части резервуара под определённым углом α (угол естественного откоса грунта в воде).

9. По данным изменения радиусов подземного резервуара r_i (для этого шага расчёта) с высотой строится его контур.

10. Рассчитывается общий объём созданного подземного резервуара по формуле 4.34.

$$V = \frac{\pi}{3} \cdot \sum \left((h_i - h_{i+1}) \cdot (r_i^2 + r_i \cdot r_{i+1} + r_{i+1}^2) \right), \quad (4.34)$$

для h_i от 0 до H .

11. Цикл вычислений по пунктам с 2 по 9 повторяется для следующего временного интервала ($\tau_{иi}$), пока резервуар не достигнет необходимого объёма и формы.

12. Корректируя по шагам расчёта высоту уровня воды в подземном резервуаре, расход и температуру воды, получаем необходимую форму подземного резервуара.

13. Вычисляется общее количество поданной воды по формуле 4.35. Общее время создания подземного резервуара определяется путём суммирования времени всех шагов расчёта.

$$V_{\epsilon} = P_{\epsilon.j} \cdot \tau_{и.j} + P_{\epsilon.j+1} \cdot \tau_{и.j+1} + \dots + P_{\epsilon.m} \cdot \tau_{и.m}, \quad (4.35)$$

где j – порядковый номер шага расчёта, m – количество шагов расчёта.

14. Шаги расчёта с одинаковыми задаваемыми параметрами ($H_{ст}$, P_{ϵ} , T_{ϵ}), группируются в этапы строительства (шаги размыва). Время размыва подземного резервуара τ_p рассчитывается, как сумма шагов расчёта к концу определённого этапа.

Технологические параметры для каждого этапа строительства заносятся в таблицу 4.1.

Технологические параметры создания подземных резервуаров

№ этапа	$H_{ст}, м$	$\frac{P_{с},}{ч}$ $м^3$	$T_{с}, °C$	$V, м^3$	$\tau_p, ч$	$V_B, м^3$
1	2	3	6	7	8	9

Пример расчёта изменения средней температуры воды в подземном резервуаре в процессе его создания приведён на рисунке 4.5.

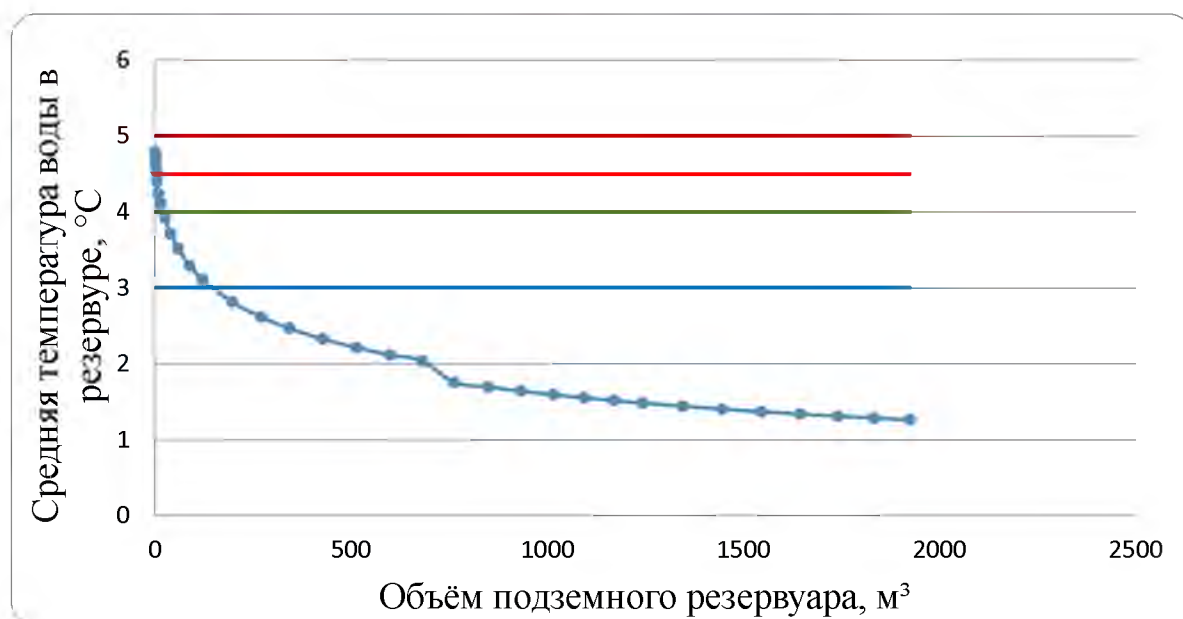


Рисунок 4.5 – Изменение средней температуры воды в подземном резервуаре в зависимости от его объёма

На основе определённых параметров создания подземного резервуара пишут регламент на его размыв.

В процессе создания подземного резервуара, после достижения трети его объёма, необходимо проводить промежуточную звуколокационную съёмку. По результатам которой, при необходимости, вносятся коррективы в расчёт и в регламент.

Предлагаемая методика была утверждена в ОАО «Газпром» в 2013 году. Текст утверждённой методики представлен в приложении 2.

Из рисунка 4.6 видно, что сходимость прогнозируемой формы резервуара, по данной методике (рисунок 4.6 а), с реальной формой построенного в натуральных условиях подземного резервуара (рисунок 4.6 б) существенно выше, по сравнению с результатами существующей методики (программа RZ Version 2.1).

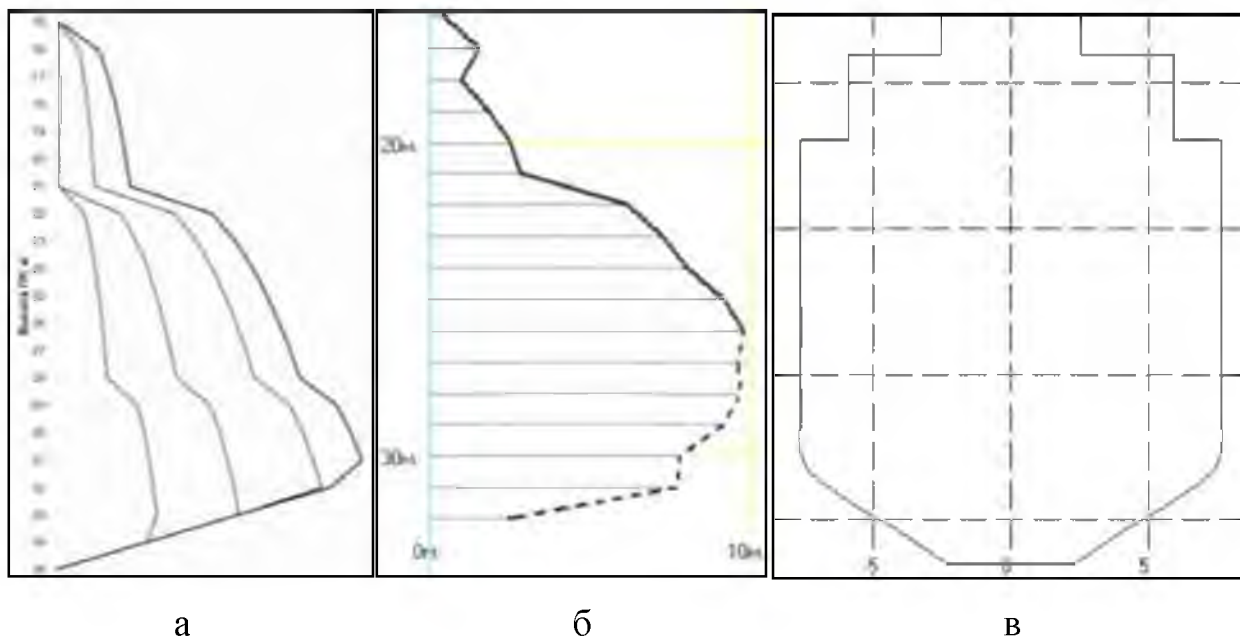


Рисунок 4.6 – а – форма резервуара, прогнозируемая по предлагаемой методике; б – реальная форма построенного резервуара; в – форма резервуара, прогнозируемая по существующей методике

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 подземных резервуаров (рисунок 4.7).

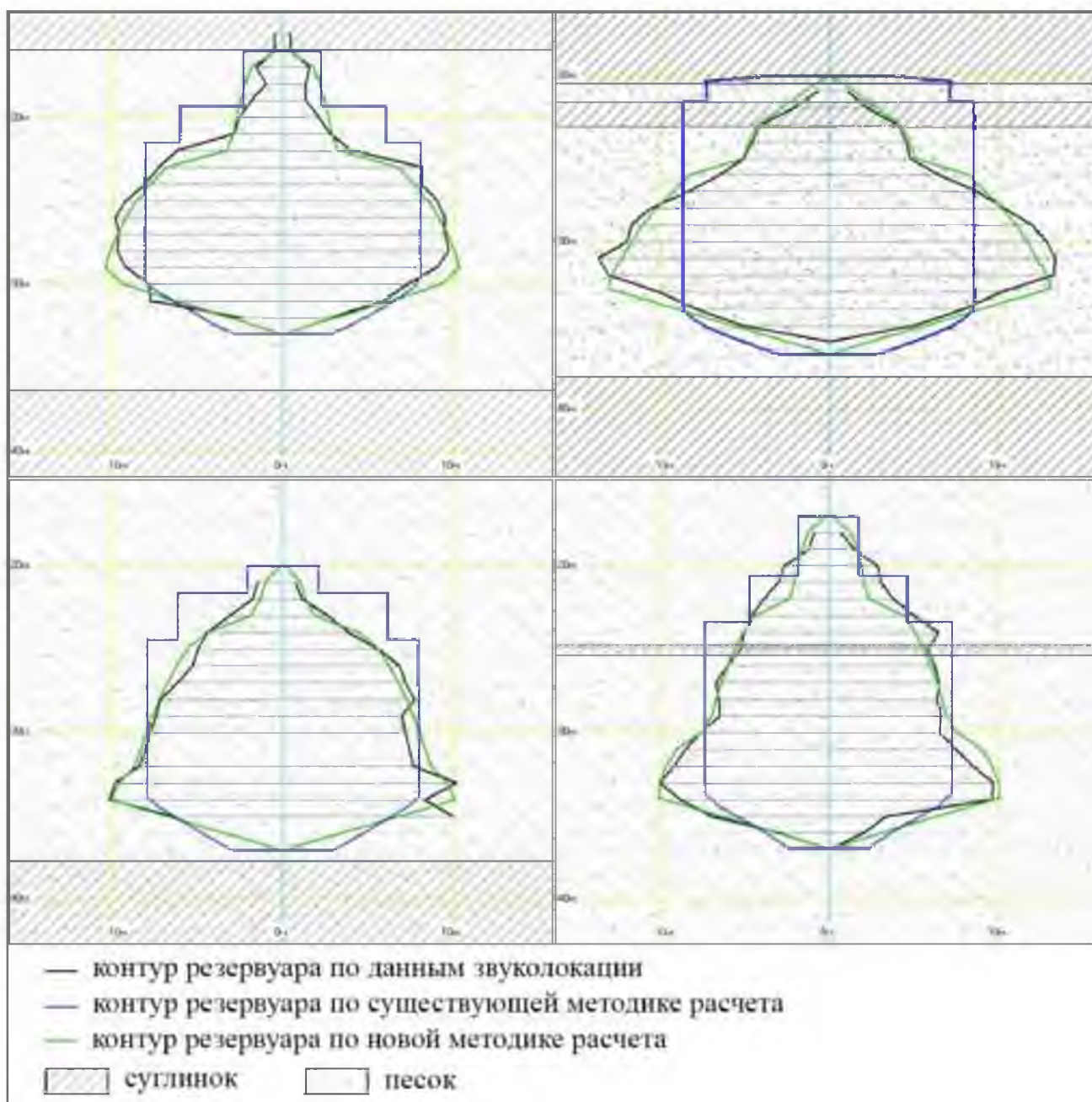


Рисунок 4.7 – Изображение наложения контуров подземных резервуаров по данным звуколокационной съёмки и по расчётам по существующей и предлагаемой методикам

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%.

Основные отличия результатов расчёта существующей методики от построенных подземных резервуаров заключаются в верхней и нижней частях формы резервуара. Активное развитие нижней части подземных резервуаров связано с тем, что в температура воды ней на протяжении практически всего периода строительства находилась более тёплая вода, а также из-за неправильного расчёта уровня воды на первом и втором этапах создания.

Результаты строительства резервуаров и результаты расчёта по предлагаемой методике показывают, что для создания правильной сводчатой формы кровли и предотвращения образования запредельных радиусов в нижней части резервуара необходимо поддерживать уровень воды выше. При подаче оборотной воды с расходом от 60 до 100 м³/ч и температурой от 5-10°С уровень воды необходимо поддерживать на уровне не ниже 1-3 метров от кровли резервуара. При этом на последнем этапе уровень воды должен находиться на уровне кровли резервуара. По времени данный этап должен занимать не менее 60 % от общего времени строительства подземного резервуара.

4.2 Применение методики для создания подземного резервуара в натуральных условиях

Предлагаемая методика была апробирована при создании подземного резервуара на площадке газовых скважин №19 Бованенковского НГКМ, на полуострове Ямал.

На данной кустовой площадке была пробурена технологическая скважина глубиной 50 метров с отбором керна (рисунок 4.8).

Геологическая колонка по скв. № 19-ВР-1 БНГКМ

Глубина, м	Литология	Криотекстура	Глубина до подошвы, м	Глубина слоя, м	Краткое описание пород	
			2,3	2,3	Отсыпки (песок).	
5					2,3-2,5 - ПРС.	
10					<p>Пески мелкие - полноводные, серые - до светло-серых (с желтыми оттенками), содержащие среднетонкие осадки растительного происхождения, от светло- и темно-коричневого до черного цвета в виде пучков, шнуров, моч и мелких прищипок - неравномерно распределенные по всему интервалу (содержание ~ 5-10%). Проявляется прослой и перемешивания с супесью серо-песчаной в верхней части интервала, а также на глубинах 8,2-8,6 м и 44,0-44,2 м выделяются прослой суглинистой серого (бескрасочного) цвета с прослойками и звездными осадками.</p> <p>Криотекстуры массивная, в основном в садовой и шуровой в районе устья.</p>	
15						
20						
25						
30						
35						
40						
45						
50			48,5	25,7		



Рисунок 4.8 – Геологическая колонка технологической скважины

Песчаный пласт залегает в интервале с 13 до 48 метров. Для обеспечения устойчивой формы подземного резервуара с заданным объемом высота подземного резервуара была принята 24 м, дно резервуара по оси скважины

принято на глубине 44 м от поверхности отсыпки, кровля резервуара – на глубине 20 м.

Из данного интервала было отобрано 5 образцов для определения приведённой скорости и удельной теплоты разрушения в воде. Значения этих параметров в интервале строительства данного резервуара практически не отличались по высоте. Средняя приведённая скорость разрушения многолетнемёрзлого грунта в воде равнялась $0,025 \frac{м}{ч \cdot ^\circ C}$, а удельная теплота

разрушения – $352000 \left(\frac{Дж}{кг} \right)$.

С помощью предлагаемой методики были определены параметры создания подземного резервуара с необходимыми объёмом и формой. Была выбрана схема создания четырьмя этапами с повышением уровня воды снизу вверх. Основные расчётные параметры регламента создания подземного резервуара приведены в таблице 4.2. Все отметки приведены от уровня земли.

Таблица 4.2

Параметры создания подземного резервуара на площадке куста газовых скважин №19

№ этапа	Уровень воды от поверхности, м	Производительность		Объём размыва за этап, м ³	Объём резервуара, м ³	Время размыва, сут.	
		вода, м ³ /ч	воздух, м ³ /ч			этапа	резервуара
1	2	3	5	6	7	8	9
I	24	60	720	16	16	1	1
II	23	60	720	28	44	1	2
III	22	60	720	641	685	10	12
IV	21	60	720	2408	3093	25	37

Расчётная форма подземного резервуара представлена на рисунке 4.9.

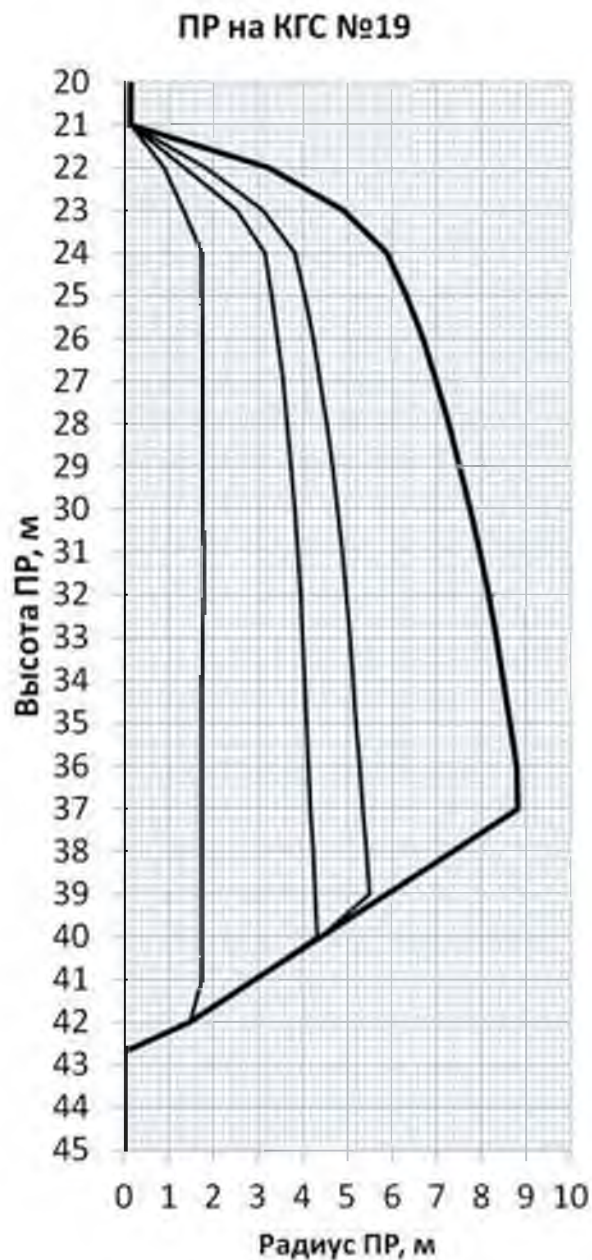


Рисунок 4.9 – Расчётная форма подземного резервуара по этапам размыва

Далее был произведён расчёт устойчивости данной выработки-ёмкости. Оценка устойчивости подземного резервуара проводилась с помощью численного моделирования напряжённо-деформированного состояния массива многолетнемёрзлых пород в окрестности резервуара с использованием методов механики сплошной среды. Расчёт производился с помощью программы «Расчёт устойчивости» Шафоренко отделом геомеханики ООО «Газпром геотехнологии» (раздел 4.5).

По данному регламенту был построен подземный резервуар. Фотография площадки строительства представлена на рисунке 4.10. На ней представлен скважинный гидродобывочный снаряд с выкидной линией, компрессор, монтажная площадка и дизельная электростанция.



Рисунок 4.10 – Фотография площадки строительства подземного резервуара

Объём созданного подземного резервуара (по количеству откаченной из него воды) составил 3011 м³. Было проведено две промежуточные звуколокационные съёмки. Первая показала объём резервуара – 1300 м³, вторая – 2180 м³. Третью звуколокационную съёмку по завершении создания резервуара не проводили. Поэтому сравнение расчётной формы по

предлагаемой методике было проведено именно с контуром полученным по второй звуколокационной съёмке.

Сходимость расчётного контура на момент достижения объёма подземного резервуара 2180 м³ и контура по данным звуколокационной съёмки достаточно хорошая (рисунок 4.11). Кровля резервуара достигла необходимой формы и размеров. Выхода за регламентные радиусы размыва не произошло.

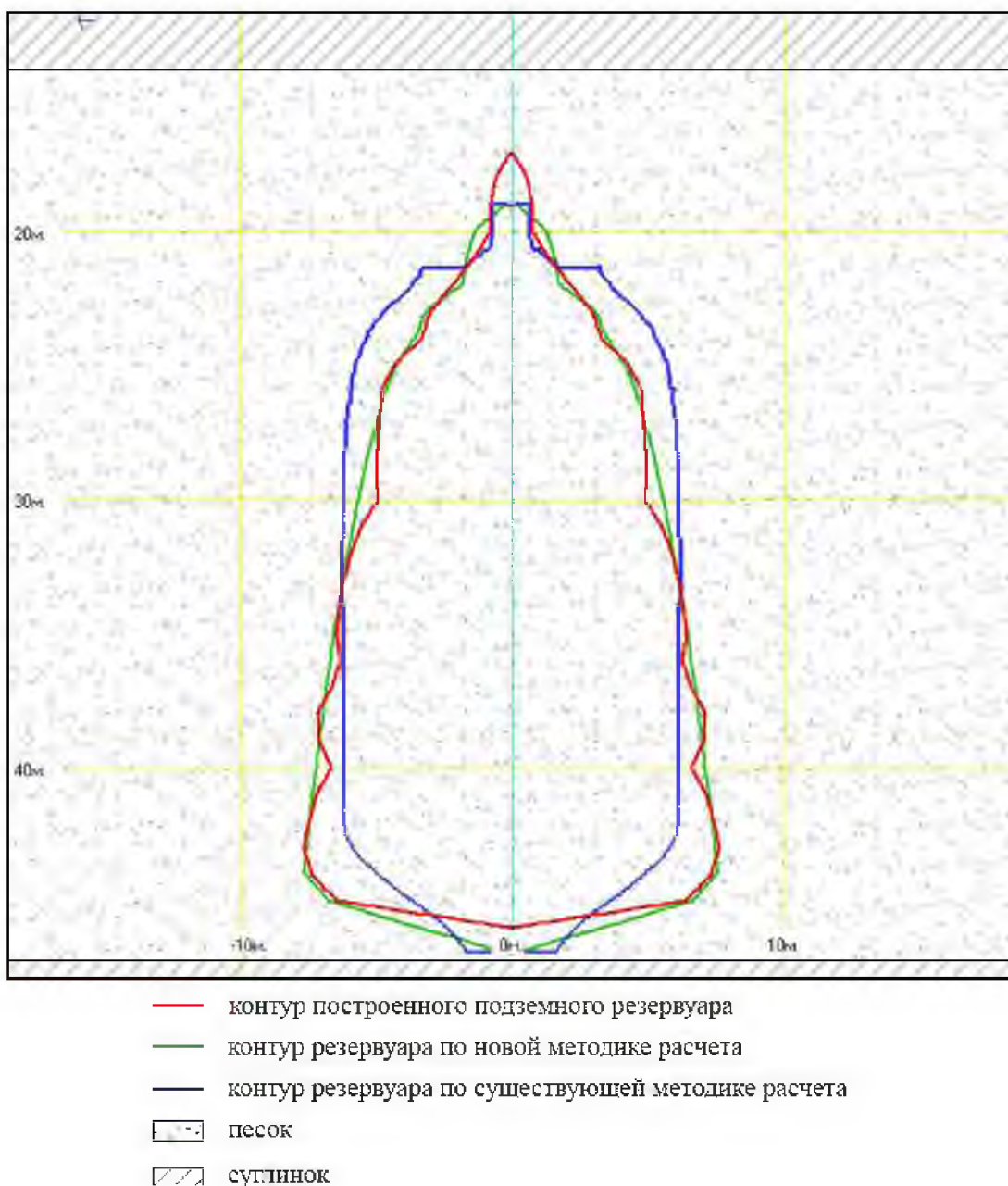


Рисунок 4.11 – Контурсы подземного резервуара 19-ПР по данным звуколокационной съёмки и по расчётам с использованием существующей и предлагаемой методик расчёта

4.3 Расчёт устойчивости подземной выработки-ёмкости в многолетнемёрзлых осадочных породах

Создание подземных хранилищ в многолетнемёрзлых породах накладывает на строителей ряд ограничений. Необходимо учитывать, что породы, содержащие лёд, в длительном времени не являются абсолютно устойчивыми. То есть устойчивая подземная полость в мёрзлых породах через некоторое время может потерять некоторую часть объёма из-за конвергенции [11, 15, 23, 61].

В настоящий момент разработан комплекс численных и аналитических методов, позволяющий оценить длительную устойчивость выработки, её конвергенцию со временем в зависимости от её геометрии и физико-механических свойств вмещающих резервуар, а также покрывающих мёрзлых пород. Расчёт устойчивости подземной выработки-ёмкости в многолетнемёрзлых осадочных породах, форма которого была получена с помощью предлагаемой методики, вёлся отделом геомеханики ООО «Газпром геотехнологии» (Т. Ю. Журавлёвой и А. А. Скворцовым) по разработанной в 1991 году методике оценки устойчивости выработок, сооружаемых в мёрзлых породах и имеющих форму осесимметричного тела, с учётом её корректировки на основе опыта эксплуатации на территории Бованенковского ГКМ опытных резервуаров [70, 71]. Форма подземного резервуара принимается осесимметричной.

Решается пространственная задача о деформировании весомой полубесконечной среды с полостью с учётом осевой симметрии. При численном решении задачи в окрестности полости выделяется некоторая весомая область D , на границах которой заданы граничные условия. Горизонтальные границы области располагаются на расстоянии $2,5L$ от поверхности полости, где L – её наибольший пролёт. Вертикальные границы области располагаются на расстоянии b от оси резервуара. Для одиночных

резервуаров $b=3L$, для системы скважин b равно половине расстояния между скважинами.

Граничные условия:

- левая граница – горизонтальные перемещения равны нулю;
- правая граница – горизонтальные перемещения равны нулю;
- верхняя граница – давление песчаной отсыпки $\sigma_z = -\rho_r g h_s$,
где ρ_r – плотность песка, h_s – высота песчаной отсыпки над уровнем земли; g – ускорение силы тяжести. Принимая $\rho_r = 1900 \text{ кг/м}^3$,
 $h_s = 2,5 \text{ м}$, получаем $\sigma_z = 0,047 \text{ МПа}$;
- нижняя граница – вертикальные перемещения равны нулю;
- на поверхности выработки напряжения равны нулю.

Задача решается методом конечных элементов.

В результате расчётов определяются все компоненты тензоров напряжений, деформаций и перемещений в центрах всех конечных элементов. Полученные результаты расчётов сопоставляются с принятыми критериями устойчивости, проводится их анализ, на основе которого делается вывод о напряжённо-деформированном состоянии всего массива пород и его участков и о степени устойчивости проектируемого или имеющегося в нём подземного сооружения.

На основании опыта создания и эксплуатации резервуаров в вечномёрзлых породах и рекомендаций нормативного документа, основными критериями устойчивости осесимметричной выработки, сооружаемой в условиях криолитозоны, являются:

- не вся поверхность выработки принадлежит ОЗД;
- максимальный размер ОЗД в кровле в направлении, нормальном поверхности выработки, не превышает $0,03 L$;
- растягивающие напряжения в породном массиве не превышают прочности породы при растяжении;
- максимальное опускание кровли не превышает $0,0175 L$;

- допустимое изменение объёма резервуара за заданный период времени.

Расчёт напряжённо-деформированного состояния массива на кустовой площадке №19 и прогнозируемая оценка устойчивости подземного резервуара выполнялись по расчётной схеме, представленной на рисунке 4.12. На нём показана половина сечения осесимметричной выработки вертикальной плоскостью, проходящей через ось скважины. Рассматривается породный массив, состоящий из горизонтально расположенных слоёв мёрзлых пород с различными свойствами, характеристики и расчётные параметры которых определены по результатам физико-механических испытаний вечномёрзлых пород Бованенковского НГКМ и приведены в таблице 4.3. При выполнении данных расчётов, давление на контур выработки отсутствовало.

Таблица 4.3

Расчётные показатели свойств мёрзлых грунтов на кустовой площадке №19

№ элемента	Интервал, м	Название горной породы	G , МПа	K , МПа	σ_i^∞ , МПа	ε_i^∞ , д.ед.	γ , МПа/м
1	0-8,0	Суглинок легкий пылеватый	21,0	73,0	0,23	0,0972	0,0178
2	8,0-18,5	Супесь песчанистая	27,0	126,0	0,47	0,0972	0,0189
3	18,5-22,0	Песок пылеватый	52,0	242,0	0,78	0,1103	0,0184
4	22,0-25,0	Песок пылеватый	74,0	346,0	0,69	0,1103	0,0186
5	25,0-42,2	Песок пылеватый	32,0	147,0	0,29	0,1103	0,0189
6	42,2-54,2	Песок пылеватый	15,0	56,0	0,1	0,1103	0,0189
7	54,2-82,7	Песок, супесь, суглинок	18,0	85,0	0,11	0,0972	0,0194

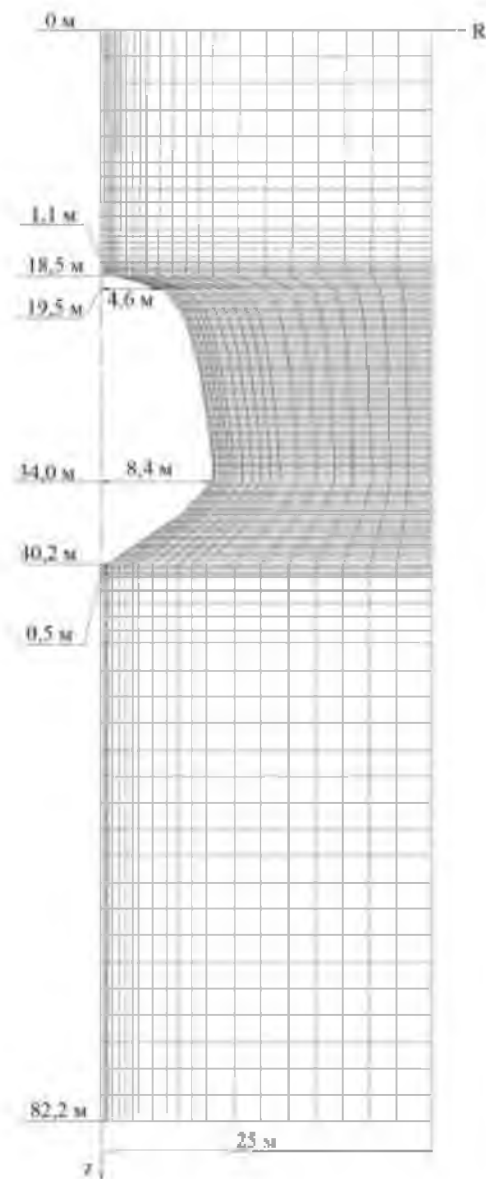


Рисунок 4.12 – Расчётная схема устойчивости подземного резервуара на кустовой площадке №19

Анализ результатов расчёта напряжённо-деформированного состояния при отсутствии противодействия и сопоставление полученных результатов с критериями устойчивости выработки, создаваемой в мёрзлых породах, показал, что областей запредельного деформирования в её кровле не образуется. Растягивающие напряжения σ_r наблюдаются в окрестности контура подземной выработки, однако их значения, максимальное из которых составляет 0,14 МПа, не превышают длительной прочности мёрзлого песка на растяжение 0,3 МПа (рисунок 4.13).

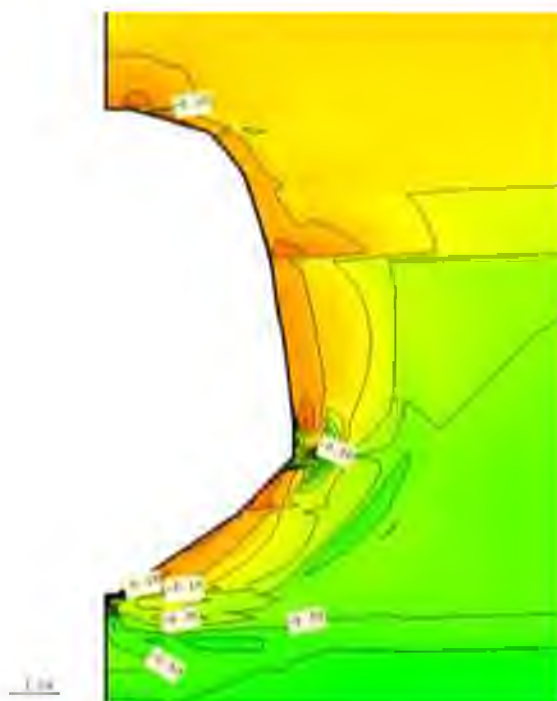


Рисунок 4.13 – Распределение напряжений в окрестности подземного резервуара на кустовой площадке №19

По результатам расчёта значение максимального перемещения кровли выработки a может составить 0,139 м, что не превышает допустимое значение, определяемое критериями устойчивости, 0,294 м. Для подземного резервуара на кустовой площадке №19 с начальным объёмом v_0 , равным 3093 м³, максимальная конвергенция $\Delta v/v_0$ прогнозируется 7,9% (таблица 4.4).

Таблица 4.4

Результаты расчёта напряжённно-деформированного состояния породного массива в окрестности подземного резервуара на кустовой площадке №19

V_0 , м ³	$\Delta v/v_0$, %	Σ_r , МПа		A , м	
		Полученное значение	Допустимое значение	Полученное значение	Допустимое значение
3093	7,9	0,14	0,30	0,139	0,294

Таким образом, все критерии устойчивости выполняются.

Анализ результатов расчёта напряжённо-деформированного состояния подземного резервуара на кустовой площадке №19, сооружаемого в мёрзлых породах, и сопоставление полученных результатов с основными критериями устойчивости, свидетельствуют об устойчивости рассматриваемой подземной выработки.

4.4 Оценка эффективности предлагаемых решений

В среднем из-за неточного расчёта параметров создания подземных резервуаров в многолетнемёрзлых осадочных породах и непредвиденных геологических осложнений объём построенных резервуаров оказался в среднем на 27,3% меньше запроектированного. По ценам последних двух лет стоимость одного кубометра подземного резервуара равнялась 8 000 рублям, что в пересчёте на недостроенный объём составило 76,63 млн. рублей.

Ещё одним следствием неточного расчёта технологических параметров строительства подземных резервуаров является их неправильная форма, которая может стать причиной увеличения конвергенции резервуаров в процессе их эксплуатации, что так же снизит их стоимость.

Использование новой методики расчёта технологических параметров для создания подземных резервуаров позволит, за счёт лучшей сходимости расчётной формы с формой построенных резервуаров, избежать существенной доли денежных потерь. Следствием чего станет более рациональное использование прилегающих к площадкам бурения газовых скважин территорий.

4.5 Выводы

Разработанная методика показала хорошую сходимость прогнозируемой формы резервуаров с формами 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 данной методикой нельзя учесть.

Особенностями данной методики являются:

- учёт геологического строения массива многолетнемёрзлых грунтов;
- учёт особенностей разрушения песчано-глинистых многолетнемёрзлых пород в воде;
- учёт влияния природных факторов на скорость оттаивания и разрушения многолетнемёрзлых пород в воде;
- учёт влияния изменяющейся температурной стратификации воды на развитие формы подземного резервуара в процессе его сооружения;
- оперативность расчёта технологических параметров создания подземных резервуаров.

Использование разработанной методики определения параметров создания подземных резервуаров в многолетнемёрзлых породах позволит уменьшить потери объёма построенных резервуаров, а вместе с тем и потерю прибыли от строительства на 20-25%.

Данная методика была утверждена в ОАО «Газпром» в конце 2013 года. Сейчас она используется для проектирования подземных резервуаров на Бованенковском и Харасавэйском месторождениях.

Разработанная расчётная база позволила сделать ряд выводов по интенсификации и оптимизации работ по строительству подземных резервуаров. Благодаря данной методике были существенно упрощены технологические режимы.

Данная методика, будучи внедрённой в производство, 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 подземных резервуаров в многолетнемёрзлых породах, а так же разработке методики определения параметров их создания (температура и производительность подачи воды, её уровень в подземном резервуаре), экспериментальному выявлению закономерностей зависимости скорости разрушения многолетнемёрзлых пород в воде от её температуры, содержания глинистых частиц и положения оттаивающей мёрзлой поверхности, что в совокупности обеспечивает создание подземных резервуаров с заданной формой и объёмом в конкретных геологических условиях, что имеет существенное значение для обеспечения долговременного и безаварийного хранения отходов бурения в этих резервуарах до их полного промерзания.

Данная технология была успешно опробована при строительстве подземных резервуаров в многолетнемерзлых породах на Бованенковском месторождении полуострова Ямал. Результаты создания резервуаров показали перспективность применения данной технологии.

Основные научные результаты и практические выводы диссертационной работы заключаются в следующем:

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

2. Исследования разрушения многолетнемёрзлых пород 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 подземный резервуар, 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 подземный резервуар, 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 подземных резервуаров средняя производительность разрушения мёрзлых грунтов в воде определяется скоростью и затратами тепла на разрушение мёрзлого грунта, постепенно возрастающая до максимального значения, обеспечиваемого вводимым теплом.

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

8. Разработана методика определения параметров создания подземных резервуаров в многолетнемёрзлых породах на основе использования эмпирических параметров: скорости и удельной теплоты разрушения многолетнемёрзлых пород в воде.

Список литературы

1. Азеев В.С., Серегин Е.П., Стрюк И.В. и др. Подземное хранение углеводородных топлив. – М.: ЦНИИТЭнертехим., 1978. – 61 с.
2. Аксютин О.Е., Казарян В.А., Ишков А.Г., Хлопцов В.Г., Теплов М.К., Хрулёв А.С., Савич О.И., Сурин С.Д. Строительство и эксплуатация резервуаров в многолетнемёрзлых осадочных породах. – М.: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2013. – 432 с.
3. Аренс В. Ж., Бабичев Н. И., Башкатова А. Д., Гридин О. М., Хрулёв А. С., Хчеян Г. Х. Скважинная гидродобыча полезных ископаемых. – М.: Горная книга, 2007. – 295 с.
4. Аренс В.Ж. Скважинная добыча полезных ископаемых. – М.: Недра, 1976. – 279 с.
5. Аренс В.Ж. Физико-химическая геотехнология. – М.: МГГУ, 2001. – 656 с.
6. Аренс В.Ж., Исмагилов Б.В., Шпак Д.Н. Скважинная гидродобыча твёрдых полезных ископаемых. – М.: Недра, 1980. – 229 с.
7. Аренс В.Ж., Шпак Д.Н., Хрулёв А.С. и др. Добыча песка и гравия через скважины // «Автомобильные дороги». – 1985. – № 6. – С. 38–39.
8. Бабичев Н.И. Технология скважинной гидродобычи полезных ископаемых. Учебное пособие. – М.: МГРИ, 1981. – 85 с.
9. Бабичев Н.И., Либер Ю.В., Кройтор Р.В., Левченко Е.Н. Скважинная технология добычи титано-циркониевых песков Тарского месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень МГГУ. – 1999. – № 2. – С. 127-128.

10. Бакакин В.П. Опыт управления теплообменной деятельностью слоя мёрзлых горных пород в целях повышения эффективности их разработки. – М.: АН СССР, 1955. – 88 с.
11. Баклашов И.В., Картозия Б.А. Механика горных пород. – М.: Недра, 1975. – 272 с.
12. Балобаев В.Т. Процессы теплообмена на поверхности обнажённых мёрзлых мелкодисперсных грунтов при послойном оттаивании // Тепло- и массообмен в мёрзлых почвах и горных породах. – 1961. – С. 25–43.
13. Баширов В.В. Техника и технология поэтапного удаления и переработки амбарных шламов. – М.: Наука, 1992. – 183 с.
14. Бобков Ю.П., Куляпина С.И., Месяц В.И. и др. О технологии добычи песка в районах Крайнего Севера через буровые скважины // Проблемы горной теплофизики. II Всесоюзн. научн. техн. конф. по горнотехнической теплофизике, 1981. – С. 131–132.
15. Бобов Н.Г., Саркисян Р.М. К инженерно-геокриологическому обоснованию ледогрунтовых хранилищ нефтепродуктов // Тепловое и механическое взаимодействие мёрзлых пород с инженерными сооружениями. – 1973. – С. 58-64.
16. Богословский П.А. Расчёт многолетних изменений температуры земляных плотин, основанных на толще мёрзлых грунтов // Труды ГИСИ им. В.П. Чкалова: сб. науч. тр. – Горький, 1957. Вып. 27. – С. 31–32.
17. Будыко М.И. Тепловой баланс земной поверхности. – Л.: Гидрометеиздат, 1956. – 253 с.
18. Булатов А.И., Левшин В.А., Шеметов В.Ю. Методы и техника очистки и утилизации отходов бурения. – М.: ВНИИОЭНГ, 1989. – 37 с.

19. Быков И.Ю., Гуменюк А.С., Литвиенко В.И. Охрана окружающей среды при строительстве скважин. – М.:ВНИИОЭНГ, 1985. – 37 с.
20. Бэр К.М. Материалы к познанию нетающего почвенного льда. – Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения СО РАН, 2000. – 160 с.
21. Васильев А.А., Стрелецкая И.Д., Широков Р.С., Облогов Г.Е. Эволюция криолитозоны прибрежно-морской области западного Ямала при изменении климата // Криосфера Земли. – 2011. – Т. XV. – № 2. – С. 56–64.
22. Васяев Г.М., Гинсбург Ю.М., Пястолов А.Д. Бесшахтные резервуары в мерзлоте // Газовая промышленность. – 1994. – №12.– С.10–12.
23. Вялов С.С. Реологические свойства и несущая способность мёрзлых грунтов. – М.: АН СССР, 1959. – 190 с.
24. Гаев А.Я., Щугорев В.Д., Бутолин А.П. Подземные резервуары. – Л.: Недра, 1986. – 223 с.
25. Гольдман В.Г., Знаменский В.В., Чистопольский С.Д. Гидравлическое оттаивание мёрзлых горных пород. – Магадан: ВНИИ-1, 1970. – 440 с.
26. Гончаров С.А. Теплоизоляция талых золотоносных песков при условии допущения их промерзания на заданную глубину // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 1998. – № 6. – С. 28–32.
27. Данько В.К., Кучуков Э.З., Салагаев В.Б. и др. Экспериментальные исследования термоэрозии на мёрзлых суглинках // Строительство и архитектура. Сер. 15. Инженерные изыскания в строительстве. Вып. 1. – М.: ЦИНИ по строительству и архитектуре Гостроя СССР, 1980. – С. 23–31.
28. Данько В.К., Лобастова С.А., Салагаев В.Б., Ахметов А.Т. Результаты исследований термоэрозии на мёрзлых песках // Строительство и архитектура. Сер. 15. Инженерные изыскания в строительстве. Вып.1. – М.: ЦИНИ по строительству и архитектуре Госстроя СССР, 1980. – С. 13–27.

29. Дмитриев А.П., Гончаров А.С. Термодинамические процессы в горных породах. – М.: Недра, 1983. – 390 с.
30. Ершов Э.Д., Кучуков Э.З., Малиновский Д.В. Размываемость мёрзлых пород и принципы термоэрозионной опасности территории // Вест. Моск. ун - та. Сер. геол. – 1979. – № 3. – С. 67–76.
31. Ершова Э.Д. Основы геокриологии. – М.: МГУ, 2002. – 682 с.
32. 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. – 2012. – № 6. – С. 42–45.
33. Карпухин А.Н., Савич О.И., Сурин С.Д. Особенности процесса оттаивания многолетнемёрзлых песков при скважинной гидродобыче на полуострове Ямал // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – № 4.– С. 365-377.
34. Король В.В., Позднышев Г.Н., Манырин В.Н. Утилизация отходов бурения скважин // Экология и промышленность России. – 2005. – № 1. – С. 40–42.
35. Кроник, Я.А. Термомеханические модели мёрзлых грунтов и криогенных процессов // Реология и инженерное мерзлотоведение: сб. науч. – 1982. – С. 200-212.
36. Кузьмин Г.П. Разработка эффективных методов создания и эксплуатации подземных резервуаров в криолитозоне: дис. ... докт. техн. наук: 04.00.07. – Якутск, 1999. – 297 с.
37. Кузьмин Г.П., Яковлев А.В. Подземные резервуары в мёрзлых грунтах. – Якутск: Институт мерзлотоведения СО РАН, 1992. – 152 с.

38. Кузьмин Г.П., Яковлев А.В. Способ хранения жидкого топлива. – Якутск: ЦНТИ, 1991. – ил. № 50-91.
39. Мельников П.И., Вялов С.С. Инженерное мерзлотоведение. – М.: Наука, 1976. – 208 с.
40. Небера В.П., Бабичев Н.И. Геотехнологические способы извлечения полезных ископаемых из недр. – М.: Цветметинформация, 1975. – 65 с.
41. Пепелов И.Л. Водно-физические свойства техногенных почвоподобных тонкодисперсных систем: дис. ... канд. биол. наук: 03.02.13. – Москва, 2011. – 145 с.
42. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород. – М.: Недра, 1978. – 390 с.
43. Рочев В.Ф. Исследование механизма и разработка методов интенсификации процесса разрушения мерзлых песчано-глинистых пород в водной среде: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.20. – Нерюнги, 2002. – 130с.
44. Саввин Е.Д., Фёдоров Ф.М. Скорость оттаивания мёрзлых глинистых пород при размыве // Бюлл. научн. технич. информации. – 1981. – С. 7–11.
45. Савич О.И., Карпухин А.Н., Сурин С.Д. Использование отработанных камер скважинной гидродобычи песка для хранения жидких углеводородов и захоронения отходов бурения на нефтегазоконденсатных месторождениях полуострова Ямал // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – № 3. – С. 298–305.
46. Самышин В.К. Влияние физико - механических свойств дисперсных пород на интенсивность их размыва // Вопросы инженерного мерзлотоведения при разработке россыпных месторождений. – 1986. – С. 32–39.

47. Сильвестров Л.К. Подземное хранение воды в мёрзлых горных породах // Матер. II Всесоюзн. научн-техн. конф. по проблемам горной теплофизики. – 1981. – С. 75–100.
48. Смирнов В.И. Строительство подземных газонефтехранилищ. – М.: Газоилпресс, 2000. – 250 с.
49. Смирнов В.И., Лавров Н.П., Хрулёв А.С. Новые технологии добычи песка и строительства подземных хранилищ в осадочных породах при освоении севера Тюменской области // НТС «Подземное хранение газа», приложение к журналу «Наука и техника в газовой промышленности». – 2004. – С. 30–38.
50. Смирнов В.И., Хрулёв А.С., Игошин А.И. Добыча строительных песков и сооружение подземных хранилищ на полуострове Ямал средствами скважинной гидротехнологии // Сборник докладов отраслевой научно-практической конференции в ООО «Ямбурггаздобыча» «Актуальные проблемы и новые технологии освоения месторождений углеводородов Ямала в XXI веке», ИРЦ ОАО «Газпром». – 2004. – С. 8–35.
51. Сумгин М.И. Вечная мерзлота почвы в пределах СССР. – Изд. 1. – Владивосток, 1927. – 365 с.
52. Сумгин М.И. Вечная мерзлота почвы в пределах СССР. – Изд. 2. – Владивосток, 1937. – 372 с.
53. Сурин С.Д. Обоснование тепловых режимов строительства и эксплуатации подземных резервуаров в многолетнемёрзлых породах // Автореф. канд. диссерт. – М.: 2013. – 24 с.
54. Фридман Б.Э. Гидроэлеваторы. – М.: Машгиз, 1960. – 323 с.
55. Хныкин В.Ф. Разрушение горных пород гидромониторными струями на открытых разработках. – М.: Наука, 1969. – 150 с.

56. Хрулёв А.С. Скважинная гидротехнология – проблемы и решения // Вестник Российской академии естественных наук. – 2013. – № 5. – С. 18–45.
57. Хрулёв А.С., Карпухин А.Н., Сурин С.Д. Обоснование скважинной гидродобычи песка на полуострове Ямал // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 8. – С. 328–336.
58. Хрулёв А.С., Лавров Н.П., Зайцева О.Д. Перспективы разработки глубокозалегающих россыпей методом скважинной гидродобычи // Сб. научных трудов ЯФ СО АН СССР. – 1988. – 88 с.
59. Хрулёв А.С., Папко В.П., Якунин О.Н. Экспериментальные исследования технологических процессов скважинной гидродобычи золотоносных песков из многолетнемёрзлых россыпей // Труды ВНИИ–1. – 1988. – С. 20–27.
60. Цытович Н.А. Механика мёрзлых грунтов. – М.: Высш.школа, 1973. – 446 с.
61. Цытович Н.А. Механика грунтов. – М.: Высшая школа, 1979. – 272 с.
62. Шеметов В.Ю. Ликвидация шламовых амбаров при строительстве скважин. – Москва: ВНИИОЭНГ, 1989. – 35 с.
63. Хрусталёв Л.Н. Основы геотехники в криолитозоне. – М.: МГУ, 2005. – 542 с.
64. Ягафарова Г.Г., Мавлютов М.Р., Барахнина В.Б. Биотехнологический способ утилизации нефтешламов и буровых отходов // Горный вестник. – №4. – 1998. – С.43–46.
65. <http://promecosever.ru/jurnal/neftegazovaya-dolina/burovye-othody-problemy-i-resheniya.ru>
66. <http://ru.wikipedia.org>
67. <http://rufact.org/wiki>

68. <http://www.ecoport.ru>
69. <http://www.gazprom.ru/f/posts/73/068813>
70. СНиП 34-02-99. Подземные хранилища газа, нефти и продуктов их переработки. – М.: Стройиздат, 1999. – 32 с.
71. СП 34-106-98. Подземные хранилища газа, нефти и продуктов их переработки. – М.: ИРЦ ОАО «Газпром», 1999. – 110 с.
72. Патент РФ №899840 от 23.01.82. Ягафаров Р.Г., Абдуллин В.Р., Мавлютов М.Р. и др. Устройство для регенерации компонентов бурового раствора, Б.И. – №3.
73. Материалы отчетов, технических проектов и заданий, ТЭО проектов, предоставленные ООО «Газпром геотехнологии». – М., 1970-2012.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 – Методика определения приведённой скорости и удельной теплоты разрушения мёрзлого грунта при тепловом воздействии воды, заполняющей подземный резервуар

Значения приведённой скорости и удельной теплоты водно-теплого разрушения мёрзлого грунта необходимы для определения технологических параметров создания подземных резервуаров способом скважинной гидродобычи.

Данная методика применима для испытания мёрзлых образцов керна с температурой от -1 до -10°C.

Приведённая скорость водно-теплого разрушения мёрзлого грунта – коэффициент пропорциональности между скоростью оттаивания вертикальной поверхности мёрзлых грунтов и температурой воды. Он позволяет определять скорость оттаивания стенки подземного резервуара под воздействием тепловой энергии воды.

Удельная теплота водно-теплого разрушения мёрзлого грунта – затраты тепла на оттаивание льда в мёрзлом грунте и его дезинтеграцию (разрушение механических связей), отнесенные к единице массы мёрзлого грунта.

Для определения приведённой скорости и удельной теплоты водно-теплого разрушения мёрзлого грунта из каждого ИГЭ, но не реже чем через 3 метра, отбирают монолиты мёрзлого грунта. Из монолитов, сохраняя их природную температуру в массиве, изготавливают образцы диаметром 80-100 мм и высотой 100-150 мм. Талый слой счищают. Измеряют их массу (точность измерения - 1 г), линейные размеры (диаметр, высота) (точность измерения - 1 мм), температуру (точность измерения – 0,1°C), вычисляют плотность по формуле 1.

$$\rho_{обр} = \frac{4 \cdot m_{обр}}{\pi \cdot D_{обр}^2 \cdot H_{обр}}, \quad (1)$$

где: $\rho_{обр}$ – плотность образца грунта $\left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}\right)$, $m_{обр}$ – масса образца (кг), D – диаметр образца (м), $H_{обр}$ – высота образца (м).

Для определения приведённой скорости и удельной теплоты водно-теплого разрушения мёрзлого грунта используется установка, включающая теплоизолированный сосуд (термос ТГ-9) с помещенной в него термопарой и весы, к которым подвешивается погруженный в воду образец мёрзлого грунта (рисунок 1).



Рисунок 1 – Установка по определению приведённой скорости и удельной теплоты водно-теплого разрушения мёрзлых грунтов: 1 – сосуд Дьюара; 2 – теплоизолирующие прижимные прокладки; 3 – образец мёрзлого грунта; 4 – сетчатый стакан; 5 – прижимная пластина; 6 – вода; 7 – электронный термометр; 8 – весы

На верхнюю и нижнюю поверхность ненарушенного образца (3) накладывают теплоизолирующие прижимные прокладки (2). Образец устанавливают в сетчатый стакан (4) высотой и диаметром 100 мм, с размерами ячеек около 10 мм, подвешенный на весах (8), и погружают в теплоизолированную ёмкость (1), заполненную водой (6) (рисунок 2). С помощью термопары (7) фиксируют изменение температуры воды в ёмкости. Замеряется масса воды в ёмкости. Объём воды в ёмкости должен составлять

7-10 л. Термопара должна находиться на расстоянии 30-40 мм от образца, на уровне его середины.

Теплоизолирующие прижимные прокладки изготавливаются из поролон толщиной не более 5 мм. Они необходимы для предотвращения оттаивания образца через верхнюю и нижнюю поверхность. На верхнюю прокладку устанавливается прижимная пластина толщиной 0,5-1 мм.

Во время проведения испытаний рекомендуемая температура воды в ёмкости должна быть равна температуре окружающего воздуха (но не выше 15°C).

Перед погружением образца в журнал испытаний (таблица 1) заносят следующие данные:

- дата и время проведения испытания;
- глубина отбора керна ($h_{отб}$);
- геологическое описание образца;
- масса образца мёрзлого грунта ($m_{обр}$);
- диаметр образца мёрзлого грунта ($D_{обр}$);
- высота образца мёрзлого грунта ($H_{обр}$);
- температура образца мёрзлого грунта (по данным термометрии) ($T_{обр}$);
- масса воды в теплоизолированной ёмкости ($m_в$);
- температура воды в теплоизолированной ёмкости ($T_{в.н.}$);

В процессе оттаивания частицы грунта проходят сквозь ячейки сетчатого стакана и оседают на дно ёмкости. Испытание проводится до полного разрушения образца либо до прекращения изменения массы образца в воде (при изменении массы образца в воде менее чем на 1 г за 5 мин) (характерно для мёрзлых глин и мёрзлых грунтов с содержанием органики более 10%). Изменение веса образца в процессе его разрушения фиксируется с помощью весов с точностью до 1 г. Температурой воды в ёмкости в конце испытания

($T_{в.к.}$) является температура воды, при которой прекратилось разрушение образца.

В процессе испытания в журнал с интервалом замеров 1 мин. для супесчано-песчаных пород и 5 мин. для суглинков, глин, льда и грунтов с содержанием органики более 10% заносятся:

- текущее время испытания (τ_i);
- температура воды в ёмкости на данном временном интервале ($T_{в.i}$);
- вес образца в конце данного временного интервала (m_i).

После проведения испытания весь оттаявший грунт и грунт, оставшийся в сетчатом стакане (при его наличии), собирается для определения влажности.

Если начальная температура воды в ёмкости отличалась от температуры воздуха более чем на 2°C или время проведения испытаний превысило 1 час, то, по окончании испытаний, ёмкость вновь заполняется водой при той же температуре и производится замер изменения температуры воды в ёмкости без образца в течение времени проведения испытаний с образцом. По этим данным производится поправка на количество тепла, прошедшего через стенки ёмкости в ходе испытаний. Записываются изменения температуры воды ΔT_i (2) (через те же временные интервалы, что и в испытании с образцом). По формуле 3 вычисляется откорректированная с учётом влияния окружающей среды температура воды в ёмкости для каждого интервала времени ($T_{в.н.i}$).

$$\Delta T_i = T_{в.i} - T_n, \quad (2)$$

где: T_n – температура воды в ёмкости в начале температурных замеров воды без образца.

$$T_{в.н.i} = T_{в.i} - \Delta T_i, \quad (3)$$

В журнал испытаний заносятся следующие данные:

- изменение температуры воды в ёмкости на данном временном интервале (ΔT_i);

- температуры воды в ёмкости с учётом влияния окружающей среды для каждого интервала времени ($T_{в.н.i}$)
- время проведения испытания ($\tau_{исп}$);
- масса оставшегося в сетчатом стакане грунта (при его наличии) ($m_{ост}$);
- температура воды в ёмкости на момент полного разрушения образца (либо прекращения его разрушения) с учётом влияния окружающей среды ($T_{в.к.}$);
- плотность образца мёрзлого грунта;
- масса оттаявшего и прошедшего через сетчатый стакан грунта ($m_{разр}$).

Таблица 1

Журнал определения удельной скорости и удельной теплоты водно-теплого разрушения мёрзлого грунта

Дата и время проведения испытания:				
Геологическое описание образца:				
$h_{обр} =$ _____ (ММ)		$\tau_{исп} =$ _____ (МИН.)		
$m_{обр} =$ _____ (Г)		$m_{ост} =$ _____ (Г)		
$D_{обр} =$ _____ (ММ)		$T_{в.к.} =$ _____ (°С)		
$H_{обр} =$ _____ (ММ)		$\nu_T =$ _____ (М/(°С·Ч))		
$T_{обр} =$ _____ (°С)		$q_{нр} =$ _____ (ДЖ/М ³)		
$\rho_{обр} =$ _____ (КГ/М ³)		$W =$ _____ (%)		
$m_e =$ _____ (Г)		$m_{разр} =$ _____ (Г)		
$T_{в.н.} =$ _____ (°С)				
τ_i , МИН.	$T_{в.i}$, °С	m_i , Г	ΔT_i , °С	$T_{в.н.i}$, °С

Приведённая скорость водно-теплового разрушения вертикальной поверхности мёрзлого образца грунта для каждого интервала времени определяется по формуле 4:

$$v_{T_i} = \frac{\sqrt{\frac{m_i}{(\rho_{обр} - \rho_в) \cdot \pi \cdot H_{обр}}} - \sqrt{\frac{m_{i+1}}{(\rho_{обр} - \rho_в) \cdot \pi \cdot H_{обр}}}}{T_{ср.в.и} \cdot \tau_i}, \quad (4)$$

где: v_{T_i} – приведённая скорость водно-теплового разрушения вертикальной поверхности мёрзлого грунта для интервала между ближайшими замерами $\left(\frac{M}{^\circ C \cdot ч}\right)$, $T_{ср.в.и}$ – средняя температура воды в ёмкости за единичный интервал между замерами ($^\circ C$), τ – единичный интервал между замерами (ч).

Приведённая скорость водно-теплового разрушения вертикальной поверхности мёрзлого грунта (v_T) рассчитывается по формуле 5.

$$v_T = \frac{v_{T_i} + v_{T_{i+1}} + \dots + v_{T_n}}{n-2}, \quad (5)$$

где i – замеры, начиная с 3-его и заканчивая замером, соответствующим разрушению половины образца (n) (момент, когда вес образца в воде станет равным половине веса образца в воде в начале эксперимента).

Удельную теплоту разрушения мёрзлого грунта (q_{np}) под воздействием тепловой энергии воды определяют по формуле 6, полученной из уравнения теплового баланса:

$$q_{np} = \frac{\rho_{обр} \cdot (c_в \cdot m_в \cdot (T_{в.н.} - T_{в.к.}) - m_{пар} \cdot (c_л \cdot (-T_{обр.}) + T_{в.к.} \cdot (c_{ск.л} \cdot (1-W) + c_в \cdot W)))}{m_{обр}} \quad (6)$$

где: q_{np} – удельная теплота разрушения мёрзлого грунта $\left(\frac{Дж}{кг}\right)$,

$c_в$ – удельная теплоёмкость воды $\left(\frac{Дж}{кг \cdot ^\circ C}\right)$ (принимается $c_в = 4190 \frac{Дж}{кг \cdot ^\circ C}$),

$m_в$ – масса воды в ёмкости (кг), $T_{в.н.}$ – начальная температура воды в ёмкости ($^\circ C$), $T_{в.к.}$ – температура воды в ёмкости в конце испытания (момент

полного разрушения образца либо прекращения изменения массы образца в воде (при изменении массы образца в воде менее чем на 1 г за 5 мин)) ($^{\circ}\text{C}$), $m_{разр}$ – масса оттаявшего и прошедшего сквозь сетчатый стакан грунта (кг), $T_{обр.}$ – температура образца в начале испытания ($^{\circ}\text{C}$) (по данным термометрии), $c_{ск.г}$ – удельная теплоёмкость минерального скелета грунта (для песка – 0,71; супеси – 0,75; суглинка – 0,80; пылеватого глинистого грунта – 0,84; глины – 0,92) $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}}\right)$, $c_z = c_{ск.г} \cdot (1 - W) + c_l \cdot W$ – удельная теплоёмкость грунта $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}}\right)$, c_l – удельная теплоёмкость льда $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}}\right)$ (принимается $c_l = 2090 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}}$), W – влажность грунта.

Влажность грунта определяется путём высушивания оттаявшего грунта до постоянной массы по формуле 7.

$$W = \frac{m_{обр} - m_{сух}}{m_{обр}}, \quad (7)$$

где: $m_{сух}$ – масса высушенного грунта (разрушившегося и не разрушившегося), отобранного из ёмкости (г).

В журнал испытаний (таблица 1) заносятся значения v_T , q_{np} и W .

ПРИЛОЖЕНИЕ 2 – Методика определения технологических параметров создания подземных резервуаров

Методика определения технологических параметров создания подземных резервуаров основана на расчёте теплового баланса. Суммарное тепло, вносимое в подземный резервуар, должно быть равно сумме тепловых затрат в процессе создания камеры и изменению теплосодержания воды в резервуаре.

Расчёт динамики формообразования подземного резервуара производится пошагово. Задаётся величина разбиения по высоте массива грунта, вмещающего резервуар.

Шаги расчёта:

1. Задаются постоянные технологические параметры: высота резервуара H (м), радиус технологической скважины ($r_{ск}$), значения приведённых скоростей (v_{Ti}) и удельной теплоты ($Q_{прi}$) водно-теплового разрушения мёрзлых грунтов по высоте интервала строительства (h_i), уровень дна подземного резервуара (h_d) (рисунок 1).

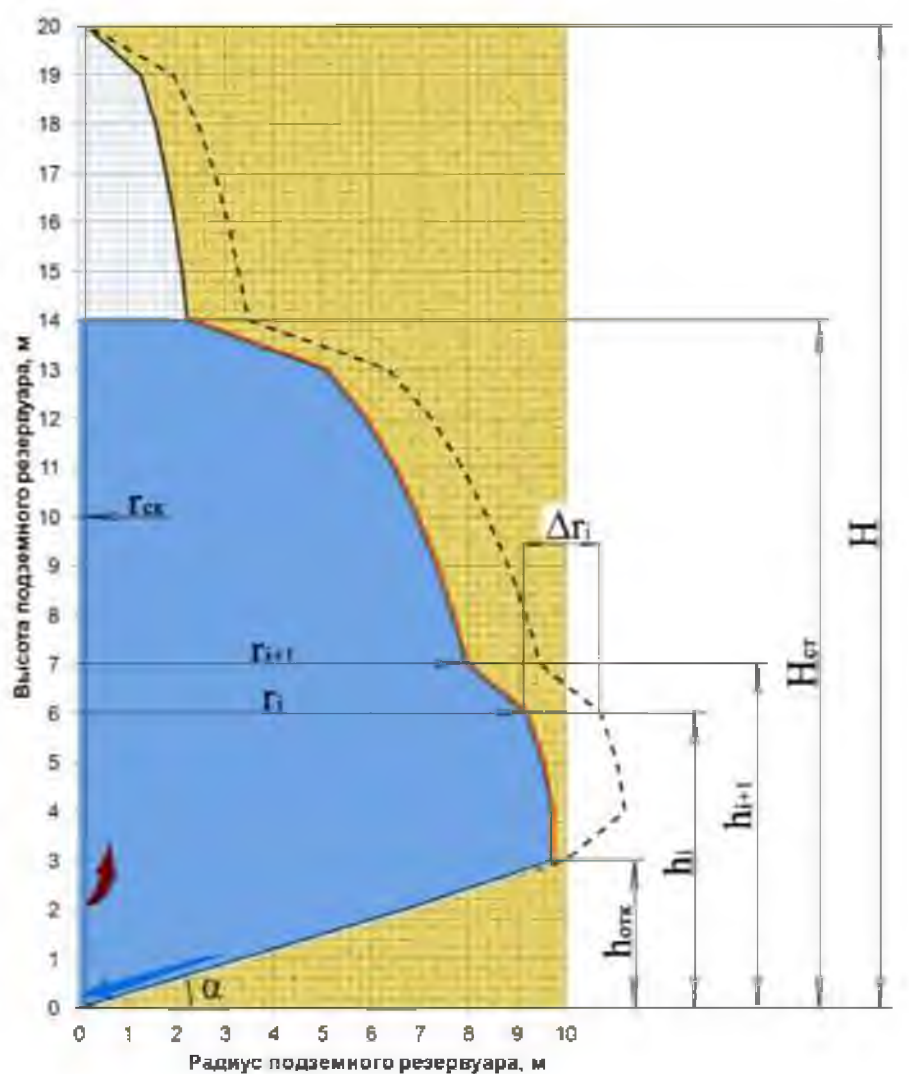


Рисунок 1 – Расчётный контур подземного резервуара на промежуточном этапе строительства

Для каждого расчётного шага длительностью $\tau_{ш}$ задаются технологические параметры, с помощью которых создаётся подземный резервуар необходимого объёма и формы:

высота уровня воды относительно дна выработки ($H_{ст}$) (м);

расход P_g (м³/ч) и температура подаваемой оборотной воды T_g (°C);

Рассчитывается объём воды в резервуаре с учётом высоты уровня воды в резервуаре по формуле 1.

$$V = \frac{\pi}{3} \cdot \sum \left((h_i - h_{i+1}) \cdot (r_i^2 + r_i \cdot r_{i+1} + r_{i+1}^2) \right), \quad (1)$$

для h_i от $h_{\delta}=0$ до h_{cm} ,

где: h_i и h_{i+1} – отметка высоты резервуара и следующая за ней через единичный интервал разбиения отметка высоты (м), r_i и r_{i+1} – соответствующие этим отметкам радиусы.

На первом расчётном шаге r_i и r_{i+1} равняются радиусу скважины $r_{ск}$.

2. Рассчитывается площадь оттаиваемой поверхности подземного резервуара (m^2) по формуле 2.

$$S = \sum S_i, \text{ где } S_i = \pi(r_i + r_{i+1}) \cdot (h_i - h_{i+1}). \quad (2)$$

для h_i от $h_{отк}$ до h_{cm} , где $h_{отк}$ – отметка по высоте подземного резервуара, где пересекается контур откоса дна подземного резервуара (соответствующий углу естественного откоса влажного грунта в донной части резервуара) с контуром подземного резервуара.

3. Средняя температура воды в резервуаре рассчитывается по формуле 3.

$$T_p = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a}, \quad (3)$$

где: a , b и c рассчитываются по формулам 4-12.

Если получаемая средняя температура (T_p), при подстановке в уравнение 3 значений a , b и c , рассчитанных по уравнениям 4-6, принимает значение от 4 и выше, то она принимается за истинную.

Если нет, то уравнение 3 рассчитывается с использованием переменных a , b и c , значения которых получены по уравнениям 7-9. В этом случае, если $3 < T_p < 4$, то она принимается за истинную. В противном случае, температура из уравнения 3 рассчитывается с использованием переменных a , b и c , значения которых получены по уравнениям 10-12.

$$a = v_T \cdot S \cdot \tau_{ш} \cdot (c_{\epsilon} \cdot \rho_{\epsilon} \cdot (2 \cdot W - 1) + 2 \cdot c_{\chi.2} \cdot \rho_{\chi.2} \cdot (1 - W)), \quad (4)$$

$$b = v_T \cdot S \cdot \tau_{ш} \cdot (q_{np} - c_{\epsilon} \cdot \rho_{\epsilon} \cdot T_m) + c_{\epsilon} \cdot \rho_{\epsilon} \cdot (P_{\epsilon} \cdot \tau_{ш} + V_n), \quad (5)$$

$$c = -(c_{\sigma} \cdot \rho_{\sigma} \cdot (P_{\sigma} \cdot T_{\sigma} \cdot \tau_{uu} + V_n \cdot T_{p.n}) + \lambda \cdot S \cdot T_m \cdot \tau_{uu}), \quad (6)$$

$$a = v_T \cdot S \cdot \tau_{uu} \cdot (c_{\sigma} \cdot \rho_{\sigma} \cdot (1+W) + c_{\sigma.z} \cdot \rho_{\sigma.z} \cdot (1-W)), \quad (7)$$

$$b = v_T \cdot S \cdot \tau_{uu} \cdot (q_{np} - c_{z.} \cdot \rho_{z.} \cdot T_m - 4 \cdot c_{\sigma} \cdot \rho_{\sigma} \cdot (2-W) + 4 \cdot c_{\sigma.z} \cdot \rho_{\sigma.z} \cdot (1-W)) + (8) \cdot \rho_{\sigma} \cdot V_n$$

$$c = c_{\sigma} \cdot \rho_{\sigma} \cdot (P_{\sigma} \cdot \tau_{uu} \cdot (4-T_{\sigma}) - V_n \cdot T_{p.n}) - \lambda \cdot S \cdot T_m \cdot \tau_{uu}), \quad (9)$$

$$a = v_T \cdot S \cdot \tau_{uu} \cdot \left(c_{\sigma} \cdot \rho_{\sigma} \cdot \left(2\frac{1}{3}W - 1\frac{2}{3} \right) + 2\frac{1}{3}c_{\sigma.z} \cdot \rho_{\sigma.z} \cdot (1-W) \right), \quad (10)$$

$$b = v_T \cdot S \cdot \tau_{uu} \cdot (q_{np} - c_{z.} \cdot \rho_{z.} \cdot T_m) + c_{\sigma} \cdot \rho_{\sigma} \cdot \left(1\frac{1}{3}P_{\sigma} \cdot \tau_{uu} + V_n \right), \quad (11)$$

$$c = -(c_{\sigma} \cdot \rho_{\sigma} \cdot (P_{\sigma} \cdot T_{\sigma} \cdot \tau_{uu} + V_n \cdot T_{p.n}) + \lambda \cdot S \cdot T_m \cdot \tau_{uu}), \quad (12)$$

где: T_p – средняя температура воды в резервуаре ($^{\circ}\text{C}$); P_{σ} – расход $\left(\frac{\text{м}^3}{\text{ч}}\right)$ и температура T_{σ} ($^{\circ}\text{C}$) подаваемой в подземный резервуар оборотной воды на расчётном шаге длительностью τ_{uu} ; c_{σ} – удельная теплоёмкость воды $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}}\right)$; ρ_{σ} – плотность воды $\left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}\right)$; V_n и $T_{p.n}$ – объём (м^3) и средняя температура воды ($^{\circ}\text{C}$) в резервуаре в начале расчётного шага (в конце предыдущего расчётного шага); $c_{z.}$ – средняя удельная теплоёмкость массива мёрзлых грунтов в интервале создания подземного резервуара $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}}\right)$; $\rho_{z.}$ – средняя плотность массива мёрзлых грунтов в интервале создания подземного резервуара $\left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}\right)$; q_{np} – средняя удельная теплота водно-теплового разрушения массива мёрзлых грунтов в интервале создания подземного резервуара $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}\right)$; T_m – средняя температура массива мёрзлых грунтов в интервале создания подземного резервуара ($^{\circ}\text{C}$); v_T – средняя приведённая скорость водно-теплового

разрушения вертикальной поверхности массива мёрзлых грунтов в интервале создания подземного резервуара $\left(\frac{M}{^{\circ}C \cdot ч}\right)$; S – суммарная площадь оттаиваемой вертикальной поверхности резервуара (m^2); где W – средняя влажность массива мёрзлых грунтов в интервале создания подземного резервуара (определяется по формуле 13, $c_{ч.г.}$ – средняя удельная теплоёмкость минерального скелета мёрзлых грунтов в интервале создания подземного резервуара $\left(\frac{Дж}{кг \cdot ^{\circ}C}\right)$; $\rho_{ч.г.}$ – средняя плотность минерального скелета мёрзлых грунтов в интервале создания подземного резервуара $\left(\frac{кг}{m^3}\right)$; λ – средний коэффициент теплопроводности массива мёрзлых грунтов в интервале создания подземного резервуара $\left(\frac{Дж}{m \cdot ч \cdot град}\right)$.

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0}, \quad (13)$$

где m_1 – масса влажного грунта с бюксой, m_2 – масса высушенного грунта с бюксой, m_0 – масса бюксы.

Средние значения параметров, характеризующих свойства массива мёрзлых грунтов в интервале создания подземного резервуара определяются по формуле 14.

$$X = X_j \frac{h_{ИГЭj}}{H_{cm}} + X_{j+1} \frac{h_{ИГЭ(j+1)}}{H_{cm}} + \dots + X_{j+n} \frac{h_{ИГЭ(j+n)}}{H_{cm}} \quad (14)$$

где X – среднее значение параметра, характеризующего свойства массива мёрзлых грунтов в интервале создания подземного резервуара; j от 1 до n – представительные интервалы (отличающиеся по составу или структуре пропластки породы), $h_{ИГЭ}$ – мощность инженерно-геологического элемента.

4. Вычисляется температура воды для каждого единичного интервала по высоте резервуара ($T_{h.i}$).

Если $T_p \geq 4^{\circ}C$, то значения $T_{h.i}$ вычисляются по формуле 15.

$$T_{h.i} = T_p \quad (15)$$

Если $3 < T_p < 4$ °C, то $T_{h,i}$ вычисляются по формуле 16.

$$T_{h,i} = 4 \cdot \left(1 + (T_p - 4) \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{h_i}{H_{cm}} - 1} + 1 \right) \right) \quad (16)$$

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

Если $T_p \leq 3$ °C, то значения $T_{h,i}$ вычисляются по формуле 17.

$$T_{h,i} = \frac{4}{3} \cdot T_p \sqrt[3]{1 - \frac{h_i}{H_{cm}}} \quad (17)$$

5. На каждом единичном интервале высоты подземного резервуара по формуле 18 вычисляется значение (Δr_i), на которое подвинется боковая стенка подземного резервуара в результате оттаивания. Вычисляются новые радиусы камеры по высоте (r_i) по формуле 19,

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

$$r_i = r_{i,n} + \Delta r_i \quad (19)$$

где: $r_{i,n}$ – радиус подземного резервуара на единичном интервале высоты в конце предыдущего шага расчёта (для первого шага расчёта $r_{i,n} = r_{ck}$); $v_{T,i}$ – приведённая скорость водно-теплового разрушения вертикальной поверхности мёрзлых грунтов на единичном интервале высоты подземного резервуара.

6. Отметки радиусов в донной части резервуара по высоте корректируются с учётом угла естественного откоса, характерного для того или иного грунта.

Если в донной части резервуара значения радиуса r_i на высоте h_i превысят значения $r_{отк,i} = \frac{h_i}{tg\alpha}$ (м), то радиус на этой высоте принимается равным

$r_{отк,i}$,

где $r_{отк.i}$ – радиус в донной части резервуара на высоте h_i от дна резервуара, сформированный за счёт формирования нижней части резервуара под определённым углом α (угол естественного откоса грунта в воде).

7. По данным изменения радиусов подземного резервуара r_i (для этого шага расчёта) с высотой строится контур камеры.

8. Рассчитывается общий объём созданной подземной камеры по формуле 20.

$$V = \frac{\pi}{3} \cdot \sum \left((h_i - h_{i+1}) \cdot (r_i^2 + r_i \cdot r_{i+1} + r_{i+1}^2) \right), \quad (20)$$

для h_i от 0 до Н.

9. Цикл вычислений по пунктам с 2 по 9 повторяется для следующего временного интервала ($\tau_{ш}$), пока резервуар не достигнет необходимого объёма и формы.

10. Корректируя по шагам расчёта высоту уровня воды в подземном резервуаре, расход и температуру воды получаем необходимую форму подземного резервуара.

11. Общее количество поданной воды определяется по формуле 21. Общее время создания подземного резервуара определяется путём суммирования времени всех шагов расчёта.

$$V_{\sigma} = P_{\sigma.j} \cdot \tau_{ш.j} + P_{\sigma.j+1} \cdot \tau_{ш.j+1} + \dots + P_{\sigma.m} \cdot \tau_{ш.m}, \quad (21)$$

где j – порядковый номер шага расчёта, m – количество шагов расчёта.

12. Шаги расчёта с одинаковыми задаваемыми параметрами ($H_{ст}$, P_{σ} , T_{σ}), группируются в этапы строительства. Время размыва подземного резервуара τ_p рассчитывается, как сумма шагов расчёта к концу определенного этапа.

Технологические параметры для каждого этапа строительства заносятся в таблицу 1.

Технологические параметры создания подземных резервуаров

№ этапа	$H_{ст}, м$	$P_{г}, \frac{м^3}{ч}$	$T_{г}, °C$	$V, м^3$	$\tau_p, ч$	$V_B, м^3$
1	2	3	6	7	8	9