

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
Национальный исследовательский технологический университет
«МИСиС»

На правах рукописи



НИКОЛАЕВ ПЕТР ВЛАДИМИРОВИЧ

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИИ ЗАМОРАЖИВАНИЯ
ГРУНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТВЕРДОГО ДИОКСИДА УГЛЕРОДА
В ПОДЗЕМНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Специальности:

25.00.22 «Геотехнология (открытая, подземная и строительная)»

25.00.20 «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная
аэрогазодинамика и горная теплофизика»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор Шуплик М.Н.

Москва
2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ОПЫТА ПО ИСКУССТВЕННОМУ ЗАМОРАЖИВАНИЮ ГРУНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТВЕРДОГО ДИОКСИДА УГЛЕРОДА.....	12
1.1 Анализ способов и технологических схем замораживания грунтов с использованием твердого диоксида углерода.....	12
1.1.1 Способ замораживания грунтов с загрузкой твердого диоксида углерода в замораживающую колонку.....	13
1.1.2 Комбинированный способ замораживания грунтов	16
1.2 Анализ теоретических и экспериментальных исследований	20
1.3 Анализ опытно-промышленного внедрения	23
1.4 Анализ существующих подходов к проектированию процесса замораживания с использованием твердого диоксида углерода.....	35
1.5 Выводы по главе, цель и задачи исследований	38
2 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАМОРАЖИВАНИЯ ГРУНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТВЕРДОГО ДИОКСИДА УГЛЕРОДА.....	40
2.1 Исследование процесса теплопередачи в замораживающей колонке, заполненной твердым диоксидом углерода	40
2.2 Исследование процесса теплопередачи в испарителе при комбинированном способе замораживания грунтов.....	55
2.3 Выбор и обоснование типа хладоносителя для комбинированного способа замораживания.....	61
2.4 Выводы по главе.....	67

3	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЗАМОРАЖИВАНИЯ ГРУНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТВЕРДОГО ДИОКСИДА УГЛЕРОДА.....	69
3.1	Цели, задачи и программа исследований	69
3.2	Методика проведения исследований	72
3.3	Экспериментальные установки и проведение исследований.....	77
3.4	Результаты и анализ экспериментальных данных.....	81
3.4.1	Анализ процесса теплопередачи при замораживании грунтов одиночной колонкой.....	81
3.4.2	Анализ процесса теплообмена между твердым диоксидом углерода и хладоносителем при комбинированном способе замораживания	90
3.5	Исследования процесса замораживания грунтов с использованием математических моделей.....	94
3.5.1	Постановка задачи. Обоснование способа математического моделирования.....	94
3.5.2	Моделирование искусственного замораживания грунтов в подземном строительстве.....	100
3.6	Выводы по главе.....	111
4	ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИИ ЗАМОРАЖИВАНИЯ ГРУНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТВЕРДОГО ДИОКСИДА УГЛЕРОДА.....	113
4.1	Обоснование новых технологических схем замораживания грунтов с использованием твердого диоксида углерода.....	113
4.2	Исходные данные для проектирования замораживания грунтов	118
4.3	Определение геометрических размеров ледогрунтового ограждения	122
4.4	Определение параметров технологии замораживания грунтов с загрузкой твердого диоксида углерода в замораживающие колонки	123

4.4.1	Определение расстояния между замораживающими колонками	123
4.4.2	Обоснование режима загрузки твердого диоксида углерода в замораживающую колонку.....	126
4.4.3	Определение стоимости производства работ по замораживанию грунта твердым диоксидом углерода	129
4.5	Определение параметров технологии замораживания при комбинированном способе замораживания грунтов.....	132
4.5.1	Технологическая схема с трубным испарителем.....	133
4.5.2	Технологическая схема с беструбным испарителем.....	135
4.6	Рекомендации по технологии производства работ по замораживанию грунтов твердым диоксидом углерода.....	137
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....		141
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....		143

ВВЕДЕНИЕ

Одной из проблем при строительстве подземных сооружений являются подземные воды. Их наличие препятствует ведению горно-строительных работ, угрожая подтоплением строящегося сооружения, уменьшает устойчивость и прочность окружающего массива, что может приводить к его разрушению.

Как показали исследования [32, 68], до 27% всех подземных сооружений в г. Москве возводятся в обводнённых неустойчивых грунтах, требующих применения специальных способов строительства.

Многолетний опыт показывает, что одним из эффективных специальных способов строительства является способ искусственного замораживания грунтов [55, 67, 69].

Технология замораживания грунтов в условиях города имеет ряд принципиальных особенностей по сравнению с шахтным строительством: малый объем замораживаемого грунта (до 300–400 м³); зачастую высокие скорости грунтовых вод (свыше 2 м/сутки); наличие локальных источников тепла (коллекторов, теплотрасс и др.), имеющих температуру, иногда превышающую 50 °С; химическое загрязнение грунтовых вод, снижающее температуру их замерзания (до -20 °С) [32, 68]. Кроме того, способ замораживания грунтов в городских условиях часто применяется при ликвидации различных аварийных ситуаций, возникающих при прорыве воды, грунта в строящиеся выработки.

В городском подземном строительстве наиболее широко применяется рассольный способ замораживания [24, 57, 75 и др.] при котором источником холода для замораживания грунта является охлажденный до низких температур (обычно не ниже минус 30 °С) жидкий хладоноситель, в качестве которого наибольшее распространение получил водный раствор (рассол) хлористого кальция [85, 96]. Его охлаждение происходит на замораживающей станции с применением холодильной установки, построенной по обычной схеме холодильной машины [54, 85]. Возможное достижение более низких температур

(минус 40–60 °С) требует кратного увеличения затрат на холодильное оборудование, материалы, электроэнергию [57].

Номенклатура выпускаемых и эксплуатируемых холодильных установок для замораживания грунтов достаточно ограничена. Из-за этого, зачастую, при необходимости производить работы по замораживанию малых объемов грунта (до 400 м³) приходится применять замораживающие станции со значительно большей мощностью, чем требуется для производства работ на конкретном объекте. Так, наибольшее распространение в подземном строительстве получили передвижные замораживающие станции мощностью от 100 до 200 кВт (типа ПХС-100/ТНТ-100/200) [13, 41, 55]. Установки данного типа позволяют производить замораживание до 3000 м³ грунта, что является достаточным для большинства объектов подземного строительства. Однако, как показало исследование [68], при их использовании с уменьшением объема замораживаемого грунта с 700 до 150 м³ удельная стоимость замораживания 1 м³ грунта возрастает в 3–5 раз.

Существенным недостатком рассольного замораживания является достаточно продолжительный подготовительный период в процессе которого происходит монтаж рассольной сети, монтаж и наладка замораживающей станции. Наиболее остро данный недостаток проявляется при необходимости производить замораживание грунта для ликвидации аварийных ситуаций, когда скорость производства работ является приоритетным фактором.

Одним из путей уменьшения стоимости производства работ по замораживанию малых объемов грунта, достижения более низких температур и сокращения сроков подготовительного периода является применение безрассольных способов замораживания. Они основаны на том, что тепло от грунта отнимается при помощи вещества – хладагента, непосредственно помещенного в замораживающую колонку. В качестве хладагента, наиболее широкое применение нашли жидкий азот и твердый диоксид углерода [53, 75, 85, 98].

При использовании жидкого азота температура стенки замораживающей колонки может достигать минус 196 °С, что позволяет существенно сократить время активного замораживания. Это особенно актуально при ликвидации

аварийных ситуаций. Однако технология производства работ при использовании жидкого азота является технически сложной и опасной (непосредственный контакт человека с данным хладагентом или его насыщенными парами может принести серьезный вред здоровью). Значительным недостатком является высокая стоимость жидкого азота и большой удельный расход, достигающий 700 кг на 1 м³ замораживаемого грунта [6, 41, 52].

Одной из перспективных безрассольных технологий является замораживание грунтов с использованием твердого диоксида углерода [28, 32, 34, 68]. В нашей стране данная технология получила значительное развитие благодаря работам М.Н. Шуплика. Опыт промышленного внедрения отражен в работах В.А. Плохих, К.П. Никифорова, В.Н. Киселева, Е.А. Деplanьи и др [33, 34, 43, 45, 47, 68].

Анализ имеющегося опыта использования твердого диоксида углерода для замораживания грунтов в подземном строительстве показал, что он обладает целым рядом преимуществ по сравнению с рассольной технологией замораживания грунтов. Это – простота организации работ, малый период подготовительных работ, предшествующий замораживанию, значительное (в 2–3 раза) сокращение времени создания ледогрунтового ограждения заданных размеров и конфигурации. Вместе с тем не все технологические параметры, такие как: количество хладагента, загружаемого в замораживающие колонки; режим его загрузки; время активного замораживания; влияние глубины замораживания и свойств грунтов на процесс теплопередачи – обоснованы в достаточной степени, что приводит на практике к широкому диапазону их изменения и, как следствие, удорожанию стоимости и увеличению времени производства работ по замораживанию.

Для более широкого внедрения технологии замораживания грунтов с использованием твердого диоксида углерода необходимо решить ряд задач по обоснованию технологии её реализации и дальнейшего совершенствования. В частности, необходимо учесть специфику замораживания грунтов в городских условиях, выявить влияние глубины замораживания на процесс формирования ледогрунтового ограждения во времени, обосновать новые ресурсосберегающие технологии с использованием комбинированного способа замораживания.

Таким образом, обоснование параметров технологии замораживания грунтов с использованием твердого диоксида углерода в городском подземном строительстве с учетом вышеназванных факторов является актуальной научной задачей.

Цель работы – обоснование параметров технологии замораживания грунтов с использованием твердого диоксида углерода, обеспечивающих уменьшение сроков замораживания, ресурсосбережение и снижение стоимости замораживания малых объемов грунта при строительстве городских подземных сооружений в сложных горно-геологических условиях.

Идея работы состоит в том, что при замораживании малых объемов грунта существующая технология рассольного замораживания заменяется на безрассольную технологию с использованием твердого диоксида углерода, что позволит сократить продолжительность работ по замораживанию грунта, а также обеспечить ресурсосбережение и снижение стоимости производства работ.

Для достижения поставленной цели необходимо решить **следующие задачи**:

- провести анализ теоретических и экспериментальных исследований, направленных на разработку технологии замораживания грунтов с использованием твердого диоксида углерода, систематизировать и оценить существующий опыт промышленного внедрения;
- исследовать процесс теплопередачи от твердого диоксида углерода к стенке замораживающей колонки, к змеевику испарителя и незамерзающей жидкости;
- обосновать новые технологические схемы замораживания грунтов с использованием твердого диоксида углерода и конструкции испарителей для комбинированного способа замораживания;
- разработать методику определения параметров технологии замораживания грунтов с использованием твердого диоксида углерода, загружаемого в замораживающую колонку, и методику определения параметров испарителя для охлаждения хладоносителя твердым диоксидом углерода при использовании комбинированной технологии замораживания грунтов.

Методы исследований. Для решения сформулированной научной задачи в работе выполнены комплексные исследования с использованием методов математической статистики, компьютерного моделирования, системного анализа и теории подобия, лабораторных экспериментальных исследований.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Установлено, что при создании ледогрунтового ограждения заданной формы и размеров замораживающими колонками, заполненными твердым диоксидом углерода, его часовой расход, отнесенный к 1 м^2 поверхности замораживающей колонки, пропорционален теплопроводности замороженного грунта и снижается с ростом ледогрунтового ограждения от 10–16 кг/(м²·ч) в начальный период до 3–6 кг/(м²·ч) при толщине ограждения 1.5–2 м.

2. Установлено, что количество твердого диоксида углерода, необходимое для создания 1 м^3 конструкции ледогрунтового ограждения, является постоянной величиной при толщине ограждения до 0.6–0.8 м, лежащей в диапазоне от 250 до 380 кг/м³ в зависимости от весовой влажности замораживаемого грунта, и в дальнейшем линейно возрастает по мере увеличения толщины ледогрунтового ограждения.

3. Установлено, что при создании конструкции ледогрунтового ограждения замораживающими колонками, заполненными твердым диоксидом углерода, коэффициент теплоотдачи от стенки колонки к твёрдому диоксиду углерода является степенной функцией от теплового потока, которая возрастает с глубиной на начальных пяти метрах и не зависит от неё на большей глубине.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются: достаточным объемом и представительностью выполненных экспериментальных исследований (две серии опытов (12 и 18 опытов) на разных лабораторных стендах, получено свыше 1000 экспериментальных точек); удовлетворительным совпадением полученных зависимостей с данными лабораторных исследований, выполненных другими авторами; корректной постановкой задачи и использованием апробированных методов исследований; удовлетворительным совпадением данных математического моделирования с

данными лабораторных экспериментов; положительным опытом внедрения основных результатов исследования, выводов и рекомендаций в производство.

Научная новизна работы заключается:

- в установлении зависимости, позволяющей определять величину коэффициента теплоотдачи от замораживающей колонки к твердому диоксиду углерода с учетом глубины замораживания;
- в установлении зависимостей для определения параметров технологии замораживания грунтов колонками, заполненными твердым диоксидом углерода (времени активного замораживания, удельного и часового расхода твердого диоксида углерода), отличающихся от существующих учётом теплофизических свойств грунта и вида применяемого твердого диоксида углерода;
- в обосновании параметров комбинированной технологии замораживания грунтов, при которой охлаждение жидкого хладоносителя происходит в испарителе твердым диоксидом углерода.

Научное значение работы состоит в теоретическом обосновании и дальнейшем развитии существующих представлений о формировании ледогрунтового ограждения вокруг замораживающей колонки, заполненной твердым диоксидом углерода, учитывающих влияние теплофизических свойств массива грунта, вид применяемого твердого диоксида углерода и глубину замораживания, в определении принципов проектирования испарителя для комбинированного способа замораживания грунтов, при котором охлаждение хладоносителя осуществляется твердым диоксидом углерода.

Практическое значение работы заключается:

- в обосновании режима загрузки твердого диоксида углерода в замораживающие колонки, позволяющего управлять процессом образования ледогрунтового ограждения, тем самым создавать ограждение переменной по глубине толщины;
- в обосновании параметров испарителя для комбинированного способа замораживания грунтов, позволяющего ускорить процесс создания ледогрунтового ограждения заданной формы и размеров;

- в обосновании нового варианта комбинированного способа замораживания грунтов, при котором испаритель включается в рассольную сеть совместно с компрессорной замораживающей станцией, что позволяет повысить мощность замораживающей станции и понизить температуру хладоносителя;
- в разработке Рекомендаций по проектированию и производству работ по искусственному замораживанию грунтов с использованием твердого диоксида углерода.

Реализация выводов и результатов работы. Разработанные Рекомендации по проектированию и производству работ по искусственному замораживанию грунтов с использованием твердого диоксида углерода приняты к использованию ЗАО «ОШК «Союзспецстрой».

Апробация работы. Основные положения докладывались и обсуждались на международных научных симпозиумах «Неделя горняка» в 2014 и 2016 гг. (г. Москва) на 10-й международной конференции «Freiberg – St. Petersburger Kolloquium junger Wissenschaftler» в 2015 г. (г. Фрайберг, Германия); обсуждались на научных заседаниях и семинарах кафедры строительства подземных сооружений и горных предприятий НИТУ «МИСиС» в 2013–2016 гг.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 научных работ, из них 6 статей в изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России.

Объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, содержит 6 таблиц, 41 рисунок и список литературы из 100 наименований.

1 АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ОПЫТА ПО ИСКУССТВЕННОМУ ЗАМОРАЖИВАНИЮ ГРУНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТВЕРДОГО ДИОКСИДА УГЛЕРОДА

1.1 Анализ способов и технологических схем замораживания грунтов с использованием твердого диоксида углерода

Искусственное замораживание грунтов является универсальным специальным способом строительства подземных сооружений в обводненных грунтах.

Суть данного способа заключается в том, что по контуру будущей выработки до производства строительных работ по её возведению через всю толщу обводненного грунта бурят скважины, в которые монтируется система труб. Через данные трубы пропускают охлаждённую до отрицательных температур жидкость (хладоноситель) или в них помещается холодильный агент, в результате этого тепло от грунта отнимается и вода, содержащаяся в грунте, замерзает. Таким образом вокруг скважины образуется ледогрунтовый цилиндр. После смыкания соседних цилиндров образуется ледогрунтовое (ледопородное) ограждение, которое отличается от исходного массива значительной прочностью и водонепроницаемостью [54, 62, 85].

Применение твердого диоксида углерода в качестве холодильного агента для замораживания грунтов началось во второй половине 1980-ых годов [68]. К настоящему моменту предложено несколько вариантов реализации данного способа замораживания, часть из которых была успешно опробована в рамках опытно-промышленного внедрения.

Способы использования твердого диоксида углерода для замораживания грунтов можно разделить на две группы:

1. способ с загрузкой твердого диоксида углерода в замораживающие колонки;
2. комбинированный способ замораживания, при котором твердый диоксид углерода служит для охлаждения жидкого хладоносителя.

1.1.1 Способ замораживания грунтов с загрузкой твердого диоксида углерода в замораживающую колонку

Наиболее распространенный и простой способ замораживания грунтов с использованием твердого диоксида углерода осуществляется путем размещения твердого диоксида углерода непосредственно в замораживающей колонке (рисунок 1.1). Благодаря теплу, поступающему от массива грунта, твердый диоксид углерода сублимирует. При этом температура в колонке опускается до минус 78.9 °С. По мере сублимации в колонке интенсивно накапливается газообразный диоксид углерода, который в результате увеличения давления поднимается по замораживающей колонке на поверхность и уходит в атмосферу осуществляя отвод тепла из окружающего массива.

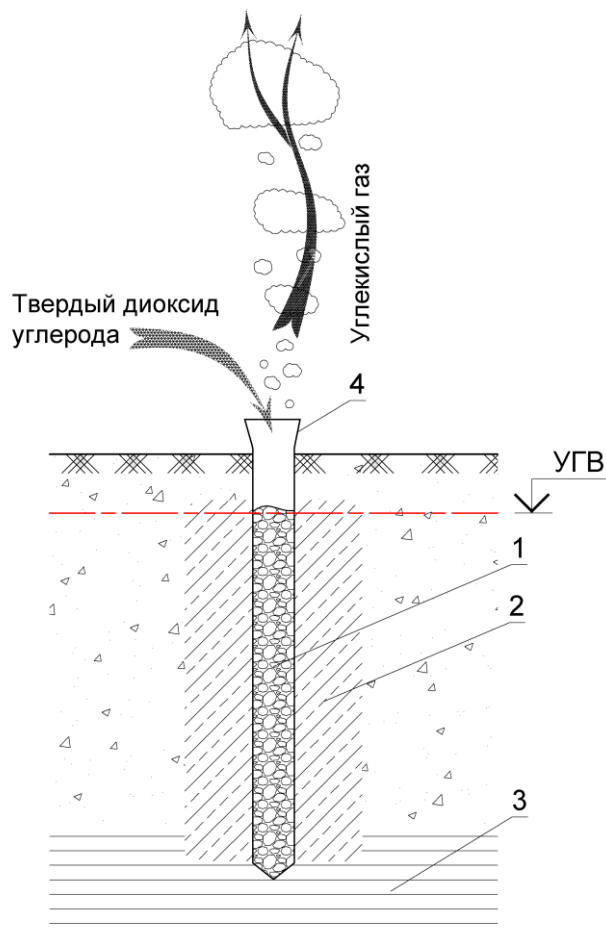


Рисунок 1.1 – Способ замораживания грунтов замораживающей колонкой, заполненной твердым диоксидом углерода: 1 – твердый диоксид углерода; 2 – ледогрунтовый цилиндр; 3 – водоупорный пласт; 4 – замораживающая колонка

Данный способ замораживания, исходя из технологических ограничений, может применяться при замораживании грунтов вертикальными и наклонными (до 30–40°) колонками длиной до 30–40 м, что является достаточным для условий городского подземного строительства [32, 55].

На участке расположения твердого диоксида углерода необходимо стремиться к тому, чтобы был плотный контакт между твёрдым диоксидом углерода и стенкой колонки. При плотном контакте температура стенки будет близка к температуре сублимации. При отсутствии плотного контакта (что и имеет место на практике) на поверхности стенки сформируется газовая прослойка, которая ухудшит условия отвода тепла и увеличит перепад между температурой стенки и температурой сублимации диоксида углерода.

Недостатком данного способа является сложность поддержания твердого диоксида углерода на заданной глубине. Это может приводить к неравномерности формирования ледогрунтового ограждения или возрастанию потерь холода на охлаждение вышележащих слоёв массива [68].

Для устранения данного недостатка в работе [68] предложено в колонку на глубину замораживания заливать жидкость, температура замерзания которой должна быть не выше температуры сублимации. В жидкость загружается твердый диоксид углерода, в результате жидкость охлаждается и отнимает тепло от грунтового массива, окружающего колонку.

Интенсивное перемешивание жидкости в замораживающей колонке в результате выделения газа при сублимации диоксида углерода способствует интенсификации процесса теплообмена между жидкостью и массивом грунта.

В работе [68] рекомендуется при данной технологической схеме обеспечивать концентрацию диоксида углерода в жидкости на уровне не менее 50 %. Однако плотность диоксида углерода отлична от плотности незамерзающих жидкостей, тогда при данной концентрации возможно проявление явления всплытия или осаждения хладагента. Локальное увеличение концентрации диоксида углерода в одной из частей колонки, приведёт к изменению интенсивности теплообмена по её длине.

Избежать этого возможно, если загрузку диоксида углерода в колонку производить таким образом, чтобы он полностью заполнял колонку в требуемом диапазоне глубин, а жидкость заполняла только пустоты между гранулами. Дополнительным положительным эффектом, наблюдаемым при этом, будет значительное снижение требуемого объема незамерзающей жидкости.

При смешивании твердого диоксида углерода и жидкости температура смеси получается отличной от температуры сублимации диоксида углерода. Температура смеси с ацетоном составляет минус 78 °С, с этиловым спиртом минус 72 °С., с диэтиловым эфиром минус 82.5 °С [66].

Используя свойство твердого диоксида углерода понижать температуру сублимации в зависимости от скорости движения окружающего его воздуха [38, 60, 61], в работе [68] предлагалась схема, при которой в колонку опускается труба малого диаметра, перфорированная отверстиями по длине. После этого в колонку загружают расчетное количество диоксида углерода, а по перфорированной трубе подается сжатый воздух. Диаметр отверстий, количество подаваемого воздуха и давление в системе должны быть подобраны так, чтобы скорость воздушной струи на выходе из отверстий была в пределах 0.5–0.7 м/с, а её температура была не выше температуры сублимации диоксида углерода. Такой режим обеспечивает температуру сублимации диоксида углерода до минус 110°С, что будет приводить к интенсификации процесса замораживания грунтов.

Предлагаемая технологическая схема весьма проста в реализации, однако с точки зрения материалоемкости требует дополнительного количества перфорированных труб, наличия источников получения сжатого воздуха. Подача в колонку воздуха с температурой выше температуры сублимации диоксида углерода приведёт к активному теплообмену между ним и диоксидом углерода, при этом тепло, затраченное на охлаждение воздуха, будет уходить в атмосферу являясь потерями.

Температура сублимации диоксида углерода уменьшается с уменьшением давления. На основании данного свойства предлагалось создавать в

замораживающих колонках пониженное давление, путем откачки воздуха и углекислого газа [68]. Однако данная схема сложна в реализации и трудоемка.

Замораживание грунтов с применением твердых криоагентов по сравнению с рассольным замораживанием проще в реализации, более мобильно. Достигается экономия ресурсов: не требуются трубопроводы 50 и 200–250 мм (в среднем при полной нагрузке замораживающей станции мощностью 210 кВт расходуется до 1200 м труб каждого диаметра); нет необходимости иметь источник электрической энергии; не нужна вода (на 1 кВт мощности замораживающей станции может требоваться до 0.35 м³/ч охлаждающей воды) [11, 68, 85]. Отсутствует потребность в квалифицированном персонале, обслуживающем работу станции. При этом достигается снижение времени замораживания в 2–3 раза.

По сравнению с замораживанием жидким азотом, замораживание твердым диоксидом углерода проще в реализации и безопаснее. Твердый диоксид углерода не требует особых условий хранения и транспортировки, он безопасен при кратковременном контакте с человеком. При его применении упрощается конструкция замораживающей колонки. Из-за большей теплоты фазового перехода (574 кДж/кг против 199 кДж/кг у жидкого азота [66]) и меньшей стоимости твердого диоксида углерода, стоимость замораживания 1 м³ грунта значительно ниже.

Замораживание грунтов твердым диоксидом углерода может производиться одновременно с рассольным замораживанием на отдельных участках или горизонтах, на которых требуется достижения более низких температур, чем возможно при рассольном замораживании. Данный способ использовался на ряде объектов, как сочетание рассольного замораживания с замораживанием жидким азотом [84].

1.1.2 Комбинированный способ замораживания грунтов

Использование твердого диоксида углерода позволило сформировать новый способ замораживания – комбинированный, при котором твердый диоксид

углерода применяется в качестве хладагента для охлаждения хладоносителя. Данный способ является вариантом рассольного замораживания, при котором вместо замораживающей станции используется специальный испаритель для передачи тепла от хладоносителя к твердому хладагенту [68]. Это позволяет объединить основные преимущества двух способов: широкий диапазон условий применения, значительный накопленный опыт и богатая теоретическая база по проектированию параметров технологии, характерные для рассольного замораживания, а также отсутствие технически сложной и дорогостоящей замораживающей станции, малые сроки подготовительного периода и высокие темпы замораживания, характерные для безрассольных способов [92].

В ряде случаев нет необходимости производить замораживание при минимально достижимых температурах. Понижение температуры приводит к негативным факторам: необходимости применять в качестве хладоносителя более дорогие, зачастую труднодоступные или небезопасные жидкости; возрастают объемы доставляемого твердого диоксида углерода, что увеличивает транспортные расходы, или является недостижимым, в условиях ограниченности производственных мощностей.

Процесс образования ледогрунтового ограждения замораживающими колонками, с циркулирующим по ним хладоносителем, хорошо изучен, поэтому наибольший практический интерес представляют исследования, направленные на определение технологических и конструктивных параметров испарителей.

Комбинированный способ замораживания грунтов может применяться с замораживающими колонками произвольных размеров и расположения, однако создание испарителя большой мощности является технически сложным. Как показали исследования [68], данный способ целесообразно применять при объеме создаваемого ледогрунтового ограждения не превышающим 300–400 м³.

Различные конструкции испарителей для комбинированного способа представлены в работах [35, 68, 70].

На рисунке 1.2а показана технологическая схема, в которой охлаждение хладоносителя происходит при пропускании его через испаритель, который

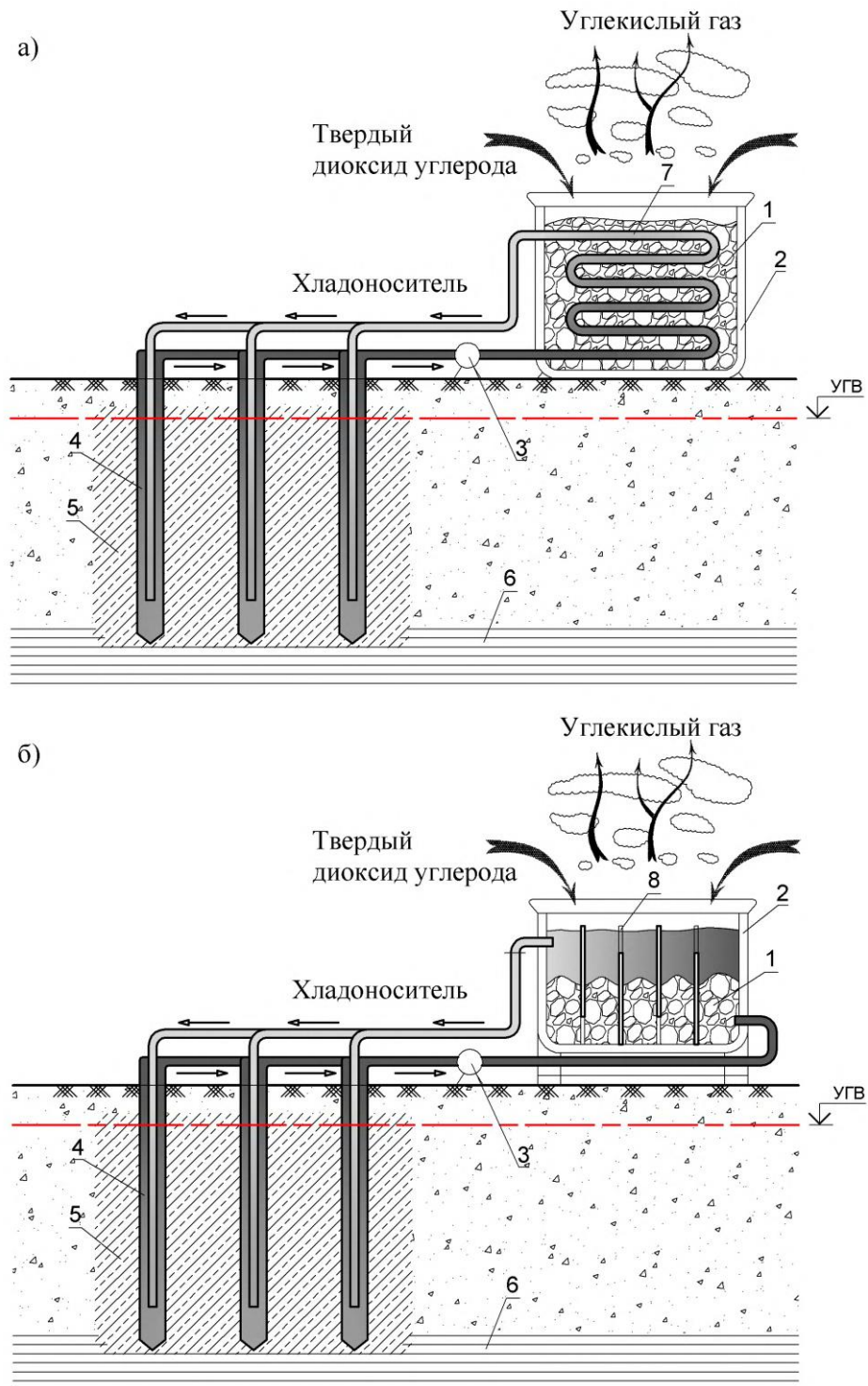


Рисунок 1.2 – Комбинированный способ замораживания (а – трубный испаритель; б – беструбный испаритель с непосредственной теплопередачей от твердого диоксида углерода к хладоносителю): 1 – твердый диоксид углерода; 2 – испаритель; 3 – насос рассольной сети; 4 – замораживающая колонка; 5 – ледогрунтовое ограждение; 6 – водоупорные породы; 7 –змеевик; 8 – технологические перегородки

представляет собой змеевик, установленный в теплоизолированной емкости, заполненной твердым диоксидом углерода. Теплообмен происходит через стенку змеевика. Хладоноситель насосом подается в рассольную сеть, аналогичную рассольному замораживанию. По мере отбора тепла, твердый диоксид углерода сублимирует и в виде газа выбрасывается в атмосферу.

Твердый диоксид углерода представляет собой гранулированное вещество, поэтому только часть поверхности змеевика будет вовлечена в теплообмен. Гранулы будут прижиматься к трубам под действием силы тяжести, таким образом, только верхняя часть их поверхности будет контактировать с гранулами, в то время как в нижней части будет образовываться зазор, теплообмен через который будет затруднен.

При данной конструкции испарителя температуру хладоносителя можно регулировать в широких пределах путём подбора длины змеевика, его диаметра. В случае использования уже сконструированного испарителя температуру хладоносителя можно варьировать путем изменения скорости его течения.

Технологическая схема на рисунке 1.2б включает испаритель, в котором отсутствует разделение твердого диоксида углерода и жидкости, при этом теплообмен происходит непосредственно при их контакте. В этом случае интенсивность теплообмена возрастает, что позволяет уменьшить размеры испарителя. В данном испарителе хладоноситель будет насыщаться углекислым газом, что может привести к образованию газовых пробок при его перекачивании по рассольной сети. Данное обстоятельство требует включения в рассольную сеть сепарационной установки.

Сопоставляя комбинированный способ замораживания грунтов с рассольным способом замораживания, следует отметить, что при его применении число технологических операций не сокращается, однако снижаются затраты энергии, не требуется вода, отсутствует технологически сложное оборудование (компрессоры, конденсаторы). Данный способ за счет достижения более низких температур хладоносителя позволяет сократить срок замораживания в 2 – 2.5 раза.

Дополнительным преимуществом комбинированного способа, по сравнению со способом с загрузкой диоксида углерода в колонку, является простота процесса загрузки твердого диоксида углерода. Место хранения хладагента может быть организовано в непосредственной близости от испарителя, при этом загрузка может осуществляться любым имеющимся средством механизации разгрузочно-погрузочных работ или вручную.

Отличительной особенностью способа замораживания грунтов с использованием диоксида углерода является достаточно короткий подготовительный период, в процессе которого происходит бурение и обсадка замораживающих скважин. Параллельно с этим, при комбинированном способе, происходит монтаж испарителя [91].

1.2 Анализ теоретических и экспериментальных исследований

Искусственное замораживание грунтов непрерывно развивается более 150 лет. За это время создана обширная теоретическая база, позволяющая описывать все основные процессы при создании ледогрунтового ограждения. Наибольшее количество исследований проводилось в области изучения процесса замораживания применительно к шахтному строительству [7].

Значительный вклад в развитие способа искусственного замораживания грунтов внесли работы И.В. Баклашова, Ю.М. Либермана, Н.Ф. Цытовича, С.С. Вялова, Ю.К. Зарецкого, И.Д. Насонова, Б.А. Тютюнника, Б.А. Картозия, В.А. Федюкина, Е.В.Щекудова, Дж.С. Харриса, О.Б. Андерсланда, Б. Ладани и др. [10, 17, 40, 59, 62, 72, 75, 85, 88, 89 и др.].

Исследования теплофизических свойств ледогрунтовых ограждений и динамики их образования отражены в работах Н.Г. Трупака, Г.И. Маньковского, И.Д. Насонова, В.И. Смирнова, О.А. Долгова, Б.В. Бахолдина, Х.Р. Хакимова, Я.А. Дормана, М.Н. Шуплика, Х.В. Фривика, С. Ху и др. [4, 12, 30, 31, 56, 57, 64, 68, 83, 86, 87 и др.]

Исследования различных безрассольных способов замораживания, отражены в работах Н.Г. Трупака, В.Ф. Мозгового, С.А. Съедина, В.Н. Яковлева, С.Е. Дукаревича, К. Стосса и др. [25, 29, 52, 58, 73, 98 и др.].

Фундаментальные основы использования твердого диоксида углерода при замораживании грунтов были заложены в результате проведения исследований в Московском горном институте во второй половине 1980-ых годов и были отражены в работе проф. Шуплика М.Н. [68]. В рамках данных исследований был произведен большой комплекс теоретических и экспериментальных работ, которые позволили начать опытное внедрение данного способа в практику городского подземного строительства.

В работе [68] были сформированы основные варианты реализации способов и схем по замораживанию грунтов твердым диоксидом углерода. Впервые представлены и обоснованы варианты интенсификации процесса теплообмена при загрузке твердого диоксида углерода в замораживающую колонку с использованием сжатого воздуха и вакуумирования. Предложены варианты конструкций испарителей для охлаждения хладоносителя с использованием твердого диоксида углерода. Были выполнены лабораторные экспериментальные исследования параметров теплообмена между массивом грунта и колонкой, заполненной твердым диоксидом углерода.

Программа исследований включала серию опытов по замораживанию крупнозернистого песка одиночной замораживающей колонкой длиной 1 м и диаметром 0.1 и 0.219 м, заполненных твердым диоксидом углерода и твердым диоксидом углерода с незамерзающей жидкостью. Начальная температура грунта была принята 10 и 20 °С. Было также произведено замораживание массива грунта группой из трех замораживающих колонок длиной 1 м и диаметром 0.1 м.

В эксперименте использовался дроблёный твердый диоксид углерода, который после загрузки в колонку утрамбовывался.

В процессе замораживания грунта при помощи термодатчиков фиксировалось изменение температурного поля в одной горизонтальной плоскости с заданным шагом по времени и расход твердого диоксида углерода.

Продолжительность экспериментального исследования составляла до 5 суток.

В результате экспериментов были определены: скорость образования ледогрунтового ограждения в исследуемом грунте; влияние диаметра замораживающей колонки и начальной температуры грунта на процесс теплоотдачи; изменение температуры стенки колонки; зависимость коэффициента теплоотдачи от стенки замораживающей колонки к твердому диоксиду углерода, как функция от теплового потока к замораживающей колонке.

Однако полученные результаты не могут полностью отразить процесс теплообмена в произвольных горно-геологических условиях, они носят локальный характер из-за того, что длина исследуемой колонки была равна только 1 м, и измерения температурного поля в массиве производились в одной плоскости. Полученные зависимости не позволяют достоверно определить необходимые параметры технологии замораживания в произвольных геологических условиях.

Дальнейшие теоретические исследования были направлены на определения параметров конструкции испарителя для комбинированного способа замораживания.

В 2003 году группой авторов был получен патент на изобретение [47], в котором предложена оригинальная конструкция испарителя, заполненного твердым диоксидом углерода, служащего для охлаждения хладоносителя, протекающего через него.

В работах [35, 70] были представлены методики расчета конструкции испарителя, в котором хладоноситель движется через змеевик, расположенный в емкости, заполненной твердым диоксидом углерода. Однако при расчете коэффициента теплопередачи через стенку трубы от жидкости к твердому диоксиду углерода, не было учтено наличие дополнительного термического сопротивления, возникающего на контакте твердого диоксида углерода и стенки. Таким образом, представленные методики для расчета конструкции испарителя не отражают специфики теплообмена с участием твердого диоксида углерода, что может приводить к значительному расхождению между расчетными значениями и фактически наблюдаемыми на практике.

1.3 Анализ опытно-промышленного внедрения

Опытное внедрение способа искусственного замораживания грунтов с использованием твердого диоксида углерода производилось на нескольких объектах в городе Москве [33, 43–45, 68]. Во всех случаях применялся способ с загрузкой твердого диоксида углерода непосредственно в замораживающие колонки.

Впервые опытное внедрение данного способа было выполнено в октябре 1984 года при строительстве подземной автостоянки в районе выставочного комплекса ВДНХ в Москве. Работы производились на нескольких участках [68].

На одном из участков производилось замораживание массива двумя замораживающими колонками диаметром 114 мм и длиной 3 и 6 м, расположенными на расстоянии 1 м друг от друга. Замер температуры осуществлялся через две термометрические скважины.

Ледогрунтовые цилиндры соседних скважин на глубине 2.5 м сомкнулись через 5 суток.

По результатам данного опыта была впервые подтверждена возможность замораживания грунтов при помощи твердого диоксида углерода. Из-за несоблюдения режима загрузки диоксида углерода количественных зависимостей процесса теплообмена выявить не удалось, однако было установлено, что при ручной загрузке диоксида углерода в колонки при данном её диаметре оптимальный размер частиц диоксида углерода от 3 до 10 мм. При подаче в замораживающую колонку сжатого воздуха скорость образования ледогрунтового ограждения увеличивалась.

Средний расход твердого диоксида углерода составил 180 кг на 1 м³ грунта.

На другом участке замораживанию подвергался массив, сложенный водоносными мелкозернистыми грунтами, в объеме до 100 м³. Замораживание производилось 11 замораживающими колонками диаметром 219 мм. Водоносные грунты залегали на глубине 17 м от поверхности, их мощность составляла 8 м.

Твердый диоксид углерода в виде блоков доставлялся на строительную площадку автомобильным транспортом. Блоки складировались вблизи замораживающих колонок и накрывались брезентом. Перед загрузкой в замораживающую колонку они дробились до размеров кусков не более 5 см. Загрузка производилась вручную с использованием специально изготовленных воронок. Колонки загружались на всю высоту. Повторная загрузка производилось при достижении уровня диоксида углерода отметки минус 15–17 метров. Таким образом, в зоне залегания водоносного грунта колонки всегда были заполнены.

Одной из серьезных технологических проблем, которая возникла при производстве работ на данном объекте, было образование ледовых пробок в результате попадания в колонку воды из-за её не герметичности.

При расстоянии между замораживающими колонками около 1 м ледогрунтовые цилиндры сомкнулись на 5 сутки после начала процесса замораживания. При расстоянии между колонками 1.8 м ледогрунтовые цилиндры сомкнулись через 15 суток.

Работы на данном участке показали, что с учетом потерь при транспортировке и хранении, средний расход твердого диоксида углерода на замораживание 1 м³ водоносного грунта в интервале отметок от минус 17 до минус 25 м, составил около 800 кг/м³. Однако, как показали расчеты, из-за принятой схемы загрузки до 40 % твёрдого диоксида углерода было потрачено на охлаждение грунтов залегающих выше водоносного горизонта.

На данном строительном объекте замораживанию подвергался массив при сооружении узла примыкания стены котлована к его днищу. При этом замораживание осуществлялось восьмью замораживающими колонками, диаметром 0.146 м, расположенными на расстоянии 0.9 м друг от друга. По результатам работ было заморожено 7 м³ грунта при среднем расходе диоксида углерода около 485 кг/м³.

Опытно-промышленное внедрение производилось на одном из объектов при строительстве «Южного канала» на Курской железной дороге в городе Москве. На данном объекте в проекте было заложено рассольное замораживание, однако на 50

сутки после начала процесса, из-за наличия большой скорости грунтовых вод на отдельном участке, сомкнуть соседние ледогрунтовые цилиндры между двумя колонками не удалось.

Для решения данной проблемы эти колонки были отключены от рассольной сети, питающие трубы демонтированы, рассол откачен. После чего в них в течение трех суток загружался твердый диоксид углерода, что позволило сомкнуть ограждение.

Промышленное применение твердого диоксида углерода для замораживания грунтов выполнялось компанией ОАО «ВИЗБАС» [34]. В течение 1998–2001 годов были произведены работы на пяти крупных объектах.

При строительстве канализационного коллектора от улицы Богатырский мост до набережной р. Яуза в Москве твердый диоксид углерода применялся на нескольких участках.

Врезка нового коллектора в камеру действующего предполагалось выполнить под защитой ледогрунтового ограждения, создаваемого рассольным способом с температурой хладоносителя минус 23 °С [33]. Схема данного объекта представлена на рисунке 1.3.

По окончании активного замораживания, продолжительность которого составила 30 суток, в массиве грунта установилось термостатическое равновесие, так как температура вод в действующем коллекторе превышала 25 °С. Для разрешения данной ситуации замораживающие колонки, непосредственно примыкающие к действующему коллектору, были выключены из рассольной сети, питающие трубы демонтированы, и в них был засыпан твердый диоксид углерода.

В результате ледогрунтовое ограждение достигло проектных размеров на третьи сутки после начала загрузки диоксида углерода.

На одном из участков замораживания вдоль трассы коллектора в результате разгерметизации одной из колонок хладоноситель (водный раствор хлористого кальция) попал в грунт, что привело к образованию не замороженного «окна» в ледогрунтовом ограждении. Данная ситуация была разрешена путем загрузки в соседние колонки твердого диоксида углерода.

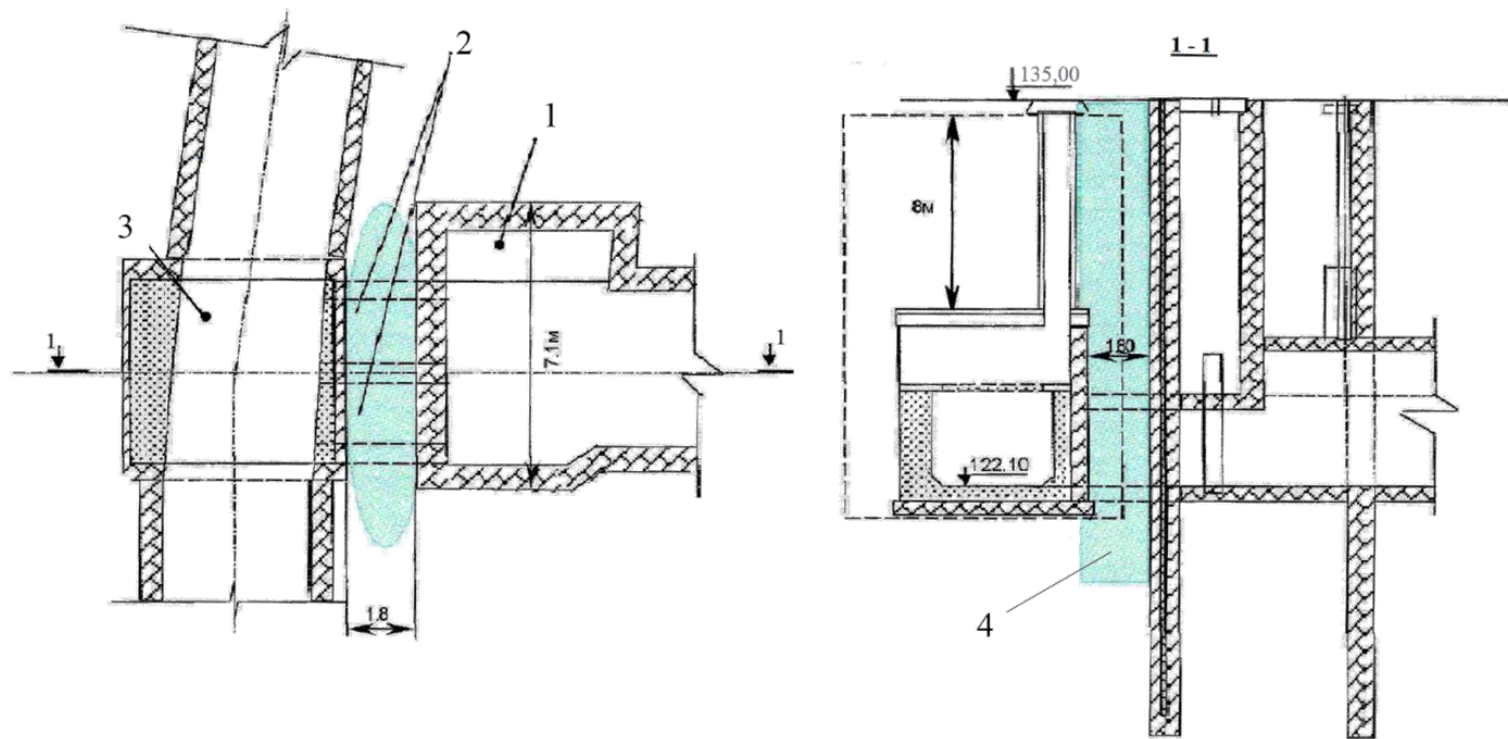


Рисунок 1.3 – Замораживание грунтов при строительстве «врезки» коллектора [33]: 1 – строящийся коллектор; 2 – штольни примыкания к существующей камере; 3 – существующая камера; 4 – зона замораживаемого грунта

На другом участке в результате нарушения режима фильтрации подземных вод, вследствие образования значительного по длине ледогрунтового ограждения, возник дополнительный градиент напоров. Перепад гидростатического уровня с разных сторон от ледогрунтового ограждения достигал 1.5 м. В результате этого скорость движения подземных вод вдоль ограждения достигала величин, не позволяющих сомкнуть соседние ледогрунтовые цилиндры. Данная проблема решалась нагнетанием через замораживающие скважины цемента-бентонитового раствора с последующим замораживанием твердым диоксидом углерода.

Твердый диоксид углерода нашел применение при ликвидации аварийной ситуации при строительстве монтажной камеры Лефортовского транспортного тоннеля в Москве [43, 45].

Камера возводилась с применением шпунтового ограждения, однако при разработке грунта на глубине 19 м были обнаружены расхождения шпунтин в нескольких точках, откуда наблюдались активные течи воды с выносом грунта. Для ликвидации аварийной ситуации и обеспечения безопасного проведения работ в местах течей был выполнен грунтовый пригруз. После этого были пробурены скважины с внешней стороны шпунтового ограждения и смонтированы замораживающие колонки диаметром 168 мм, в которые был помещен твердый диоксид углерода. Замораживание производилось на трех участках. Схема участков представлена на рисунках 1.4 и 1.5.

Замораживание было успешно выполнено в течение 8 суток, что позволило продолжить строительство монтажной камеры.

На строительстве данного объекта для замораживания грунтов впервые был применен гранулированный твердый диоксид углерода. Размер гранул составлял 10–15 мм. Они доставлялись на строительную площадку в изотермических контейнерах. На одном из участков, помимо гранулированного диоксида углерода, использовался также «сухой лед» в брикетах, которые дробились непосредственно перед помещением в колонку. Это было вызвано тем, что в случае хранения дробленого диоксида углерода более одного часа, он слёживался и склеивался в монолитную массу, и требовалось дополнительное его дробление.

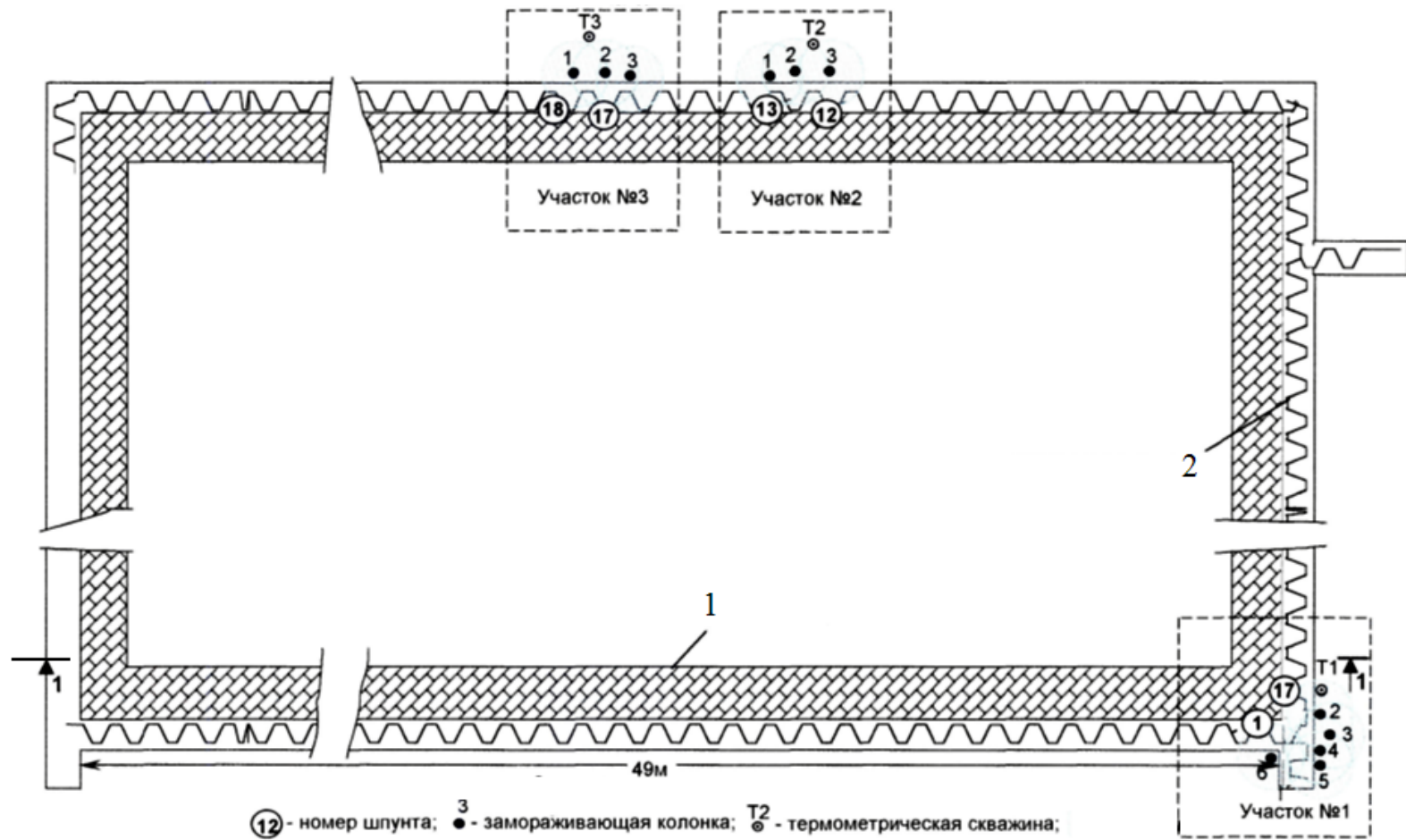


Рисунок 1.4 – Замораживание грунтов при строительстве Лефортовского тоннеля в г. Москве. План монтажной камеры[45]: 1 – железобетонная стена монтажной камеры; 2 – шпунтовое ограждение. Участки № 1–3 – места производства работ по замораживанию грунта

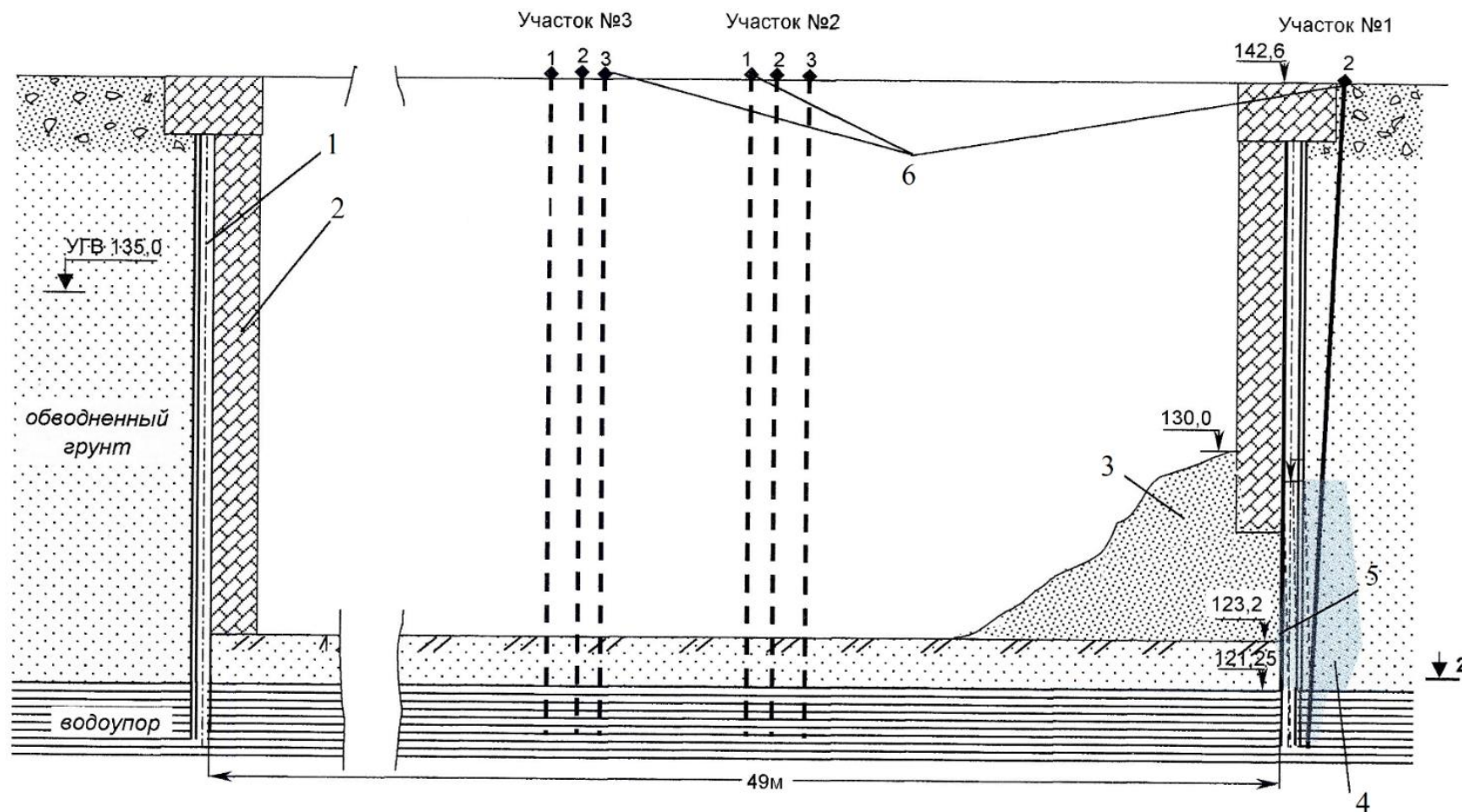


Рисунок 1.5 – Замораживание грунтов при строительстве Лефортовского тоннеля в г. Москве. Разрез монтажной камеры [45]: 1 – шпунтовое ограждение; 2 – железобетонная стена монтажной камеры; 3 – грунтовый пригруз; 4 – зона замораживаемых грунтов; 5 – место прорыва воды в котлован; 6 – замораживающие колонки

При загрузке дробленого «сухого льда» в замораживающие колонки наблюдалось образование многочисленных «пробок», которые ликвидировались путем организации перерывов в загрузке до 6 часов [45].

При производстве работ было установлено, что величина непроизводственных потерь твердого диоксида углерода при транспортировке и хранении составляла около 20%.

Замораживание грунтов с применением «сухого льда» производилось при проходке вертикального ствола для метрополитена в г. Москве в 2001 году [20]. Ствол имел диаметр 5.5 м и глубину 26 м. В качестве противофильтрационного ограждения использовались буросекущие сваи.

При разработке грунта на глубине 10.5 м было обнаружено расхождение некоторых свай до 150 мм. По результатам оценки горно-геологических условий для осуществления безопасной проходки было решено осуществить зональное замораживание вокруг ствола в диапазоне отметок от минус 10 до минус 19 м (с учетом заглубления в водоупор на 1.5 м). Сечение вертикального ствола показано на рисунке 1.6.

На данном объекте использовался гранулированный твердый диоксид углерода с диаметром гранул 10–15 мм, который доставлялся на строительную площадку в изотермических контейнерах.

Замораживание производилось через 32 основные и 4 дополнительные замораживающие колонки диаметром 114 мм. Расстояние между скважинами составляло 0.8 м. Расположение замораживающих скважин показано на рисунке 1.7.

В течение активного замораживания уровень диоксида углерода поддерживался на отметке минус 8 м от земной поверхности. Активное замораживание продолжалось 7.5 суток. За это время ледогрунтовое ограждение достигло проектной толщины – 0.8 м.

В процессе замораживания грунта происходили перебои с поставкой гранулированного диоксида углерода. Для продолжения работ использовался брикетированный диоксид углерода. При его дроблении образовывалось до 30%

пылеватых частиц, которые попадая в колонку «цементировали» массу диоксида углерода, что приводило к образованию «пробок». Потери при транспортировке, хранении и дроблении брикетированного диоксида углерода составляли до 50 %.

Сводный перечень объектов, на которых производилось замораживание грунтов с использованием твердого диоксида углерода представлен в таблице 1.1.

Анализ производственного опыта позволяет сделать некоторые выводы.

Наиболее широкое применение способ замораживания с использованием твердого диоксида углерода получил как средство для ускоренного замораживания грунтов на объектах, где первоначально принятые специальные способы строительства оказались неэффективными.

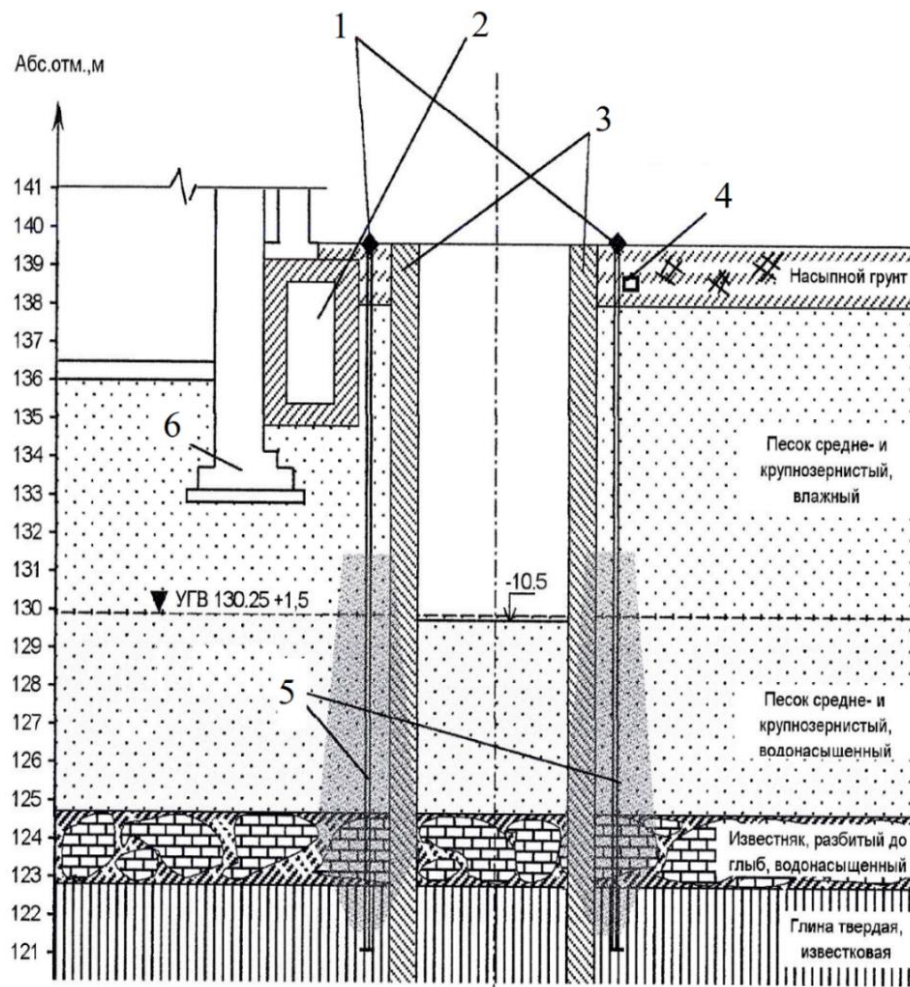


Рисунок 1.6 – Замораживание грунтов при строительстве вертикального ствола в г. Москве. Разрез. [20]: 1 – замораживающие колонки; 2 – пристенный кабельный коллектор; 3 – ограждение из буросекущих свай; 4 – телефонные кабели; 5 – ледогрунтовое ограждение; 6 – фундамент здания

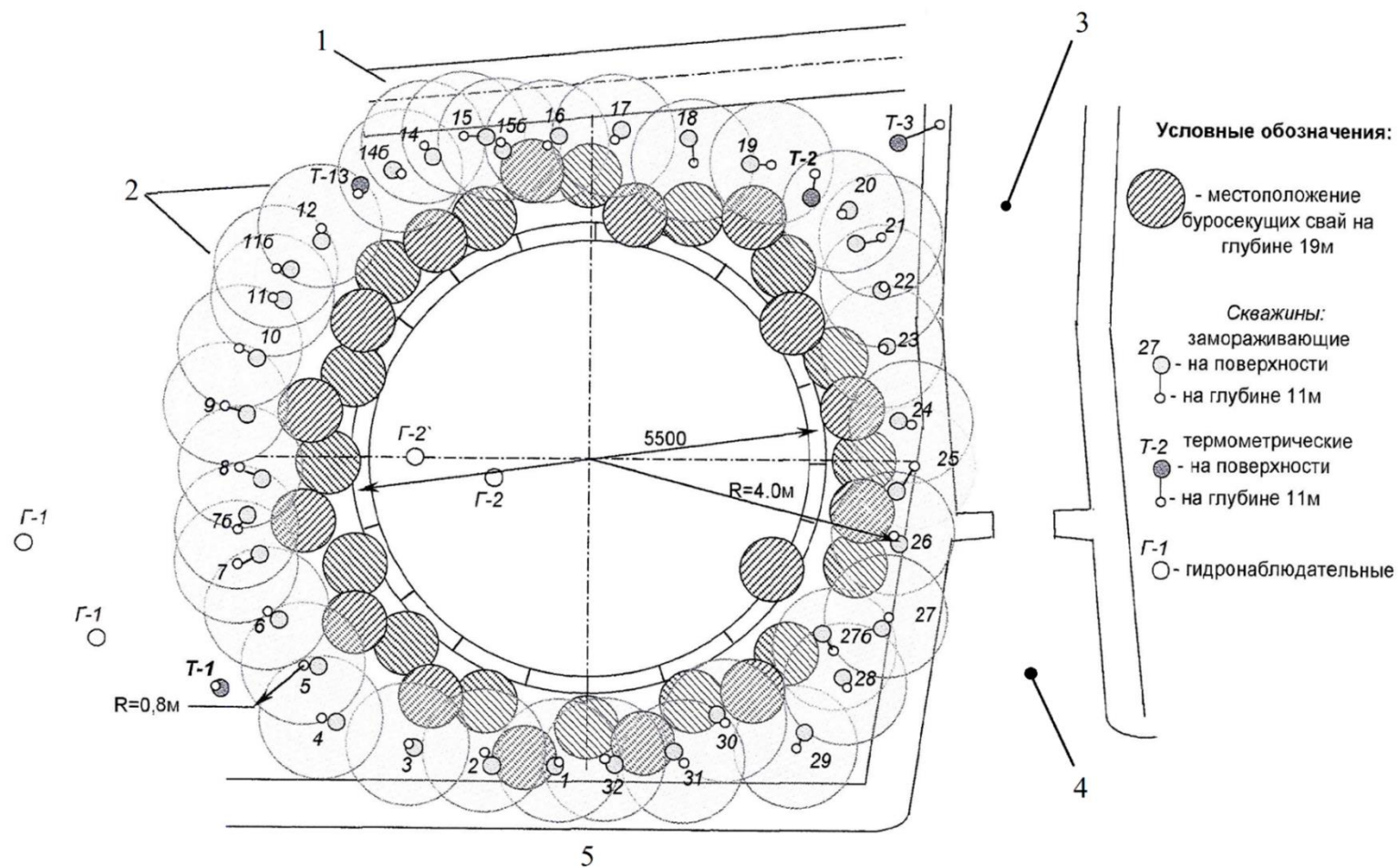


Рисунок 1.7 – Замораживание грунтов при строительстве вертикального ствола в г. Москве. План [20]: 1 – кабели связи; 2 – ледогрунтовое ограждение на глубине 11 м; 3, 4 – кабельные коллектора; 5 – пристенный кабельный коллектор

Таблица 1.1 – Объекты опытно-промышленного внедрения способа искусственного замораживания грунтов с использованием твердого диоксида углерода

Наименование объекта	Вид диоксида углерода	Параметры замораживающих колонок			Интервал замора- живания, м	$V_{\text{зам.гр.}}$, м ³	Расход диоксида углерода, кг/м ³	Время активного замора- живания, суток	Примечание
		d_k , мм	l_0 , м	п, шт					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Строительство подземной автостоянки в районе ВДНХ.	Дробленый (3–10 мм)	114	2	2	0–3	-	180	5	В замораживающую колонку подавался сжатый воздух
	Дробленый (до 50 мм)	219	1	11	17–25	100	800	5	Диоксид углерода загружался на всю глубину колонки
			1.8					15	
	Дробленый	146	0.9	8	-	7	485	-	-
«Южный канал» на Курской железной дороге	-	-	-	2	-	-	-	3	Замораживание массива после 50 суток активного рассольного замораживания

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Коллектор на улице Богатырский мост (3 участка)	Гранулированный (8–10 мм)	100	-	6	6–16	-	-	3	Замораживание массива после 30 суток активного рассольного замораживания
		-	-	3	11.5– 3.5	-	-	-	
		-	-	4	19–21	-	-	-	
		-	-	5	11–21	-	-	-	
Монтажная камера при строительстве Лефортовского тоннеля	Гранулированный (10–15 мм)	168	-	5	-	500	223	8	-
			-	3	-				-
	Гранулированный и дробленый		-	3	-				Из-за недостаточно малого размера кусков дробленого твердого диоксида углерода образовывались «пробки»
Вертикальный ствол для метрополитена	Гранулированный (10–15 мм)	114	0.8	36	10–19	800	160	7.5	-

Примечание: d_K – диаметр замораживающей колонки, мм; l_0 – расстояние между замораживающими колонками, м; n – количество замораживающих колонок, штук; $V_{\text{зам.гр.}}$ – объем замораживаемого грунта, м³; «-» – нет данных. Все объекты строительства в городе Москве.

Более детальный анализ геологических условий мог позволить изначально заложить в проект способ искусственного замораживания грунтов с использованием твердого диоксида углерода, что позволило бы снизить стоимость производства работ.

Средний удельный расход диоксида углерода на замораживание грунта при опытном внедрении изменялся в диапазоне от 120 до 800 кг/м³. Значительное превышение ряда значений над теоретическими, объясняется недостатками в организации процесса транспортировки и хранения хладагента, недостаточно отработанной технологией загрузки твердого диоксида углерода. Это приводило к увеличению непроизводственных потерь холода до 50 %, Таким образом, при проектировании процесса замораживания особенно важно оценить пути и схемы доставки, имеющиеся производственные мощности, и возможности по загрузке диоксида углерода в колонки и поддержанию его уровня.

Значительному расхождению данных о расходе диоксида углерода на разных объектах способствовал недостаток сведений о процессе теплопередачи от массива грунта к твердому диоксиду углерода через стенку колонки.

1.4 Анализ существующих подходов к проектированию процесса замораживания с использованием твердого диоксида углерода

Основными технологическими параметрами при замораживании грунтов замораживающими колонками, заполненными твердым диоксидом углерода, являются: время активного замораживания, общий расход диоксида углерода и его расход в единицу времени.

К настоящему моменту в литературных источниках представлена только одна методика определения параметров замораживания [68]. Данная методика нашла своё применение при проектировании большинства объектов опытного внедрения, описанных в разделе 1.3. В соответствии с ней определение расхода твердого диоксида углерода для замораживания грунтов происходит в следующей последовательности.

В зависимости от формы и толщины ледогрунтового ограждения определяется его объем V , м³.

Определяется теплосодержание грунта Q_3 , Дж/м³, по формуле:

$$Q_3 = m \cdot V \cdot \gamma_v \cdot (C_v \cdot t_r + \sigma) + t_{cp} \cdot m \cdot V \cdot \gamma_l \cdot C_l + \\ + (1 - m) \cdot V \cdot \gamma_r \cdot C_r \cdot (t_r + t_{cp}), \quad (1.1)$$

где m – пористость грунта, д.е.; C_v , C_l , C_r – удельная теплоемкость соответственно воды, льда и грунта, Дж/(кг·°C); t_r – начальная температура грунта, °C; t_{cp} – средняя температура ледогрунтового ограждения, принимается равной минус 24 °C; σ – скрытая теплота льдообразования, Дж/кг.

Определяется количество тепла, поступающее к внешней поверхности ледогрунтового ограждения со стороны окружающего грунта Q_{ox} , Дж/ч:

$$Q_{ox} = S_{ox} \cdot q_{ox}, \quad (1.2)$$

где S_{ox} – поверхность ледогрунтового ограждения проектных размеров, м²; q_{ox} – теплоприток к 1 м² поверхности ледогрунтового ограждения, принимаемый равным: 20–24 кДж/(м²·ч) при начальной температуре грунта 8 °C, 28–40 кДж/(м²·ч) при начальной температуре грунта 9–10 °C, 30–45 кДж/(м²·ч) при начальной температуре грунта 11–12 °C.

Общее количество тепла Q , Дж, которое необходимо отобрать от массива:

$$Q = Q_3 + Q_{ox} \cdot \tau, \quad (1.3)$$

где τ – время активного замораживания, ч.

Количество твердого диоксида углерода G , кг, необходимое для замораживания заданного объема грунта определяется из выражения:

$$G = K_{\Pi} \cdot \frac{Q}{R}, \quad (1.4)$$

где R – скрытая теплота сублимации твердого диоксида углерода, равная 574 кДж/кг; K_{Π} – коэффициент потерь, принимаемый равным 1.2–1.3.

Количество диоксида углерода, необходимое для первоначального заполнения колонок G_1 , кг, определяется по зависимости:

$$G_1 = \frac{\pi d_K^2}{4} \cdot H_3 \cdot K_3 \cdot \gamma_K \cdot N \cdot K_{\Pi}, \quad (1.5)$$

где d_K - внутренний диаметр замораживающей колонки, м; H_3 - глубина замораживания, м; K_3 - коэффициент учитывающий разрыхление диоксида углерода, принимаемый равным 0.75 – 0.8; γ_K - плотность твердого диоксида углерода, кг/м³; N - число колонок.

Часовой расход диоксида углерода для последующего заполнения колонок G_2 , кг/час, определяется из выражения:

$$G_2 = K_{\Pi} \cdot N \cdot H_3 \cdot g_r, \quad (1.6)$$

где g_r - часовой расход твердого диоксида углерода, кг/(м·час), определяемый в зависимости от диаметра ледогрунтового цилиндра и диаметра колонки.

Ориентировочно время замораживания τ , ч, рекомендуется определять по формуле:

$$\tau = \frac{Q_3}{(Q_K - Q_{ox}) \cdot 24}. \quad (1.7)$$

Величина теплопоглощающей способности замораживающих колонок Q_K , Дж/ч, определяется из выражения:

$$Q_K = 3600 \cdot \pi \cdot d_K \cdot H_3 \cdot N \cdot q_f. \quad (1.8)$$

Значения величины удельного теплового потока q_f , Вт/м², предлагается ориентировочно принимать равными 900–1200 Вт/м² при диаметре колонки равным 0.219 м и 1400–1700 Вт/м² при диаметре колонки 0.1 м.

Анализ представленной методики определения основных параметров замораживания грунтов с использованием твердого диоксида углерода показывает, что она не учитывает физические свойства замораживаемого массива (теплопроводность грунта в талом и мерзлом состоянии, температуру замерзания грунтовых вод), расположение замораживающих скважин и справедлива для ограниченных горно-геологических условий.

1.5 Выводы по главе, цель и задачи исследований

Предложенные способы и схемы искусственного замораживания грунтов с использованием твердого диоксида углерода являются обоснованными и осуществимыми в современных условиях. Наиболее простым является способ с загрузкой диоксида углерода в замораживающие колонки. Данный способ позволяет сократить сроки активного замораживания до трёх раз по сравнению с рассольным замораживанием.

Проведённые теоретические исследования были направлены на установление закономерностей образования ледогрунтового ограждения вокруг замораживающей колонки, заполненной твердым диоксидом углерода. Однако количество проведённых опытов и исследуемых условий является недостаточным, что не позволяет дать общие рекомендации по проектированию параметров технологии замораживания грунтов с использованием твердого диоксида углерода.

Промышленное внедрение технологии показало, что расход диоксида углерода колеблется в диапазоне от 150 до 800 кг/м³ грунта, а время замораживания от 3 до 10 и более суток. Из-за отсутствия сведений о теплофизических свойствах грунта произвести детальный анализ полученных данных достаточно трудно.

В рамках промышленного внедрения было выявлено, что для замораживания грунтов предпочтение стоит отдавать гранулированному диоксиду углерода. В этом случае снижаются потери твердого диоксида углерода при транспортировке и хранении, уменьшается риск образования «пробок» в замораживающих колонках.

Существующие методики определения параметров испарителя для комбинированного способа замораживания не учитывают специфику теплообмена с участием твердого диоксида углерода, что не позволяет оценить эффективность предлагаемого комбинированного способа замораживания.

Исходя из вышеизложенного, целью данной работы является обоснование параметров технологии замораживания грунтов с использованием твердого диоксида углерода, обеспечивающих уменьшение сроков замораживания, ресурсосбережение и снижение стоимости замораживания малых объемов грунта при строительстве городских подземных сооружений в сложных горно-геологических условиях.

Для достижения поставленной цели, необходимо решить следующие задачи:

- исследование процесса теплопередачи от твердого диоксида углерода к стенке замораживающей колонки, к змеевику испарителя и незамерзающей жидкости;
- обоснование новых технологических схем замораживания грунтов с использованием твердого диоксида углерода и конструкций испарителей для комбинированного способа замораживания;
- обоснование методики определения параметров технологии замораживания грунтов с использованием твердого диоксида углерода, загружаемого в замораживающую колонку, и методики определения параметров испарителя для охлаждения хладоносителя твердым диоксидом углерода при использовании комбинированной технологии замораживания грунтов.

2 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАМОРАЖИВАНИЯ ГРУНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТВЕРДОГО ДИОКСИДА УГЛЕРОДА

2.1 Исследование процесса теплопередачи в замораживающей колонке, заполненной твердым диоксидом углерода

Процесс теплопередачи от стенки замораживающей колонки к твердому диоксиду углерода отличается сложностью. Комплексный процесс объединяет процесс теплопроводности, конвективной теплопередачи, диффузии. Процесс теплообмена в колонках неразрывно связан с теплообменом, происходящим в массиве грунта. В данной системе происходит два фазовых перехода: замерзания воды в грунте и процесс сублимации твердого диоксида углерода.

В результате притока тепла от массива грунта к твердому диоксиду углерода некоторое его количество сублимирует. Процесс протекает в пристенной области, таким образом, и сублимация происходит вдоль внутреннего контура замораживающей колонки. Образовавшийся газ, имеющий температуру, равную температуре сублимации диоксида углерода, поднимается вверх. Между газом и стенкой колонки происходит конвективный теплообмен, в результате этого газ нагревается. В связи с постоянным примешиванием к поднимающемуся потоку газа вновь образуемых объемов, его температура может быть принята постоянной, и равной температуре сублимации твердого диоксида углерода. При отсутствии разности температур теплопередача на границе восходящих потоков газа и непосредственно гранулами диоксида углерода происходить не будет, или же она будет являться пренебрежимо малой.

В результате сублимации выделяется значительный объем углекислого газа (до 800 л на 1 кг твердого диоксида углерода), который отводится через достаточно малое кольцевое поперечное сечение, в результате достигаются значительные скорости его течения, что может приводить к достаточно интенсивному теплообмену между потоком газа и стенкой. При этом ввиду накопления газа по длине колонки, скорость газа является переменной по высоте.

Она возрастает от нуля у основания колонки до некоторой максимальной величины в устье.

Рассмотрим одиночную замораживающую колонку, смонтированную в однородном грунте диаметром d_k и длиной l , заполненную гранулированным твердым диоксидом углерода.

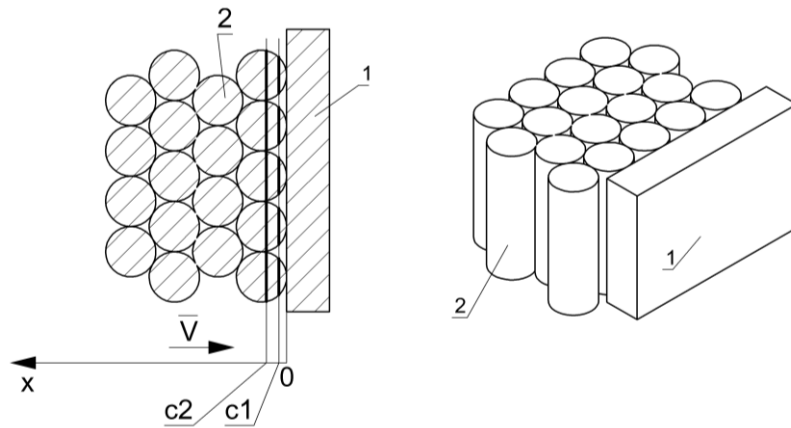
Форма и размеры гранул могут быть различными. Наиболее распространенной формой является цилиндрическая. Начальный диаметр гранул, определяемый технологией изготовления, является постоянной величиной. Длина гранул изменяется от 5 до 50 мм. Температура поверхности гранул диоксида углерода равна температуре его сублимации, равной минус 78.9 °С.

Рассмотрим процесс теплообмена между стенкой колонки и гранулами твердого диоксида углерода правильной формы (цилиндры, сферы). Упаковку гранул примем наиболее плотной. Начальный диаметр всех гранул примем постоянным.

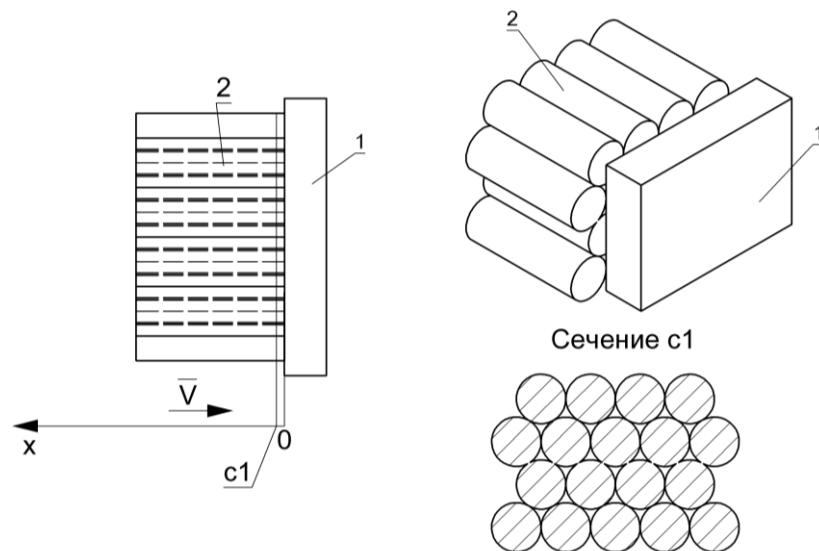
В процессе теплообмена гранулы диоксида углерода сублимируют, в результате на контакте со стенкой исчезает тонкий их слой. Гранулы диоксида углерода под действием массовых сил от вышележащего диоксида углерода сдвигаются на величину исчезнувшего слоя к стенке колонки. Площадь поверхности контакта гранул со стенкой изменяется. От той части поверхности стенки колонки, которая не касается гранул твердого диоксида углерода, происходит конвективная теплоотдача к потоку углекислого газа, образовавшегося в результате сублимации твердого диоксида углерода в нижележащих слоях.

Форма поверхности контакта гранулы со стенкой – прямоугольная (для вертикальных цилиндрических гранул) или круглая (для горизонтальных цилиндрических гранул и сфер). Так как диаметр гранул много меньше по сравнению с диаметром колонки, влиянием её кривизны на изменение площади контакта гранул со стенкой можно пренебречь (рисунок 2.1).

а)



б)



в)

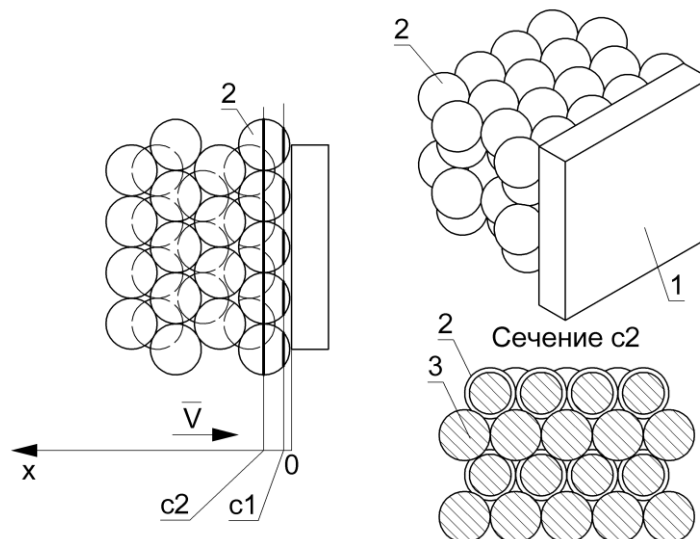


Рисунок 2.1 – Расположение гранул твердого диоксида углерода (а, б – цилиндрические гранулы, в – сферические гранулы) относительно стенки: 1 – стенка замораживающей колонки; 2 – гранулы диоксида углерода; 3 – поверхность контакта гранул со стенкой

Таким образом, количество тепла Q , Вт, поступающее к колонке в единицу времени, может быть представлено в виде суммы независимых слагаемых (рисунок 2.2а):

$$Q = q_{\text{ст}}S_o = q_{\text{гр}}S_k + q_{\text{г}}(S_o - S_k), \quad (2.1)$$

где $q_{\text{ст}}$ – тепловой поток от массива грунта к замораживающей колонке, Вт/м²; $q_{\text{гр}}$ – тепловой поток к гранулам диоксида углерода, Вт/м²; $q_{\text{г}}$ – тепловой поток к восходящему по колонке газу, Вт/м²; S_o – площадь поверхности колонки, м²; S_k – площадь поверхности контакта гранул со стенкой, м².

Когда диаметр ледогрунтового цилиндра больше 0.5 м, задача о распространении тепла в массиве может рассматриваться в квазистационарной постановке, без учёта фазового перехода [55]. В этом случае тепловой поток к стенке колонки $q_{\text{ст}}$, определяется как тепловой поток через толстую цилиндрическую стенку по выражению [54]:

$$q_{\text{ст}} = \frac{t_0 - t_{\text{ст}}}{\frac{d_k}{2 \cdot k_f} \cdot \ln\left(\frac{d_{\text{л.ц.}}}{d_k}\right)}, \quad (2.2)$$

где t_0 – температура фазового перехода в грунте, °С; $t_{\text{ст}}$ – температура стенки замораживающей колонки, °С; k_f – коэффициент теплопроводности замороженного грунта, Вт/(м·°С).

Обозначим отношение площади поверхности контакта гранул со стенкой S_k к общей площади поверхности колонки S_o , как n :

$$n = \frac{S_k}{S_o}. \quad (2.3)$$

При небольших тепловых потоках, когда объем выделяемого газа незначителен, можно принять, что на контакте гранул со стенкой толщина газовой прослойки мала. В этом случае термическое сопротивление на контакте гранул со стенкой будет мало, и температура стенки в месте контакта будет близка температуре сублимации твердого диоксида углерода, равной $t_{\text{CO}_2} = -78.9$ °С. Тогда тепловой поток непосредственно к гранулам $q_{\text{гр}}$ в данный момент времени будет равен:

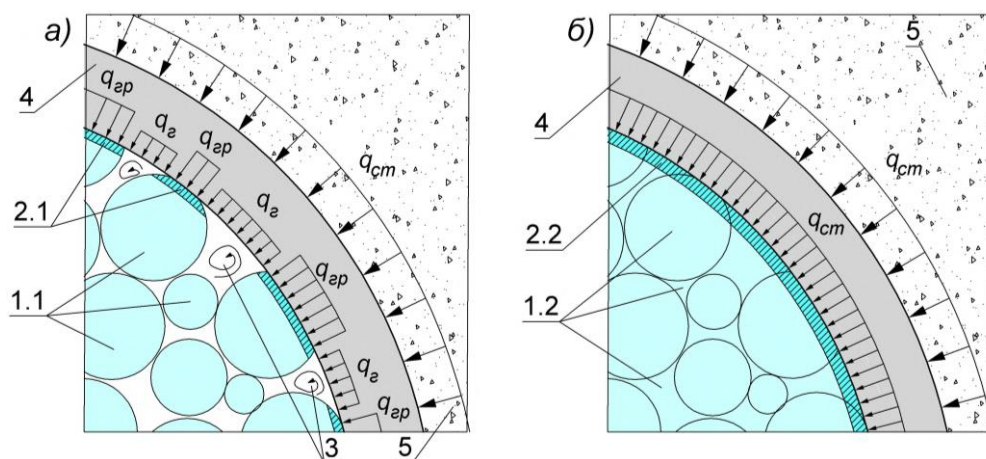


Рисунок 2.2 – Схема протекания теплообмена между массивом грунта и гранулами твердого диоксида углерода: 1.1 – гранулы твердого диоксида углерода; 1.2 – массив гранул твердого диоксида углерода; 2.1 – поверхность контакта гранул со стенкой; 2.2 – поверхность контакта массива гранул со стенкой; 3 – потоки газа; 4 – стенка колонки; 5 – замороженный грунт

$$q_{гр} = \frac{t_0 - t_{CO_2}}{\frac{d_k}{2 \cdot k_f} \cdot \ln\left(\frac{d_{л.ц.}}{d_k}\right)}. \quad (2.4)$$

Как видно из рисунка 2.1, в процессе продвижения гранул диоксида углерода к стенке (в частности, при перемещении поверхности контакта со стенкой из сечения c_1 к сечению c_2), площадь контакта изменяется. Для характерных точек зависимость изменения параметра n с изменением координаты x для вертикальных цилиндрических и сферических гранул показана на рисунке 2.3.

Количество диоксида углерода, которое сублимирует в единицу времени (его расход), определяется как отношение теплового потока к гранулам к величине скрытой теплоты сублимации твердого диоксида углерода R , Дж/кг. Таким образом, зная величину теплового потока в данный момент времени, можно определить скорость движения гранул диоксида углерода к стенке V , м/с, по формуле:

$$V = \frac{q_{г}}{R \cdot \rho}, \quad (2.5)$$

где ρ – плотность гранул диоксида углерода, кг/м³.

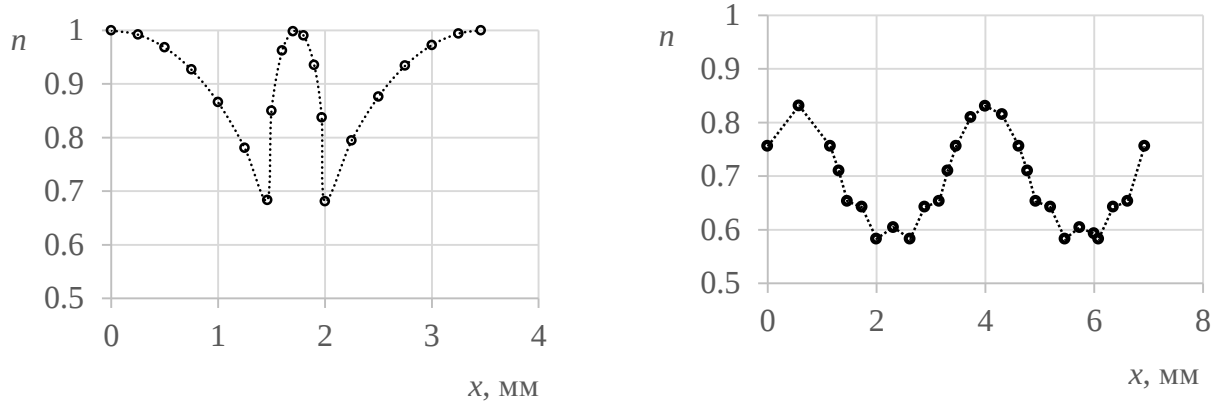


Рисунок 2.3 – Изменение параметра n в зависимости от значения координаты x для гранул различной формы (a – вертикальные цилиндры, b – сферы)

Закон движения гранул диоксида углерода к стенке $x(t)$ определяется путем замены значения скорости на соответствующую производную пути по времени, разделением переменных и интегрированием. В результате получим:

$$x = \frac{q_{\Gamma}}{R \cdot \rho} t, \quad (2.6)$$

где t – время, с.

Графики, изображенные на рисунке 2.3, могут быть аппроксимированы различными периодическими кривыми. Период функции x_{Π} , м, на рисунке 2.3а может быть определен по выражению:

$$x_{\Pi} = \left(\frac{r}{\cos(60^{\circ})} \right) \cdot \cos(30^{\circ}), \quad (2.7.1)$$

а функции на рисунке 2.3б:

$$x_{\Pi} = \left(\frac{r}{\cos(60^{\circ})} \right) \cdot \cos(30^{\circ}) - r \cdot \tan(30^{\circ}), \quad (2.7.2)$$

где r – радиус гранулы, м.

Время, за которое гранулы диоксида углерода пододвигаются к стенке на величину одного периода t_{Π} , с, может быть определено с учетом (2.6), как:

$$t_{\Pi} = \frac{x_{\Pi} \cdot R \cdot \rho}{q_{\Gamma}}. \quad (2.8)$$

Зависимость $n = f(x)$ позволяет с учетом (2.6) получить функцию, зависящую от времени, $n = \varphi_n(t)$.

В результате средняя по времени площадь поверхности контакта гранул со стенкой колонки будет равна:

$$S_k = S_o \cdot n_{cp} = S_o \cdot \frac{1}{t_{\Pi}} \int_0^{t_{\Pi}} \varphi_n(t) dt. \quad (2.9)$$

Для цилиндрических вертикальных гранул величина n_{cp} составляет 0.91. Для сферических гранул данная величина составляет 0.69. Для горизонтальных цилиндрических гранул величина $n = n_{cp}$, так как площадь контакта не зависит от времени и равно 0.91.

Значение n_{cp} достаточно близко к 1, тогда теплоотдача непосредственно к гранулам много больше теплоотдачи к потоку восходящего газа, в этом случае из выражения (2.1) получим $q_{ст} S_o = q_{гр} S_k$. Таким образом, в соответствии с (2.3) и (2.4), тепловой поток от массива грунта к замораживающей колонке $q_{ст}$ пропорционален тепловому потоку к замораживающей колонке с постоянной температурой стенки $t_{ст} = -78.9^{\circ}\text{C}$:

$$q_{ст} = n_{cp} \frac{t_0 - t_{CO2}}{\frac{d_k}{2 \cdot k_f} \cdot \ln\left(\frac{d_{л.ц.}}{d_k}\right)} = n_{cp} \cdot q_{ст \text{ при } t_{ст} = -78,9^{\circ}\text{C}} \quad (2.10)$$

В работе [68] модель протекания процесса была принята иной (рисунок 2.2б). Гранулы твердого диоксида углерода и поток углекислого газа рассматривались как единая структура. Это позволило при обработке полученных экспериментальных данных определить средний по поверхности колонки коэффициент теплоотдачи, при этом тепловой поток от стенки к диоксиду углерода определялся выражением:

$$q_{ст} = \alpha_{cp} \cdot (t_{ст} - t_{CO2}), \quad (2.11)$$

где α_{cp} – средний по поверхности коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°C).

Для коэффициента теплоотдачи была получена зависимость [68]:

$$\alpha_{cp} = 0.36 \cdot q_{ст}^{0.8}. \quad (2.12)$$

При наличии коэффициента теплоотдачи на поверхности стенки, тепловой поток от массива грунта к колонке описывается выражением:

$$q_{\text{ст}} = \frac{t_0 - t_{\text{CO}_2}}{\frac{d_{\text{к}}}{2 \cdot \alpha_{\text{ср}}} + \frac{d_{\text{к}}}{2 \cdot k_f} \cdot \ln \left(\frac{d_{\text{л.ц.}}}{d_{\text{к}}} \right)}. \quad (2.13)$$

Зная величину теплового потока, рассчитанную по (2.10), и подставляя её значение в (2.2) определим величину температуры стенки замораживающей колонки, соответствующую данному тепловому потоку. Зная величину теплового потока и температуру стенки колонки, приняв $t_0 = 0^\circ\text{C}$, можно по (2.11) определить выражение для определения коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha_{\text{ср}} = \frac{1}{t_{\text{CO}_2}(1 - n_{\text{ср}})} q_{\text{ст}}. \quad (2.14)$$

График зависимости среднего коэффициента теплоотдачи от теплового потока, построенный с использованием полученных значений $n_{\text{ср}}$, представлен на рисунке 2.4. Приняв значение $n_{\text{ср}} = 0.94$ для зависимости (2.14), была получена прямая, удовлетворительно повторяющая кривую, построенную по зависимости (2.12).

Необходимо отметить, что в экспериментальном исследовании [68] использовался не гранулированный, а дробленый диоксид углерод. Таким образом, средняя поверхность контакта кусков диоксида углерода со стенкой несколько больше (0.94 против 0.91), чем в случае рассмотренных гранул правильной формы.

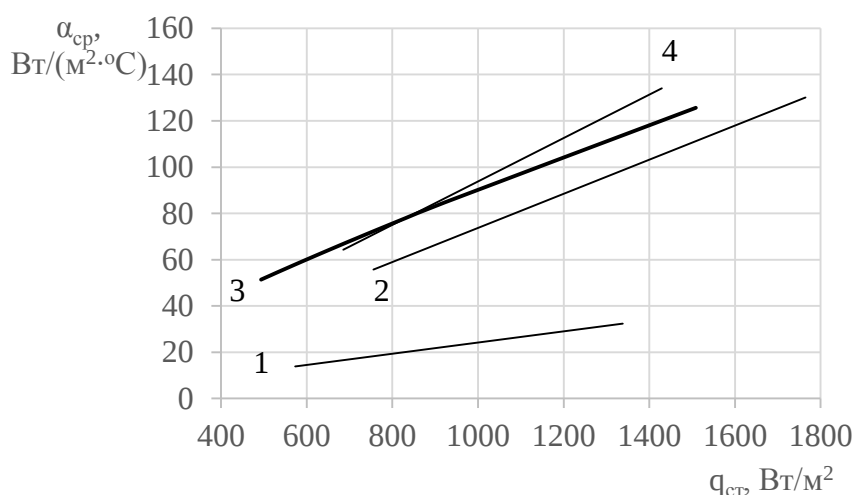


Рисунок 2.4 – Зависимость коэффициента теплоотдачи $\alpha_{\text{ср}}$ от теплового потока $q_{\text{ст}}$: 1 – $n_{\text{ср}} = 0.69$; 2 – $n_{\text{ср}} = 0.91$; 3 – по зависимости (2.12); 4 – $n_{\text{ср}} = 0.94$

При больших тепловых потоках (более 1000 Вт/м^2) значение среднего коэффициента теплоотдачи, рассчитанное по зависимости (2.12), меньше, чем рассчитанное по зависимости (2.14). Это объясняется тем, что при больших тепловых потоках сделанное допущение о незначительной величине термического сопротивления на контакте гранул со стенкой не справедливо. Для оценки влияния термического сопротивления на процесс теплопередачи к гранулированному диоксиду углерода необходимо выполнить экспериментальные исследования.

Коэффициент $n_{\text{ср}}$ может быть представлен как:

$$n_{\text{ср}} = 1 - \Pi, \quad (2.15)$$

где Π – коэффициент пустотности единицы объема занятой твердым диоксидом углерода.

На рисунке 2.5 показано изменение коэффициента теплоотдачи при изменении $n_{\text{ср}}$ для постоянного диаметра ледогрунтового цилиндра, равного 0.8 м. При $n_{\text{ср}} \rightarrow 1$ коэффициент теплоотдачи $\alpha_{\text{ср}} \rightarrow \infty$. При пустотности около 0.1 увеличение площади контакта частиц со стенкой приводит к значительному возрастанию коэффициента теплоотдачи, в то время как при больших значениях пустотности изменение коэффициента теплоотдачи более плавное. Для цилиндрических гранул при данном диаметре ледогрунтового цилиндра коэффициент теплоотдачи почти в 4 раза больше, чем для сферических.

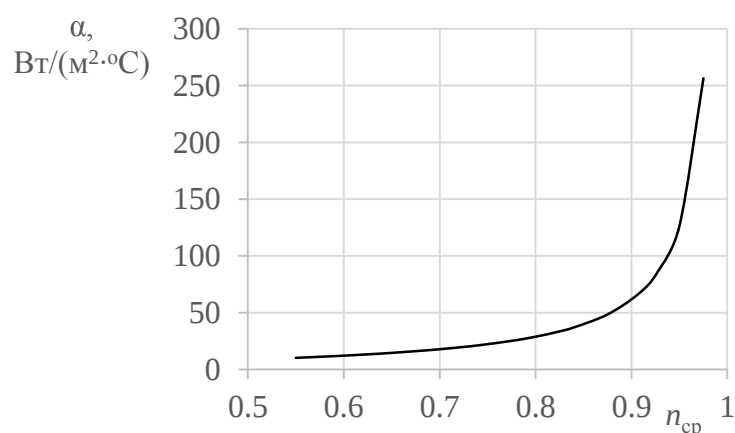


Рисунок 2.5 – Зависимость коэффициента теплоотдачи $\alpha_{\text{ср}}$ от $n_{\text{ср}}$ для диаметра ледогрунтового цилиндра 0.8 м

При больших значениях коэффициента теплоотдачи выражение (2.13) стремится к выражению (2.4).

При появлении пустот на контакте гранул диоксида углерода со стенкой колонки её температура повышается. Величина повышения определяется отношением средней площади контакта гранул со стенкой к общей площади. То есть происходит перераспределение и выравнивание температурного поля в стенке колонки, что приводит к установлению средней температуры отличной от минус 78.9 °С на её поверхности.

При загрузке в колонку гранул большого диаметра, которые по своим пропорциям близки к сферическим частицам, учет конвективного теплопереноса может быть необходим, так как величина $(1 - n_{\text{ср}})$ становится значительной. Характер движения газа точно определить невозможно из-за того, что форма канала и её изменения по длине колонки неизвестны. Местные сопротивления будут приводить к возмущению потока и нарушению гидродинамического пограничного слоя.

Для оценки влияния конвективной составляющей на процесс теплообмена условимся считать режим течения турбулентным, а стенку замораживающей колонки соответствующей плоской бесконечной пластине. В этом случае коэффициент теплоотдачи будут определяться из следующей критериальной зависимости [16]:

$$Nu_x = 0.0296 Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4}, \quad (2.16)$$

где $Nu_x = (\alpha \cdot x)/\lambda$ – число Нуссельта; x – координата по длине потока от основания колонки, м; λ – теплопроводность газа, Вт/(м·°С); $Re = \omega \cdot x/\nu$ – число Рейнольдса; ω – скорость течения газа, м/с; ν – кинематическая вязкость газа, м²/с; Pr – число Прандля, равное 0.79.

Подставив в (2.16) значения физических постоянных, получим:

$$\alpha_k = 3.29 \cdot \left(\frac{\omega}{x}\right)^{0.8}. \quad (2.17)$$

Предполагая, что весь газ, выделяющийся ниже рассматриваемого сечения, проходит верх через кольцевую щель вдоль стенки колонки, и при этом её

толщина мала, по сравнению с диаметром колонки, то скорость газа в данном сечении ω , м/с, может быть определена по выражению:

$$\begin{aligned}\omega &= S_{\text{пс}}^{-1} \cdot S_{\text{бп}} \cdot \frac{q \cdot m}{R} = \frac{1}{\pi \cdot d \cdot t_{\text{г.с.}}} \cdot \frac{m}{R} \int_0^l \pi \cdot d \cdot q_{\text{ст}} dl = \\ &= \frac{m}{t_{\text{г.с.}} \cdot R} \cdot \int_0^l q_{\text{ст}} dl ,\end{aligned}\quad (2.18)$$

где $S_{\text{пс}}$ – площадь поперечного сечения кольцевой щели через которую проходит поток газа, м²; $S_{\text{бп}}$ – площадь поверхности колонки ниже исследуемого сечения, м²; d – диаметр колонки, м; $t_{\text{г.с.}}$ – средняя по времени толщина кольцевой щели, м; R – скрытая теплота фазового перехода, Дж/кг; m – объем газа, образуемый при сублимации 1 кг твердого диоксида углерода, м³/кг; l – высота исследуемого отрезка колонки, м.

Примем в (2.18) значение параметров $m = 0.8$ м³/кг, $R = 574$ кДж/кг, и предположим, что толщина кольцевой щели равна характерному диаметру гранул. Газ может проходить только через $(1 - n_{\text{ср}})$ часть данной щели. Учитывая малую величину теплового потока, вызванного конвективной теплоотдачей, по сравнению с количеством тепла, воспринимаемым диоксидом углерода непосредственно от стенки, величину теплового потока к колонке $q_{\text{ст}}$ в (2.18) можно принять постоянной. Тогда (2.18) примет вид:

$$\alpha_{\text{к}} = \eta \cdot q_{\text{ст}}^{0.8} , \quad (2.19)$$

где η равно 0.067 для цилиндрических гранул и 0.024 для сферических.

Из (2.19) следует, что величина коэффициента конвективной теплоотдачи от стенки замораживающей колонки к потоку восходящего газа достаточно мала. В начальный период замораживания, когда величина теплового потока к колонке достигает 3–5 кВт/м², значение коэффициента теплоотдачи может достигать 30–40 Вт/(м²·°С). В дальнейшем данное значение снижается и не оказывает существенного влияния на процесс теплообмена.

В результате суммарный тепловой поток q_s , Вт, в рассматриваемом сечении колонки может быть определён по выражению:

$$q_s = (1 - \Pi) \cdot q_{max} + \Pi \cdot \alpha_k \cdot (t_{ct} - 78.9), \quad (2.20)$$

где q_{max} – тепловой поток к замораживающей колонке при постоянной температуре стенки, равной температуре сублимации твердого диоксида углерода, Вт/м²; t_{ct} – температура стенки колонки, может быть принята равной минус 72–75 °С.

Для одиночной замораживающей колонки, приняв температуру замерзания воды в грунте равной 0 °С, выражение (2.20) может быть записано в виде:

$$q_s = (1 - \Pi) \cdot \frac{t_0 - t_{CO2}}{\frac{d_k}{2 \cdot k_f} \cdot \ln\left(\frac{d_{л.ц.}}{d_k}\right)} + \Pi^2 \cdot \eta \cdot \frac{(t_0 - t_{CO2})^{1.8}}{\left(\frac{d_k}{2 \cdot k_f} \cdot \ln\left(\frac{d_{л.ц.}}{d_k}\right)\right)^{0.8}} \quad (2.21)$$

Выражение (2.21) с достаточной точностью может использоваться для определения теплового потока к замораживающей колонке, когда толщина ледогрунтового ограждения не превышает 1–1.5 м.

Справедливость приведенных теоретических выводов подтверждается удовлетворительной сходимостью результатов расчета с ранее проведенными экспериментальными исследованиями [68]. Однако ввиду того, что данные исследования выполнялись с дроблёным твердым диоксидом углерода, обобщать их результаты и на гранулированный диоксид углерода нельзя. Необходимо провести исследования процесса теплообмена между стенкой колонки и гранулированным диоксидом углерода, с целью выявления фактического значения коэффициента n_{cp} , соответствующего гранулированному диоксиду углерода, и зависимости коэффициента теплоотдачи от стенки колонки к твердому диоксиду углерода, как функции от теплового потока.

С ростом глубины на контакте гранул друг с другом будут возникать значительные сжимающие напряжения, в результате чего будет происходить разрушение гранул, при этом упаковка гранул станет более плотной. Следствием этого будет являться увеличение коэффициента n_{cp} с возрастанием глубины, в результате увеличится тепловой поток, воспринимаемый замораживающей колонкой.

Прочность твердого диоксида углерода на одноосное сжатие исследовалась в работе [79]. Исследования проводились на цилиндрических образцах (диаметром 18 мм и высотой 48 мм), спрессованного из снега диоксида углерода, при температуре минус 150 °С и минус 190 °С. Различные опыты показали близкие значения прочности, лежащие в диапазоне от 0.1 до 0.2 МПа в зависимости от скорости нагружения. При меньшем диаметре гранул и более низком качестве их изготовления можно ожидать меньших значений прочности.

Приняв коэффициент трения между стальной поверхностью трубы и поверхностью гранул малой величиной, напряжения в местах контакта будут вызваны только действием сил, создаваемых давлением вышележащих слоёв диоксида углерода.

Давление, действующее на некоторую «грузовую» площадку каждой гранулы, передаётся через неё соседним гранулам диоксида углерода. В зависимости от формы гранул «грузовые» площадки имеют различную форму и ориентацию в пространстве. Схема для определения площади «грузовых» контактных площадок для рассматриваемых случаев (сфер и вертикальных цилиндров) представлена на рисунке 2.6.

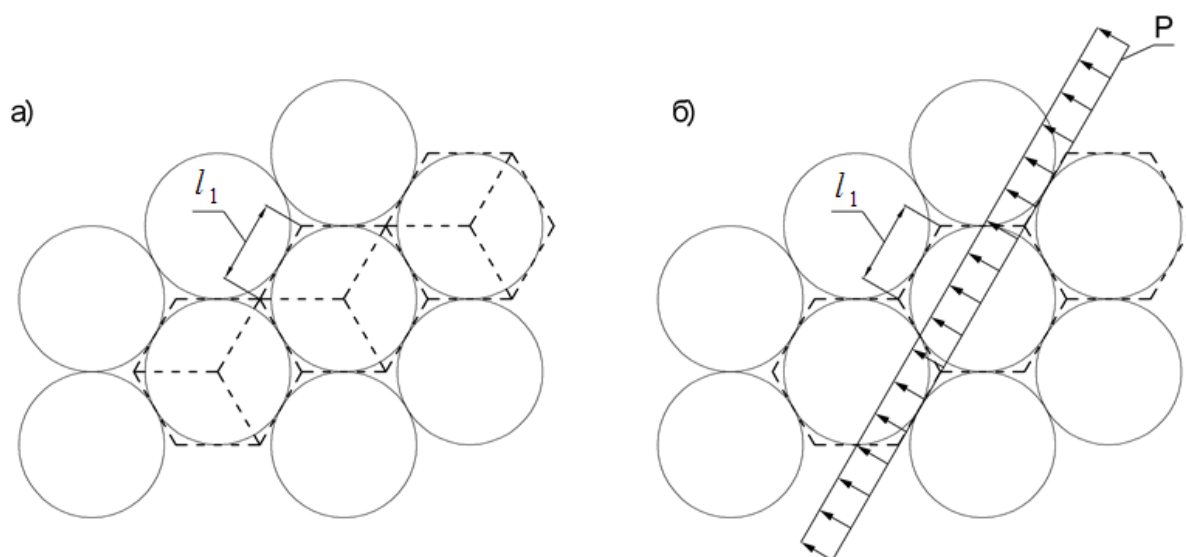


Рисунок 2.6 – Распределение сил, действующих между гранулами диоксида углерода. Пунктирные линии – «грузовые» площадки (стороны многогранника): *а* – сферические частицы; *б* – цилиндрические частицы

Вертикальное давление в замораживающей колонке на глубине h , м, будет равно $P_v = h \cdot \gamma_{CO_2}$, Па, а горизонтальное $P_r = P_v \cdot A$, Па, где ρ_{CO_2} – насыпная плотность диоксида углерода, кг/м³; A – коэффициент распора.

Для вертикальных цилиндрических гранул напряжения в поперечной плоскости гранул σ_1 , Па, и на боковых контактных площадках σ_2 , Па, определяются выражениями:

$$\sigma_1 = P_{\text{вер}} \cdot \frac{2 \cdot \sqrt{3} \cdot r^2}{\pi \cdot r^2} = 1.10 \cdot h \cdot \rho_{CO_2}, \quad (2.22.1)$$

$$\sigma_2 = P_{\text{гор}} \cdot \frac{l_1}{a} = 1.15 \cdot A \cdot h \cdot \rho_{CO_2} \frac{r}{a}, \quad (2.22.2)$$

где a – ширина площадки контакта, м; r – радиус гранулы, м; l_1 – ширина «грузовой» площадки (см. рисунок 2.6), м.

Для горизонтальных цилиндрических гранул напряжения на горизонтальных контактных площадках σ_1 и боковых наклонных площадках σ_2 определяются выражениями:

$$\sigma_1 = P_{\text{вер}} \cdot \frac{l_1}{a} = 1.15 \cdot h \cdot \rho_{CO_2} \cdot \frac{r}{a}, \quad (2.23.1)$$

$$\sigma_2 = (P_{\text{вер}} \cdot \cos 30 + P_{\text{гор}} \cdot \cos 60) \cdot \frac{l_1}{a} = (1 + A \cdot 0.57) \cdot h \cdot \rho_{CO_2} \frac{r}{a}. \quad (2.23.2)$$

Для сферических гранул напряжения на верхних контактных площадках σ_1 и боковых контактных площадках σ_2 равно:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= (P_{\text{вер}} \cdot \cos 30 + P_{\text{гор}} \cdot \cos 60) \cdot \frac{r^2 \cdot \sin 60}{\pi \cdot r_{\text{кон}}^2} = \\ &= (0.24 + A \cdot 0.14) \cdot h \cdot \rho_{CO_2} \cdot r^2 / r_{\text{кон}_1}^2, \end{aligned} \quad (2.24.1)$$

$$\sigma_2 = P_{\text{гор}} \cdot \frac{r^2}{\pi \cdot r_{\text{кон}}^2} = 0.32 \cdot A \cdot h \cdot \rho_{CO_2} \frac{r^2}{r_{\text{кон}_2}^2}, \quad (2.24.2)$$

где $r_{\text{кон}}$ – радиус контактной площадки, м.

Подставляя вместо значений σ_1 и σ_2 значение прочности твердого диоксида углерода при одноосном сжатии $\sigma_{\text{сж}}$, Па, могут быть определены зависимости a и $r_{\text{кон}}$ от действующего давления. Уплотнение структуры гранул будет происходить по схеме, изображённой на рисунке 2.7.

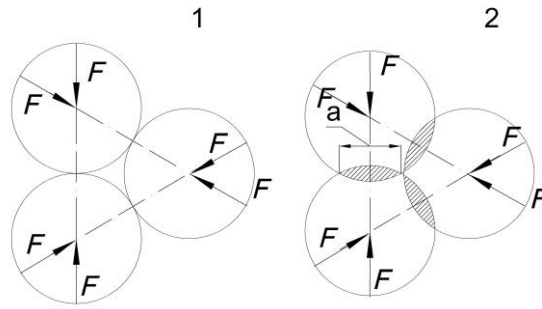


Рисунок 2.7 – Схема разрушения гранул при переходе из состояния 1 в состояние 2 под действием силы F . Заштрихованная область – зона разрушенного диоксида углерода

Примем для расчёта: $\sigma_{сж} = 0.2$ МПа , $\rho_{CO_2} = 800$ кг/м³ и $A = 0.3$. Зависимость коэффициента $n_{ср}$ от глубины представлена на рисунке 2.8.

Как видно из рисунка уплотнение гранул разной формы различно. Наибольшие изменения происходят в структуре сферических гранул, которая на глубине в 20 м по своей плотности достигает значений характерных для цилиндрических гранул. Коэффициент $n_{ср}$ для вертикальных цилиндров изменяется от 0.906 до 0.921, при этом коэффициент теплоотдачи увеличивается от 66 до 77 Вт/(м²·°C); для горизонтальных цилиндров от 0.906 до 0.927 с увеличением коэффициента теплоотдачи от 66 до 85 Вт/(м²·°C); для сферических частиц от 0.69 до 0.84 с увеличением коэффициента теплоотдачи от 17 до 37 Вт/(м²·°C).

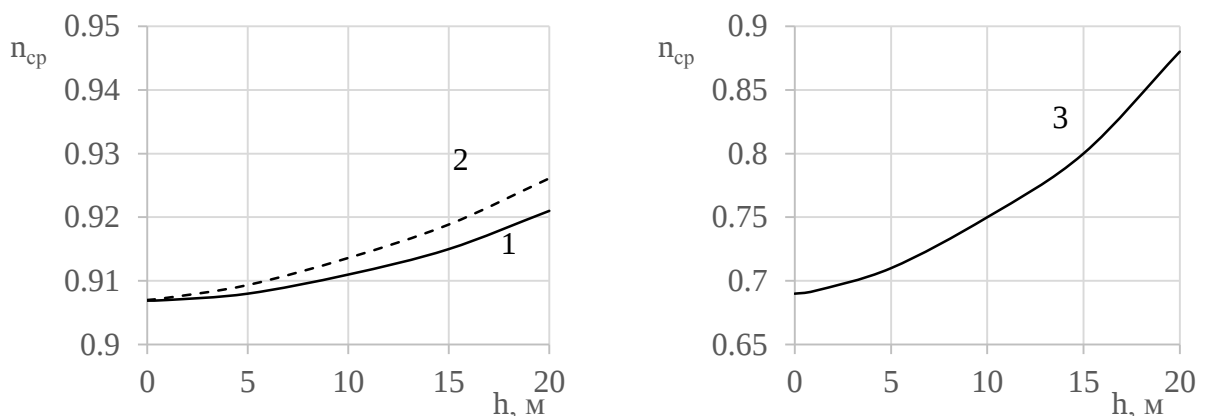


Рисунок 2.8 – Изменение $n_{ср}$ в зависимости от длины замораживающей колонки: 1 – вертикальные цилиндрические гранулы; 2 – горизонтальные цилиндрические гранулы; 3 – сферические гранулы

Для реальных гранул с произвольным размером и формой стоит ожидать значений изменения параметра $n_{\text{ср}}$ близких к цилиндрическим гранулам. Таким образом, величина коэффициента теплоотдачи может увеличиться до 5–10 % с ростом глубины до 20 м. Это значение является не существенным и может не учитываться в расчетах.

В случае если замораживающая колонка заполнена незамерзающей жидкостью, процесс теплообмена будет близок к процессу без жидкости. Однако из-за того, что плотность твёрдого диоксида отлична от плотности незамерзающей жидкости, твёрдый диоксид углерода будет стремиться опуститься на дно колонки или всплыть. При этом эффективность теплообмена в противоположенной части колонки снизится. Для недопущения проявления данного явления необходимо обеспечить такое соотношение объемов диоксида углерода и жидкости, при котором жидкость будет занимать только пространство между гранулами. Пустотность диоксида углерода составляет около 10 %, тогда объём жидкости для первичного заполнения должен составлять 10 % от объема твердого диоксида углерода.

Необходимый для заполнения колонки объём жидкости $V_{\text{ж}}$, м³, может быть определен из выражения:

$$V_{\text{ж}} = V_{\text{CO}_2} \cdot \Pi \quad (2.25)$$

где V_{CO_2} – объём диоксида углерода, м³.

2.2 Исследование процесса теплопередачи в испарителе при комбинированном способе замораживания грунтов

Комбинированный способ замораживания представляет собой вариант рассольного способа, в котором вместо компрессорной замораживающей станции установлен испаритель для охлаждения хладоносителя твердым диоксидом углерода [68].

Конструкция испарителя должна обеспечить восприятие тепла, которое хладоноситель получает при протекании через замораживающие колонки, и передачу его твердому диоксиду углерода:

$$Q_T = Q_K, \quad (2.26)$$

где Q_T – количество теплоты, передаваемое от твердого диоксида углерода к хладоносителю в единицу времени (мощность испарителя), Вт; Q_K – количество теплоты, поступающее от грунта к замораживающей колонке, Вт.

Тепловой поток, притекающий к замораживающим колонкам, зависит от большого числа факторов: вида хладоносителя, режима его течения в замораживающей колонке, теплофизических свойств грунта, толщины ледогрунтового ограждения в данный момент времени, геометрических размеров колонок и их взаимного расположения.

При комбинированном способе замораживания процесс теплообмена, происходящий в замораживающих колонках, аналогичен рассольному замораживанию.

Теория расчета испарителей хорошо изучена, и представлена в работах [8, 15, 16, 26, 49 и др.]. Правильно сконструированный испаритель должен эффективно передавать тепло, не создавать больших гидравлических сопротивлений, быть надежным и легким в обслуживании, быть дешевым в производстве и эксплуатации.

Существующие технологические схемы реализации испарителя можно разделить на две группы (см. рисунок 1.2):

1. с протеканием хладоносителя по изолированным каналам (змеевику, трубам, секциям);
2. с непосредственным контактом твердого диоксида углерода и хладоносителя.

По результатам проектирования должны быть определены: конструкция испарителя (основные геометрические размеры, площадь поверхности теплообмена); режим загрузки диоксида углерода в испаритель; общая потребность в твердом диоксиде углерода.

Выбор той или иной конструкции определяется по результатам технико-экономического анализа вариантов [97].

Для трубного испарителя основным параметром, определяющим интенсивность теплообмена, является коэффициент теплопередачи через стенку трубы (змеевика), разделяющей хладоноситель и хладагент.

Локальный коэффициент теплопередачи k_l , Вт/(м·°C) через круглую цилиндрическую стенку определяется по выражению [65]:

$$k_l = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_o \cdot d_o} + \frac{1}{2 \cdot k_w} \ln \left(\frac{d_o}{d_i} \right) + \frac{1}{\alpha_i \cdot d_i}}, \quad (2.27)$$

где α_o и α_i – соответственно коэффициент теплоотдачи на внешней и внутренней поверхности трубы, Вт/(м²·°C); k_w – коэффициент теплопроводности материала стенки трубы, Вт/(м·°C); d_o и d_i – соответственно внешний и внутренний диаметр трубы, м.

Количество тепла, передаваемое через стенку отрезка трубы Q , Вт, может быть определен из выражения:

$$dQ = k \cdot \Delta t \, dl, \quad (2.28)$$

где Δt – разность между температурой хладоносителя внутри трубы и в межтрубном пространстве, °C; dl – элементарная длина трубки, м.

Задача проектирования испарителя сводится к определению требуемой длины всех трубок L , м, обеспечивающих передачу тепла, Q_T , Вт, и определяемой по выражению:

$$L = \int_0^{Q_T} \frac{dQ}{k \cdot \Delta t} = \frac{Q_T}{k \cdot \Delta T}, \quad (2.29)$$

где ΔT – средний температурный напор по длине трубы, °C.

Задавая диаметр трубок и их количество n , выражение (2.29) сводится к определению длины одной трубки l , м:

$$l = \frac{Q_T}{n \cdot k \cdot \Delta T}. \quad (2.30)$$

При небольших перепадах температуры по длине трубы $(T_i - T_o)$, °C, ее изменение может быть принято линейным [49]. Температура в межтрубном пространстве является постоянной и равна температуре сублимации твердого диоксида углерода T_{CO_2} , °C, тогда средний температурный напор будет равен:

$$\Delta T = \frac{T_i - T_o}{2} - T_{CO_2} . \quad (2.31)$$

После определения длины одной трубки при всех возможных тепловых потоках, определяемых в соответствии с (2.26), выбирают наибольшее из полученных значений. После этого определяют суммарную потерю давления жидкости при её перекачивании во всех трубках при данном значении длины. Определяют металлоёмкость конструкции и стоимость ее изготовления.

Определение коэффициента теплоотдачи α_i в трубе происходит в зависимости от режима течения жидкости. Режим течения определяется скоростью движения жидкости по трубе ω , м/с, которая равна:

$$\omega = \frac{V}{n \cdot \frac{\pi \cdot d_i^2}{4}} , \quad (2.32)$$

где V – объемный расход хладоносителя в рассольной сети, м³/с.

Режим течения жидкости в трубе может быть ламинарным, переходным или турбулентным [16]. Режим течения определяется значением числа Рейнольдса, Re .

В случае ламинарного режима течения ($Re < 2300$) при постоянной температуре стенки средний коэффициент теплоотдачи по длине трубы может определяться из выражения [16]:

$$Nu = \sqrt[3]{3.66^3 + 1.61^3 \cdot Pe \cdot \frac{d}{l}} , \quad (2.33)$$

где $Pe = Re \cdot Pr$ – число Пекле.

Для переходного и турбулентного режима течения ($Re > 2300$) зависимость, учитывающая влияние начального нестабилизированного участка, для определения коэффициента теплоотдачи имеет вид [16]:

$$Nu = \frac{\frac{f}{8} \cdot Re \cdot Pr}{1 + 12.7 \sqrt{\frac{f}{8}} \cdot \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1 \right)}, \quad (2.34)$$

где f – коэффициент сопротивления трению при турбулентном течении.

Процесс теплообмена между твердым диоксидом углерода и стенкой трубок аналогичен процессу, происходящему между твердым диоксидом углерода и стенкой замораживающей колонки, который был описан в разделе 2.1. В этом случае теплопередача от стенки происходит только через часть площади поверхности трубок. При этом термическое сопротивление на контакте гранул со стенкой пренебрежимо мало. Тогда выражение (2.27) примет вид:

$$k_l = \frac{1}{\frac{1}{2 \cdot \lambda_w} \ln \left(\frac{d_o}{d_i} \right) + \frac{1}{\alpha_i \cdot d_i}}. \quad (2.35)$$

Выражение для определения длины одной трубки (2.30) примет вид (2.36). В данную зависимость необходимо включить коэффициент K_T , отражающий специфику теплообмена в зависимости от расположения трубок и применяемой технологической схемы.

$$l = \frac{Q_T}{n \cdot n_{cp} \cdot K_T \cdot k \cdot \Delta T} \quad (2.36)$$

При горизонтальном расположении трубок интенсивность теплопередачи в нижней части их сечения будет значительно снижаться из-за невозможности обеспечить плотный контакт гранул и стенки. В этом случае коэффициент K_T может быть принят равным 0.7–0.8. Для вертикальных трубок данный коэффициент близок к 1. При заполнении испарителя незамерзающей жидкостью коэффициент K_T можно принять близким к 1.

Таким образом, при вертикальном расположении трубок в испарителе их общая длина может быть уменьшена на 20–30 % по сравнению с испарителем с горизонтальным расположением труб.

При использовании беструбного испарителя с непосредственным контактом между хладоносителем и твердым диоксидом углерода (см. рисунок 1.2б),

количество загружаемого диоксида углерода должно быть таким, что бы вся его масса успевала сублимировать в процессе прохождения жидкости через испаритель для недопущения попадания гранул в рассольную сеть.

Процесс теплопередачи в данной конструкции испарителя является достаточно сложным. Он объединяет вынужденную и свободную конвекцию, массоперенос. Точный учет всех факторов крайне сложен для аналитического описания, поэтому приоритетным направлением исследований должен выступать лабораторный эксперимент.

Процесс теплообмена можно представить как квазистационарный, при котором теплопередача происходит преимущественно под действием свободной конвекции.

Теплообмен при сублимации близок по своему виду к процессу кипения. В случае плёночного кипения на горизонтальном цилиндре при ламинарной газовой пленке на поверхности коэффициент теплоотдачи определяется по выражению [49]:

$$\alpha = 0.67 \left(\frac{\lambda_{\Gamma}^3 \cdot \rho_{\Gamma} \cdot (\rho_{\text{ж}} - \rho_{\Gamma}) \cdot g \cdot r}{\mu_{\Gamma} \cdot \Delta T \cdot d} \right)^{1/4}, \quad (2.37)$$

где λ_{Γ} , ρ_{Γ} , μ_{Γ} – теплопроводность, Вт/(м·°С), плотность, кг/м³, и вязкость, Па·с газа; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости, кг/м³; d – диаметр гранулы, м; g – ускорение силы тяжести, м/с²; r – скрытая теплота фазового перехода, Дж/кг; ΔT – температурный напор (разность между температурой сублимации твердого диоксида углерода и температурой жидкости), °С.

Значения коэффициента теплоотдачи, рассчитанные по (2.37) для различных температурных напоров и диаметров гранул, при плотности жидкости $\rho_{\text{ж}} = 1200$ кг/м³, представлены на рисунке 2.9.

Зависимость (2.37), полученная аналитически, справедлива для ламинарного газового пограничного слоя в неподвижной жидкости с постоянной температурой. Однако такие условия будут маловероятны. При расположении гранул диоксида углерода близко друг к другу потоки образующегося газа будут перемешивать жидкость, нарушая ламинарный пограничный слой.

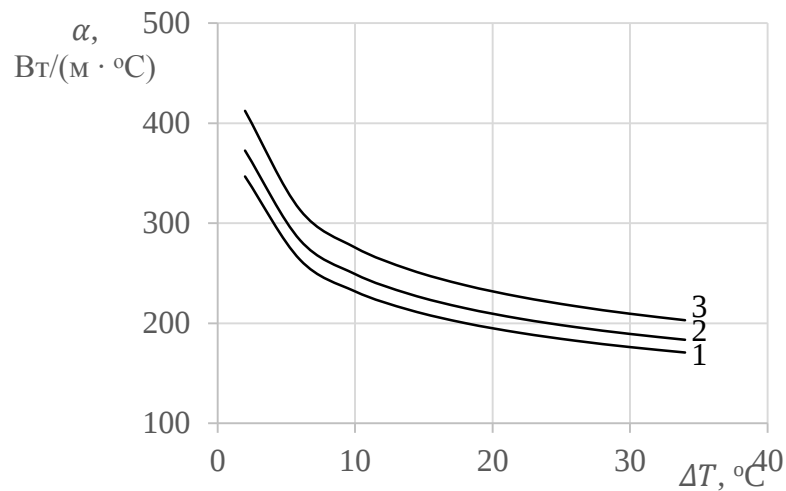


Рисунок 2.9 – Зависимость коэффициента теплоотдачи α от температурного напора ΔT для диаметра гранул 8мм (1), 6мм (2), 4мм (3)

Зависимость (2.37) не учитывает свойства жидкости, которые могут значительно повлиять на характер отвода газа и привести к росту или уменьшению газового слоя вокруг гранул.

Процесс теплообмена, происходящий в испарителе, включает три фазы (жидкую, твердую и газообразную). На настоящий момент данный класс задач изучен недостаточно. При описании двухфазных систем (газ–жидкость; жидкость–твердые частица) отмечается малая точность зависимостей полученных аналитически, что не позволяет описывать процесс точнее $\pm 30\%$ [49, 99]. Зависимости, обладающие большей точностью, могут быть получены по результатам лабораторного эксперимента.

2.3 Выбор и обоснование типа хладоносителя для комбинированного способа замораживания

При искусственном замораживании грунтов одним из ключевых факторов, определяющих эффективность отбора тепла от грунта, является тип используемого хладоносителя. Его физические свойства определяют интенсивность теплообмена и энергетические затраты на его перекачивание по трубам гидравлической сети [46].

Повсеместно применяемой в качестве хладоносителя жидкостью является водный раствор хлористого кальция. Однако он обладает значительными недостатками: недостаточно низкой температурой кристаллизации; агрессивностью по отношению к ледогрунтовому ограждению, что приводит к его таянию в случае утечки. Данные факторы приводят к необходимости поиска и выбора альтернативных жидкостей.

Проблема выбора альтернативного хладоносителя для замораживания грунтов отражена в работах [22, 37, 62, 65].

В различных отраслях промышленности в качестве хладоносителей нашли применения водные растворы хлористого кальция, натрия и магния, водные растворы пропиленгликоля и глицерина. В настоящее время широкое распространение получили растворы на основе неводных и смешанных растворителей, особое место среди которых занимают водно-органические. Большое развитие получило использование раствора электролитов [2, 11, 14].

При выборе хладоносителя для способов замораживания с использованием твердого диоксида углерода требования к нему повышаются. В ряде технологических схем хладоноситель помещается в открытую ёмкость (в открытую сверху замораживающую колонку или испаритель). Таким образом, в процессе загрузки диоксида углерода повышается риск непосредственного контакта жидкости с человеком, а также с источниками огня или электроприборами.

Приведенный в работе [19] анализ практики использования хладоносителей в различных отраслях промышленности показывает, что теплофизические свойства хладоносителя должны быть не ниже следующих значений: теплоемкость не менее $2850 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; теплопроводность не менее $0.28 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$; динамическая вязкость не более $18.5 \text{ мПа} \cdot \text{с}$.

Конкретное влияние тех или иных свойств на теплопередачу в значительной степени зависит от конфигурации гидравлической сети.

До настоящего момента не разработана методика выбора хладоносителя для искусственного замораживания грунтов. Существуют методики, разработанные

для других отраслей промышленности, в частности [37]. Представленный метод основан на расчете двух критериев: оценивающий эффективность теплоотдачи в круглой гладкой трубе заданного диаметра при заданной скорости течения жидкости; и оценивающий гидравлические потери на трение. Совокупный анализ предлагаемых критериев позволяет произвести сравнение различных жидкостей. Данная методика может быть модифицирована для условий искусственного замораживания грунтов.

Интенсивность отбора тепла от грунта определяется коэффициентом теплоотдачи в замораживающей колонке, зависящим от основных физических свойств жидкости, характера течения и формы канала [27].

Принятые в практике размеры замораживающих колонок (диаметром до 0.15 м), питающих труб (диаметром до 0.05 м), и скорости течения хладоносителя (до 0.2 м/с в кольцевом пространстве), соответствуют ламинарному режиму течения [31]. Средний коэффициент теплоотдачи по длине замораживающей колонки при ламинарном вязкостно-гравитационном течении хладоносителя может быть определен из зависимости [16]:

$$Nu = 0.15 \cdot Re^{0.32} \cdot Pr^{0.33} \cdot (Gr \cdot Pr)^{0.1}, \quad (2.38)$$

где Nu – число Нуссельта; Re – число Рейнольдса; Pr – число Прандтля; Gr – число Грасгофа.

Подставив в (2.38) значения чисел подобия, характерный геометрический размер 0.1 м и скорость течения 0.2 м/с, получим значение первого критерия K_α , характеризующего способность хладоносителя отбирать тепло от грунта:

$$K_\alpha = 0.31 \cdot \lambda^{0.57} \cdot \rho^{0.52} \cdot \eta^{-0.09} \cdot C_p^{0.43} \cdot \beta^{0.1}, \quad (2.39)$$

где λ , ρ , C_p – теплопроводность, Вт/(м·°C), плотность, кг/м³, и удельная теплоемкость жидкости при постоянном давлении, Дж/(кг·°C); η – коэффициент динамической вязкости, Па·с; β – коэффициент объемного расширения жидкости, °C⁻¹

Из (2.39) следует, что значительное влияние на эффективность теплоотдачи оказывают величины теплопроводности, плотности и теплоемкости хладоносителя. Влияние вязкости и коэффициента объемного расширения мало.

Энергетические затраты на перекачивание хладоносителя определяются возникающим сопротивлением трению. Потери давления на преодоление сил трения ΔP , Па, при течении несжимаемой жидкости в каналах определяется по выражению:

$$\Delta P = f \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho \cdot \omega^2}{2}, \quad (2.40)$$

где f – коэффициент сопротивления трению, определяемый в зависимости от режима течения жидкости по трубе; l – длина трубы, м; d – диаметр трубы, м; ρ – плотность жидкости, кг/м³; ω – скорость течения жидкости по трубе, м/с.

Преобразуя выражение (2.40) может быть получен критерий K_e , характеризующий затраты энергии на перекачивание жидкости по трубам:

$$K_e = 640 \cdot \eta \quad (2.41)$$

Из (2.41) следует, что единственным параметром, влияющим на величину энергетических затрат, является вязкость жидкости.

Хладоносители для искусственного замораживания грунтов могут быть разделены в зависимости от их температуры кристаллизации на группы: не ниже минус 30 °С; не ниже минус 55 °С; и не ниже минус 80 °С.

Хладоносители первой группы предназначены для рассольного замораживания с использованием компрессоров с одноступенчатым циклом сжатия хладагентов. Хладоносители с температурой кристаллизации от минус 30 до минус 55 °С предназначены для низкотемпературного рассольного замораживания.

Температурный диапазон ниже минус 55 °С может быть достигнут при применении комбинированного способа замораживания с использованием твердого диоксида углерода.

Применение хладоносителей с температурой кристаллизации менее минус 55 °С в промышленности ограничено. Вследствие этого выпускаемые жидкости обладают существенными недостатками или высокой стоимостью. В качестве хладоносителя могут выступать органические жидкости, в частности, спирты, ароматические соединения, соединения на основе полиорганического силиката,

жидкости из группы фреонов – дихлорметан и другие. Многие выпускаемые жидкости являются горючими и опасными для человека, что делает невозможным их использование в открытых системах.

Химической промышленностью выпускаются хладоносители различного химического состава под различными торговыми марками. В большинстве случаев публикуется наименование только основного компонента, остальной состав является коммерческой тайной. Хладоносители на основе одного вещества от различных производителей обладают близкими физическими свойствами. Таким образом, можно рассматривать частные жидкости, обобщая результаты на весь класс веществ, основанных на данном основном компоненте.

Анализ наиболее распространённых хладоносителей представлен в работе [37]. Физические свойства жидкостей и значения рассчитанных критериев сравнения представлены в таблице 2.1.

В первой группе хладоносителей лучшими теплопередающими свойствам обладает жидкость на основе ацетата калия. При равной стоимости ее можно рекомендовать в качестве хладоносителя для замораживания грунтов. Недостатком данной жидкости является нераспространённость в отечественной промышленности. Альтернативным вариантом может являться хладоноситель на основе этиленкарбита, который близок по теплопередающим свойствам, однако требует больших затрат энергии на перекачивание по рассольной сети.

Во второй исследуемой группе можно также выделить смесь на основе этилкарбита. Высокая теплопередающая способность и низкие энергетические затраты делают ее наиболее конкурентоспособной.

Водный раствор хлористого кальция является эффективным при использовании до температуры минус 55 °С. При его применении необходимо обеспечить целостность и герметичность замораживающий колонок.

В третьей исследуемой группе наилучшие теплофизические свойства показали чистые спирты и ацетон. Ацетон, обладающей низкой вязкостью, требует минимальных затрат на перекачивание по трубам рассольной сети. Недостатком данных жидкостей является их пожарная опасность, однако при

соблюдении высокой культуры производства работ, с учетом низкой стоимости, от их применения может быть получен существенный положительный экономический эффект. В данной группе могут быть рекомендованы хладоносители на основе полидиметилсиликсана или этилбензола.

Выбор и обоснование применения конкретного хладоносителя должен производиться индивидуально для каждого объекта строительства.

Таблица 2.1 – Теплофизические свойства исследуемых хладоносителей

Основной компонент жидкости	Название жидкости	Теплофизические свойства					Класс по ГОСТ 12.1.007-76	Класс по ГОСТ 12.1.044-89	Критерии эффективности	
		T_3 , °C	ρ , кг/м ³	η , Па·с	λ , Вт/(м·°C)	C_p , Дж/(кг·°C)			K_α	K_e
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Для рассольного замораживания (до -30 °C)										
Водный раствор хлористого кальция (25.7 %)	-	-31	1240	0.023	0.43	2792	4	-	190	14.7
Водный раствор пропиленгликоля (52%)	-	-35	1067	0.19	0.21	3460	-	-	108	121
Водный раствор этиленгликоля (46.4%)	-	-33	1060	0.32	0.43	3224	4	-	150	204
Водный раствор этилкарбита	«Экосол-40»	-40	1082	0.021	0.41	3490	3	4	196	13.4
Смесь алифатических углеводородов	«Paratherm LR»	-50	795	0.006	0.16	1800	4	4	82	3.8
Водный раствор смеси гликолей	«Dynalene BioGlycol (60%)»	-34	1070	0.146	0.30	3097	-	-	127	93
Водный раствор ацетата калия	«Dynalene HC-30»	-40	1300	0.007	0.47	2961	4	-	239	4.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Для низкотемпературного рассольного замораживания (до -55 °С)										
Водный раствор хлористого кальция (29.2%)	-	-55	1290	0.059	0.40	2600	4	-	170	37
Водный раствор этилкарбита	«Экосол – 65»	-65	1094	0.029	0.43	3217	3	4	191	18
Смесь алифатических углеводородов	«Dynalene HF-LO»	-73	819	0.019	0.12	1810	4	3	65	12
Смесь на основе полидиметил-силоксана	«Clearco PSF-10cSt»	-60	1050	0.129	0.15	1500	4	4	64	82
Смесь на основе терпена	-	-65	850	0.012	0.12	1800	3	3	68	7.5
Для замораживания с использованием твердого диоксида углерода (до -79 °С)										
Смесь ароматических углеводородов	«Dynalene MV»	-112	923	0.011	0.16	1443	3	3	76	7.0
Смесь на основе полидиметил-силоксана	«Clearco PSF-2cSt»	-80	1020	0.028	0.13	1800	4	4	74	17
Смесь на основе этилбензола	«Paratherm CR»	-110	924	0.006	0.15	1600	3	4	81	3.8
Дихлорметан	-	-96.7	1327	0.012	0.11	1250	3	4	71	7.6
Этиловый спирт	-	-114	879	0.018	0.19	2240	4	1	98	11
Метиловый спирт	-	-97	874	0.005	0.21	2510	4	1	120	3.2
Ацетон	-	-95	890	0.003	0.2	2150	4	1	113	2

где T_3 – температура кристаллизации, °С

2.4 Выводы по главе

1. На основании анализа процесса теплообмена между твердым диоксидом углерода и стенкой колонки установлено, что процесс теплообмена происходит преимущественно за счет теплопередачи от стенки к гранулам, в то время как влиянием конвективной теплоотдачи к потоку углекислого газа можно пренебречь.

2. Установлено, что при использовании гранулированного диоксида углерода, в процессе теплопередачи со стенкой участвует только часть ее поверхности, составляющая от 68 до 91 % от общей её площади. При

использовании дробленого диоксида углерода, на основании анализа данных лабораторных исследований, произведенных ранее другими авторами, установлено, что в теплообмене участвует до 94 % площади поверхности колонки.

3. Установлено, что при создании ледогрунтового ограждения замораживающими колонками, заполненными твердым диоксидом углерода, средний по поверхности замораживающей колонки коэффициент теплоотдачи, при толщине ограждения 0.5–2 м, пропорционален тепловому потоку от массива грунта, при этом коэффициент пропорциональности зависит от вида твердого диоксида углерода.

4. При увеличении глубины замораживания, в замораживающей колонке, заполненной твердым диоксидом углерода, возрастает давление на контакте гранул друг с другом, это приводит к их разрушению в точках контакта. В результате происходит уплотнение всей структуры гранул с уменьшением пустотности, что увеличивает поверхность контакта твердого диоксида углерода со стенкой. В результате уплотнения при увеличении глубины от 0 до 20 м коэффициент теплоотдачи в замораживающей колонке увеличивается на 5–10 %.

5. Конструкция трубного испарителя с вертикальным расположением трубок более экономична по сравнению с горизонтальным расположением. В этом случае общая длина трубок до 30 % меньше, что снижает затраты на перекачивание жидкости и общую стоимость изготовления конструкции.

6. На основании анализа выпускаемых промышленностью хладоносителей установлено, что для замораживания грунтов в качестве замены водному раствору хлористого кальция могут выступать хладоносители на основе ацетата калия. Для использования при температурах от минус 50 до минус 80 °С, характерных для комбинированного способа замораживания, могут быть рекомендованы хладоносители на основе полидиметилсиликсана или этилбензола.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЗАМОРАЖИВАНИЯ ГРУНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТВЕРДОГО ДИОКСИДА УГЛЕРОДА

3.1 Цели, задачи и программа исследований

Экспериментальные исследования проводились по двум направлениям.

Первое направление исследований было направлено на установление закономерности изменения теплопередачи от стенки одиночной замораживающей колонки к гранулированному твердому диоксиду углерода, помещенному в неё, необходимой для установления закономерностей формирования ледогрунтового ограждения.

Второе направление исследований было направлено на установление закономерности изменения теплопередачи от гранулированного твердого диоксида углерода при помещении его в жидкость, необходимой для определения параметров испарителя для охлаждения хладоносителя при искусственном замораживании грунтов комбинированным способом.

Как было указано в главе 1, опыт промышленного внедрения показал, что наиболее удобно в практике замораживания грунтов применять гранулированный диоксид углерода, поэтому в рамках настоящего исследования в качестве хладагента применялся гранулированный диоксид углерода.

Целью первого направления лабораторных исследований являлось установление закономерности изменения коэффициента теплоотдачи от стальной цилиндрической стенки замораживающей колонки к гранулированному твердому диоксиду углерода в зависимости от теплового потока и глубины колонки.

Из-за ограниченности номенклатуры диаметров гранул твердого диоксида углерода, выпускаемой промышленностью, невозможно воспроизвести происходящий в замораживающей колонке процесс в уменьшенном масштабе. Поэтому геометрический масштаб исследуемой системы принят равным 1 к 1.

Лабораторное исследование [68] установило, что при увеличении диаметра колонки от 100 до 219 мм не происходит качественного изменения локальных параметров теплопередачи, поэтому исследования производились с замораживающей колонкой диаметром 102 мм.

Для моделирования глубины замораживания на гранулы твердого диоксида углерода устанавливался специальный пригруз, моделирующий нагрузку от вышележащих слоёв диоксида углерода. Масса пригрузов было выбрана равной массе столба твердого диоксида углерода высотой 1.5 и 2.65 м. Таким образом, при их установке на гранулы твердого диоксида углерода в основании исследуемой замораживающей колонки длиной 2 м создавались условия, аналогичные для замораживающей колонки длиной 3.5 и 4.65 м в зависимости от массы пригруза.

Программа экспериментальных исследований по первому направлению представлена в таблице 3.1.

Целью второго направления экспериментальных исследований являлось определение закономерности изменения коэффициента теплоотдачи от трудно замерзающей жидкости к твердому диоксиду углерода при их непосредственном контакте в испарителе в зависимости от свойств хладоносителя и концентрации твердого диоксида углерода.

Таблица 3.1 – Программа экспериментальных исследований по первому направлению исследований

№ опыта	Условия опыта	Исходные данные			Число опытов
		Уровень диоксида углерода от дна колонки, м	Масса пригруза, кг	Моделируемый диапазон глубин, м	
1	Одиночная колонка диаметром 102мм с твердым криоагентом	2	11.5	От 2.35 до 4.35	4
2			6.5	От 1.2 до 3.2	4
3			0	От 0 до 2	4

Как было показано в разделе 2.3, промышленностью выпускается большое число типов хладоносителей. Провести испытания со всеми из них затруднительно. В качестве исследуемых жидкостей были приняты водный раствор хлористого кальция, водный раствор этиленгликоля и этиловый спирт. В результате анализа данных, полученных в экспериментах, с использованием методов теории подобия, могут быть получены безразмерные зависимости, описывающие процесс теплопередачи при использовании произвольной жидкости.

Концентрация диоксида углерода по массе в ёмкости принималась постоянной и равной 2 %, 6 % и 10 %.

Существенное значение при исследовании процесса теплообмена между хладоносителем и гранулами твердого диоксида углерода оказывают размеры и конфигурация емкости, в которой происходит теплообмен. При малой (до 10 %) концентрации диоксида углерода в ёмкости, можно считать процесс теплообмена, происходящий вокруг гранул, как происходящий в большом объеме, в котором влияние стенок ёмкости мало. Принимая во внимание характерный размер гранул диоксида углерода, лабораторное исследование производилось с цилиндрической ёмкостью диаметром 200 мм и высотой 200 мм.

Программа исследований по второму направлению представлена в таблице 3.2. Начальная температура жидкости во всех опытах была равна 20 °С.

Таблица 3.2 – Программа экспериментальных исследований по второму направлению исследований

Условия опыта	Исходные данные		Число опытов
	Тип жидкости	Концентрация диоксида углерода по массе	
Постоянная концентрация диоксида углерода	Водный раствор хлористого кальция 29%	2%, 6%, 10%	6
	Водный раствор этиленгликоля 55%	2%, 6%, 10%	6
	Этиловый спирт	2%, 6%, 10%	6

3.2 Методика проведения исследований

При исследовании процесса теплоотдачи от стенки замораживающей колонки к твердому диоксиду углерода необходимо определить величину теплового потока от массива грунта и температуру стенки замораживающей колонки.

В процессе замораживания грунтов, окружающий колонку массив охлаждается. Зная изменение температурного поля в массиве $T(r, \varphi, \tau)$, можно определить тепловой поток к ней q , Вт/м²:

$$q = \frac{dE}{d\tau} \cdot S^{-1} = \frac{d}{d\tau} \int_{\frac{d}{2}}^{\frac{D}{2}} \int_0^{2\pi} (T(r, \varphi, \tau) \cdot \rho \cdot C_p) d\varphi dr \Delta l \cdot S^{-1}, \quad (3.1)$$

где E – теплосодержание массива грунта, в исследуемом цилиндрическом сечении высотой Δl , Дж; S – площадь поверхности колонки в рассматриваемом сечении, м²; ρ – плотность массива, кг/м³; C_p – теплоемкость массива Дж/(кг·°C); τ – время, с; d – диаметр колонки, м; D – диаметр массива грунта, м.

Коэффициент теплоотдачи α , Вт/(м²·°C), наблюдаемый в эксперименте, может быть определен по формуле:

$$\alpha = \frac{q}{\Delta T}, \quad (3.2)$$

где ΔT – разница между температурой сублимации твердого диоксида углерода, и температурой стенки колонки, °C.

Величину действующего давления P_x , Па, в поперечном сечении колонки от вышележащих слоев диоксида углерода на высоте x можно определить исходя из его насыпной плотности и его уровня по выражению:

$$P_x = \rho_{CO_2 \text{ нас}} \cdot S_K \cdot (l - x - \Delta l) + P_{\text{доп}}, \quad (3.3)$$

где $\rho_{CO_2 \text{ нас}}$ – насыпная плотность гранулированного диоксида углерода, кг/м³; S_K – площадь поперечного сечения колонки, м²; l – высота колонки, м; Δl – расстояние от верха колонки до уровня диоксида углерода, м; $P_{\text{доп}}$ – величина давления от дополнительно пригруза, Па.

Выражение для нахождения коэффициента теплоотдачи будем искать в виде функции от теплового потока и вертикальной координаты:

$$\alpha = f(q, x). \quad (3.4)$$

Из (3.1) следует, что при определении теплового потока определяющей величиной является изменение теплосодержания массива вокруг колонки, при этом его геометрические размеры и теплофизические свойства могут быть произвольными.

Как показано в работе [68], тепловой поток к замораживающей колонке изменяется в процессе роста ледогрунтового ограждения от 4000 Вт/м² до 500 Вт/м², таким образом, именно данные значения теплового потока должны воссоздаваться в лабораторных экспериментах. При этом заданный тепловой поток должен поддерживаться на поверхности стенки в течение времени, достаточного для фиксации изменения температурного поля применяемым измерительным оборудованием. Таким образом, толщина массива и тип грунта вокруг колонки выбирались исходя из необходимого времени его охлаждения.

При малой толщине массива вокруг колонки, при использовании реального грунта обеспечить однородность его теплофизических свойств достаточно сложно. Таким образом, в работе рассматривался массив, выполненный из цементно-песчаного раствора.

При проведении экспериментов по второму направлению процесс, происходящий при моделировании теплоотдачи от твердого диоксида углерода, сопряжён с рядом трудностей. Затруднено описание геометрической формы частиц диоксида углерода и их положения в каждый момент времени, значительные трудности возникают при описании процесса взаимодействия восходящего газового потока с окружающей его жидкостью, соседними струями газа и другими частицами диоксида углерода.

В связи с вышеизложенным, при проведении экспериментов приняты следующие допущения: теплообмен между восходящим потоком газа и жидкостью пренебрежимо мал; средняя удельная поверхность диоксида углерода является постоянной величиной, не зависящей от времени протекания

процесса сублимации; температура жидкости не зависит от точки ее измерения, и равна средней температуре жидкости в емкости.

Твердый диоксид углерода загружается в емкость регулярно с заданным шагом по времени для поддержания его концентрации в емкости. Таким образом, в каждый момент времени в емкости находятся как частицы, сублимирующие уже долгое время, и имеющие малый диаметр, так и загруженные в емкость недавно, при этом соотношение количества частиц разных размеров будет постоянным. Исходя из этого, общая поверхность частиц диоксида углерода, находящихся в емкости, будет постоянной во времени величиной.

Большое количество газа, выделяющегося при сублимации, интенсивно перемешивает жидкость, что обеспечивает практически мгновенное выравнивание температуры в результате действия вынужденной конвекции. Данное утверждение, с учетом постоянства температуры гранул диоксида углерода, позволяет рассматривать нестационарный процесс теплообмена как квазистационарный, используя для его описания зависимости и методики, характерные для стационарного процесса теплоотдачи.

Сделанные допущения позволяют рассматривать процесс без учета влияния фазового перехода, как теплообмен, происходящий в результате вынужденной конвекции, происходящей при обтекании жидкостью гранул твердого диоксида углерода в бесконечно большом объеме. В этом случае коэффициент теплоотдачи на поверхности твердого диоксида углерода зависит только от свойств жидкости.

При моделировании квазистационарного процесса конвективной теплоотдачи необходимо выполнение следующих условий подобия:

$$\begin{aligned} Nu &= \frac{\alpha \cdot d}{\lambda} = idem, \\ Re &= \frac{w \cdot d}{\nu} = idem, \\ Pr &= \frac{\nu \cdot C_p \cdot \gamma}{\lambda} = idem. \end{aligned} \tag{3.5}$$

За определяющий размер удобно принять средний диаметр гранул, находящихся в емкости.

С учетом того, что жидкости, рассматриваемые в эксперименте, те же что и на практике, масштаб модели был равен 1 к 1. Таким образом, все полученные результаты могут быть перенесены в натуру без пересчета.

Для получения значения коэффициента теплоотдачи из опытных данных воспользуемся законом Ньютона-Рихмана для конвективной теплоотдачи:

$$dQ = \alpha \cdot (t_{\text{ж}} - t_{\text{ст}}) \cdot dF, \quad (3.6)$$

где Q – количество тепла отнимаемое у жидкости в единицу времени, Вт; F – площадь поверхности теплообмена, м^2 ; $(t_{\text{ж}} - t_{\text{ст}})$ – разность между температурой жидкости и стенки, $^{\circ}\text{C}$; α – коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$.

В исследуемом процессе неизвестна площадь теплообмена в начальный момент времени и ее изменение в процессе теплообмена. Учтя сделанное ранее предположение о постоянстве удельной поверхности диоксида углерода, можно записать равенство:

$$dF = n \cdot dm, \quad (3.7)$$

где m – масса диоксида углерода, кг; n – средняя площадь удельной поверхности частиц диоксида углерода, $\text{м}^2/\text{кг}$.

Тогда выражение (3.6) примет вид:

$$dQ = \alpha \cdot (t_{\text{ж}} - t_{\text{ст}}) \cdot n \cdot dm. \quad (3.8)$$

Проинтегрировав левую и правую часть данного уравнения по площади и массе частиц соответственно, получим выражение:

$$\alpha = \frac{Q}{(t_{\text{ж}} - t_{\text{ст}}) \cdot n \cdot m_{\text{CO}_2}}. \quad (3.9)$$

Количество тепла Q полностью направлено на изменение теплосодержания жидкости в емкости, тогда оно определяется выражением:

$$Q = \frac{m_{\text{ж}} \cdot C \cdot \Delta t_{\text{ж}}}{\Delta \tau}, \quad (3.10)$$

где $m_{\text{ж}}$ – масса жидкости, кг; C – теплоемкость жидкости, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C})$; $\Delta t_{\text{ж}}$ – изменение температуры жидкости за время $\Delta \tau$, $^{\circ}\text{C}$.

При $\Delta\tau \rightarrow 0$ выражение (3.10) примет вид:

$$Q = m_{\text{ж}} \cdot C \cdot \frac{dt_{\text{ж}}}{d\tau}. \quad (3.11)$$

Подставив (3.11) в (3.9) получим расчетное выражение для нахождения коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha = \frac{m_{\text{ж}} \cdot C \cdot \frac{dt_{\text{ж}}}{d\tau}}{(t_{\text{ж}} - 78.9 \text{ }^{\circ}\text{C}) \cdot n \cdot m_{\text{CO}_2}}. \quad (3.12)$$

Для определения средней удельной поверхности частиц примем изменение объема одной гранулы линейным во времени, тогда при цилиндрической форме, её средняя масса $m_{\text{гран.ср.}}$, кг, будет равна:

$$m_{\text{гран.ср.}} = \frac{V_{\text{гран.нач.}}}{2} \cdot \rho_{\text{CO}_2} = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi d_{\text{нач}}^2}{4} \cdot l_{\text{ср.нач}} \right) \cdot \rho_{\text{CO}_2}, \quad (3.13)$$

где $V_{\text{гран.нач.}}$ – начальный объем одной гранулы, м^3 ; ρ_{CO_2} – плотность диоксида углерода, равна 1530 кг/м^3 ; $d_{\text{нач}}$ – начальный диаметр гранулы, м; $l_{\text{ср.нач}}$ – средняя начальная длина гранулы, м, можно принять равной $(3 \div 5) \cdot d_{\text{нач}}$.

Удельная поверхность частиц диоксида углерода $\underline{n}$, $\text{м}^2/\text{кг}$, определяется по выражению :

$$n = \frac{S_{\text{е.г.}}}{m_{\text{гран.ср.}}} = \frac{\left(2 \cdot \left(\frac{\pi d^2}{4} \right) + \pi \cdot d \cdot l \right)}{m_{\text{гран.ср.}}}. \quad (3.14)$$

Если принять, что тепловой поток по торцам цилиндрической гранулы гораздо меньше, чем поток через боковую поверхность, то длину гранулы можно принять постоянной величиной во времени. В этом случае среднее значение диаметра гранулы в процессе теплообмена будет равно $0.707 \cdot d_{\text{нач}}$.

Введём обозначение:

$$\hat{\alpha} = \alpha \cdot n, \quad (3.15)$$

Где $\hat{\alpha}$ – «массовый» коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C})$.

Тогда уравнение (3.12) примет вид:

$$\hat{\alpha} = \frac{m_{\text{ж}} \cdot C \cdot \frac{dt_{\text{ж}}}{d\tau}}{(t_{\text{ж}} - 78.5 \text{ }^{\circ}\text{C}) \cdot m_{\text{CO}_2}}. \quad (3.16)$$

Данный коэффициент является более удобным для практического применения, так как позволяет без дополнительных вычислений определить тепловой поток от жидкости к известной массе диоксида углерода, находящейся в данный момент в ёмкости.

3.3 Экспериментальные установки и проведение исследований

Экспериментальные исследования проводились в лаборатории кафедры «Строительства подземных сооружений и горных предприятий» Горного института НИТУ «МИСиС».

Экспериментальная установка для исследования процесса теплопередачи от твердого диоксида углерода к замораживающей колонке показана на рисунках 3.1 и 3.2. Установка представляла собой две концентрические трубы. Первая труба выполнена из пластика ПВХ диаметром 160 мм и толщиной стенки 3.6 мм, вторая труба из стали диаметром 102 мм и толщиной стенки 1 мм. Кольцевой зазор между ними заполнен мелкодисперсным цементно-песчаным раствором, со следующими физическими свойствами: плотность – 1650 кг/м^3 ; теплоёмкость – 730 Дж/кг ; теплопроводность – $0.92 \text{ Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$. Внешняя труба по всей поверхности покрыта слоем теплоизоляционного материала толщиной 30 мм.

По длине трубы, в трех горизонтальных сечениях установлены термодатчики – хромель-алюмелевые термопары с диаметром спая 1 мм. В каждом сечении установлено по три термодатчика на различном расстоянии от оси, что позволяло по результатам измерений определить температурное поле в заполнителе межтрубного пространства. В каждом сечении один датчик располагался непосредственно на внешней поверхности стальной трубы, второй в центре межтрубного пространства, а третий на внутренней поверхности трубы из ПВХ. Датчики располагаются с углом 120° друг от друга.

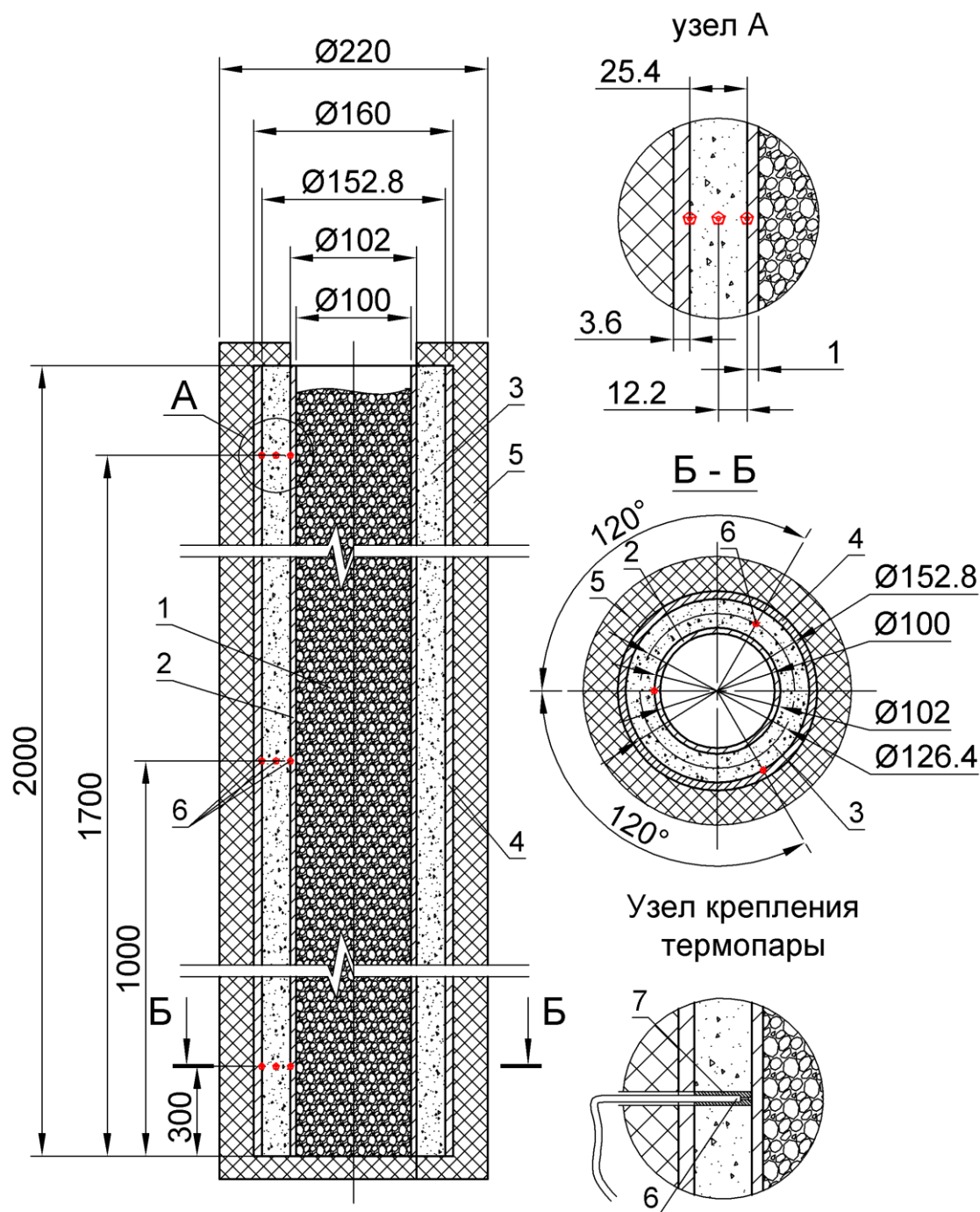


Рисунок 3.1 – Экспериментальная установка для исследования теплопередачи в замораживающей колонке: 1 – твердый диоксид углерода; 2 – стальная труба 200x102x1; 3 – межтрубный заполнитель (цементно-песчаный раствор); 4 – ПВХ труба 2000x160x3.6; 5 – слой теплоизоляционного материала 30мм; 6 – хромель-алюмелевая термопара; 7 – отверстие для термопары

а)



б)



в)



г)

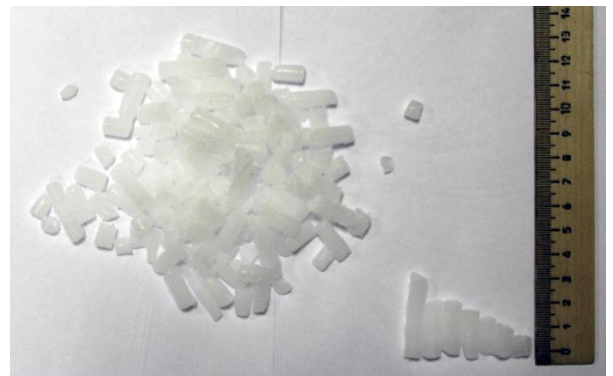


Рисунок 3.2 – Экспериментальный стенд: а) – общий вид экспериментальной установки; б) – экспериментальная установка, вид сверху; в) – пригруз массой 11.5 кг; г) – исследуемый гранулированный диоксид углерода

В качестве вторичного преобразователя сигналов с термопар выступали пять двухканальных электронных термометров с дискретностью измерений $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ и заявленной точностью не менее 0.5% .

Фиксация температуры производилась непосредственно с цифровых индикаторов термометров. Полученные значения табулировались с переменным шагом по времени: от 10 с в начальные моменты времени до 60 с к моменту окончания экспериментов. Продолжительность экспериментов составляла от 20 до 35 минут.

Экспериментальные исследования проводились в следующей последовательности.

Перед началом опыта измерялась температура межтрубного заполнителя, соответствующая температуре окружающей среды. При помощи специальной воронки в колонку загружался гранулированный диоксид углерода. После чего на него устанавливался специальный пригруз. После понижения уровня диоксида углерода на 10 см пригруз снимался, замораживающая колонка вновь заполнялась диоксидом углерода до её верха, после чего пригруз вновь устанавливался. Проведение эксперимента завершалось, когда изменение температуры становилось менее чем $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$.

Измерения температуры начинались после завершения загрузки твёрдого диоксида в замораживающую колонку. Измерения уровня диоксида углерода производилось с помощью линейки через равный промежуток времени.

В опытах без пригруза в промежутках времени между загрузками колонка закрывалась негерметичной пробкой из теплоизоляционного материала.

В процессе эксперимента фиксировались: температура в точках установки термодатчиков, расход твердого диоксида углерода, частота загрузки и уровень диоксида углерода в замораживающей колонке.

Экспериментальные исследования по определению коэффициента теплоотдачи от твердого диоксида углерода к жидкости производились на экспериментальной установке, показанной на рисунке 3.3.

Изотермическая емкость устанавливалась на электронные весы. Емкость заполнялась исследуемой жидкостью. В емкость помещались три термодатчика на равном расстоянии друг от друга. После этого в жидкость помещалось заданное количество диоксида углерода. В результате сублимации происходило охлаждение жидкости. Фиксировалось изменение температуры внутри емкости и изменение массы всей системы.

После сублимации некоторого количества диоксида углерода (не больше 5–10 г) в емкость помещалось некоторое количество диоксида углерода, таким образом, чтобы количество диоксида углерода в ней оставалось практически постоянным.

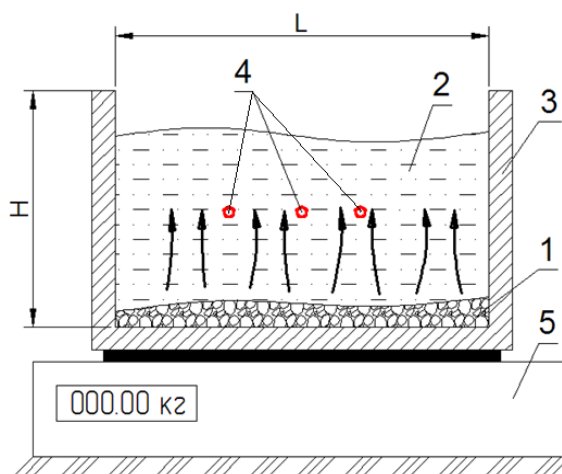


Рисунок 3.3 – Схема экспериментальной установки для определения теплового потока от жидкости к сублимирующему в ней твердому диоксиду углерода: 1 – твердый диоксид углерода; 2 – жидкость; 3 – изотермическая емкость; 4 – термодатчики; 5 – весы

3.4 Результаты и анализ экспериментальных данных

3.4.1 Анализ процесса теплопередачи при замораживании грунтов одиночной колонкой

В результате проведения 12 экспериментов по изучению теплопередачи от твердого диоксида углерода к стенке одиночной замораживающей колонки было

получено большое количество исходных данных в виде графиков изменения температуры в различных точках и данных о расходе твердого диоксида углерода.

Продолжительность экспериментальных исследований составляла от 20 до 30 минут в зависимости от массы пригруз.

В каждом из трех опытов производилось четыре эксперимента с одинаковыми начальными условиями. Результаты для двух экспериментов из четырех – с максимальными и минимальными значениями температуры, представлены на графиках рисунка 3.4.

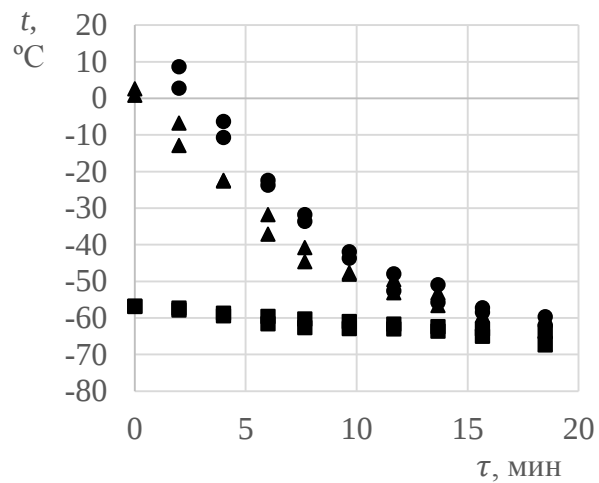
Как видно из графиков, максимальные и минимальные значения температуры, полученные в опытах, достаточно близки. Их отклонения от средних величин не превышало 2 °С. Таким образом, для дальнейших вычислений использовались средние арифметические значения температур по четырем экспериментам.

Температура стенки колонки в течение проведения опытов почти сразу после начала загрузки снижалась до минус 60 °С и менее, и далее понижалась до минус 70–72 °С к моменту завершения экспериментов, что согласуется с данными экспериментальных исследований представленных в работе [68]. Температура в центре межтрубного пространства и на поверхности пластиковой трубы изменялись в процессе экспериментов от начальной температуры (плюс 20 °С) до минус 50–60 °С.

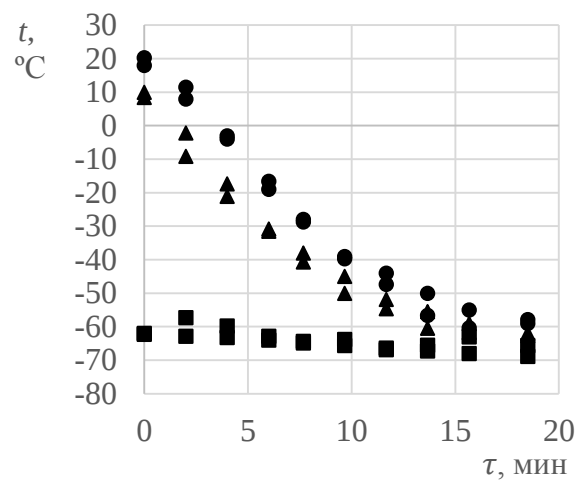
Расчет теплового потока к различным сечениям замораживающей колонки выполнялся по зависимости (3.1). Полученные результаты представлены на графиках рисунка 3.5 в виде зависимостей изменения теплового потока по длине экспериментальной установки в различные моменты времени.

Как видно из представленных графиков, тепловой поток к замораживающей колонке изменялся в процессе опытов в диапазоне от 5000 Вт/м² до 500 Вт/м². Это соответствует значениям, наблюдаемым при замораживании грунтов. При этом с уменьшением массы пригруза и увеличением высоты сечения относительно основания колонки наблюдаемый тепловой поток снижался.

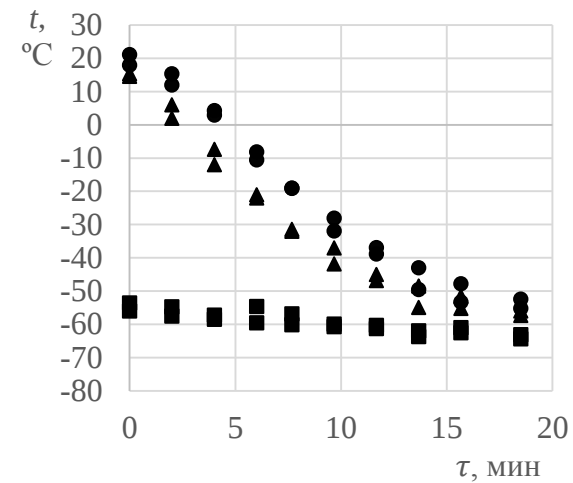
Опыт 1. Высота 300мм.



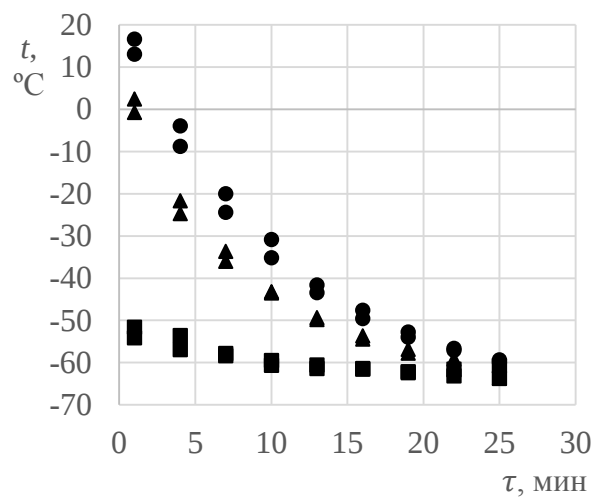
Опыт 1. Высота 1000мм.



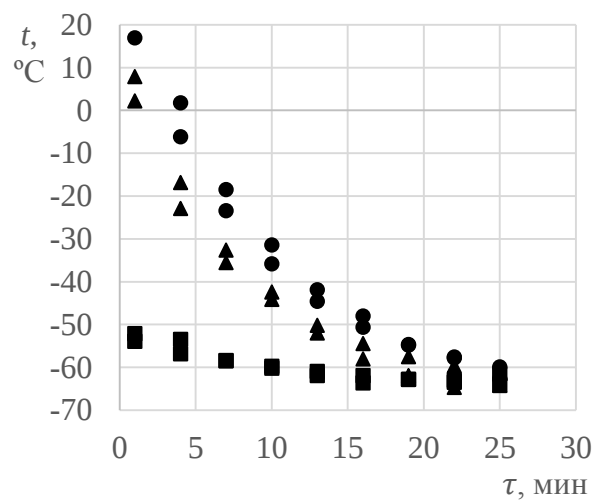
Опыт 1. Высота 1700мм.



Опыт 2. Высота 300мм.



Опыт 2. Высота 1000мм.



Опыт 2. Высота 1700мм.

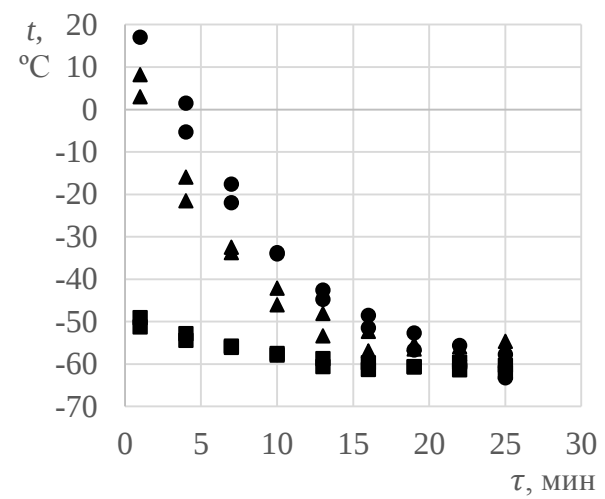


Рисунок 3.4 (часть 1)

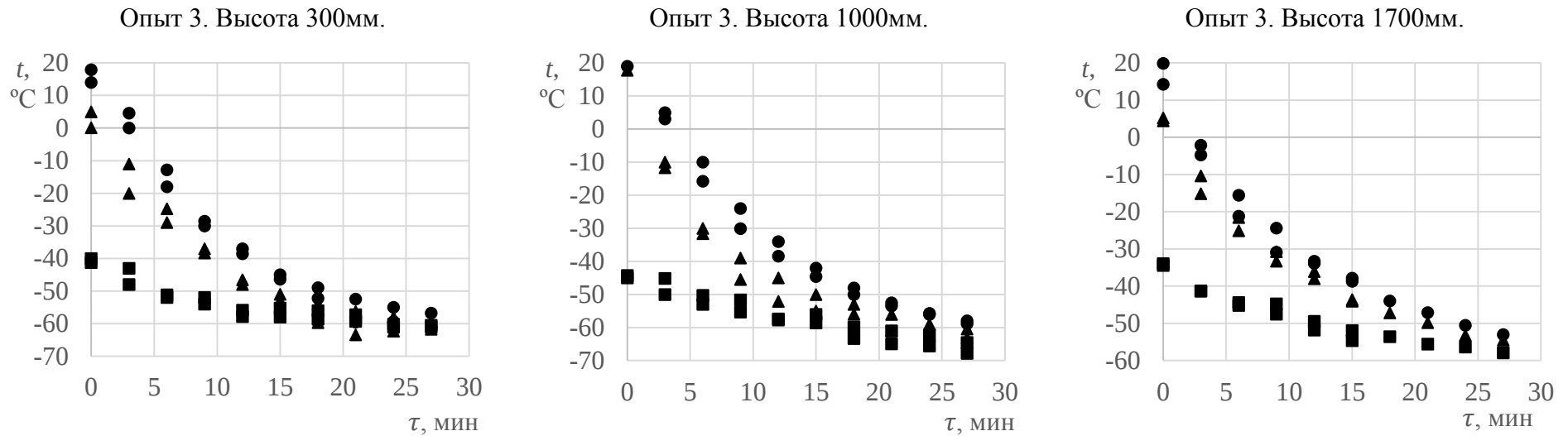
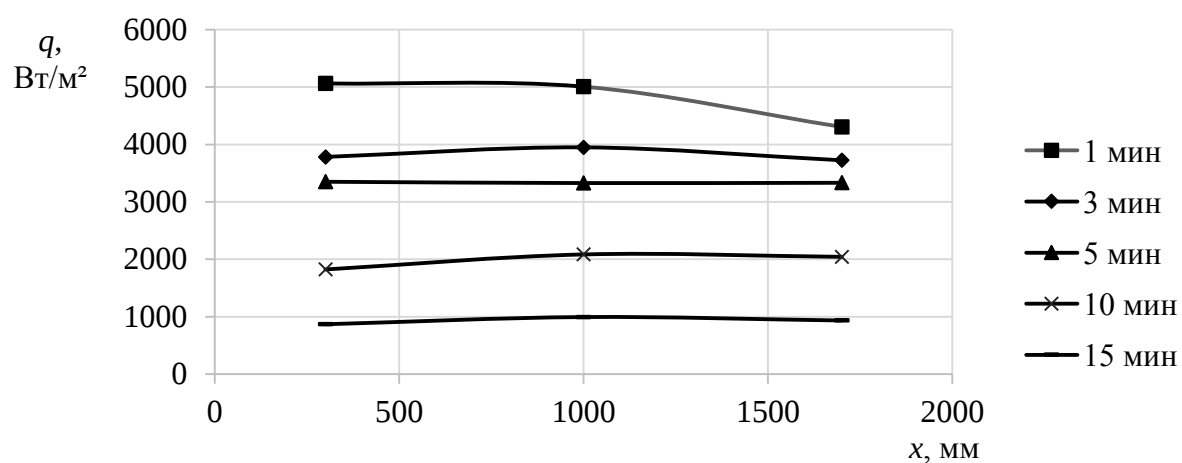
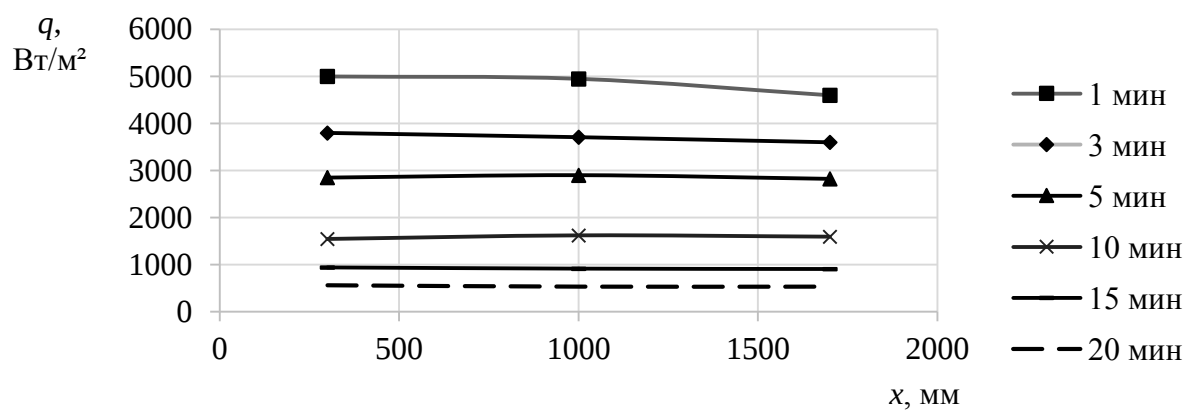


Рисунок 3.4 (часть 2) – Изменение температуры в исследуемой точке t , в зависимости от времени τ . Точки, обозначенные квадратами – температура на поверхности металлической трубы; треугольниками – в центре межтрубного пространства; кругами – на границе с трубой из ПВХ

Опыт 1:



Опыт 2:



Опыт 3:

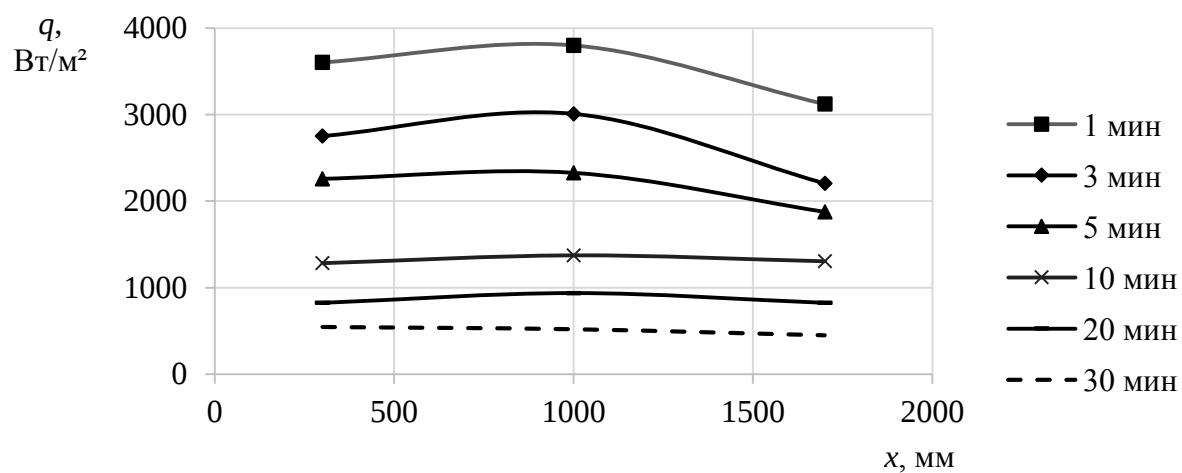


Рисунок 3.5 – Изменение теплового потока q в зависимости от глубины x для разных моментов времени

По данным экспериментальных исследований используя формулу (3.2) были определены значения коэффициента теплоотдачи в зависимости от глубины замораживания. Полученные значения представлены на рисунке 3.6.

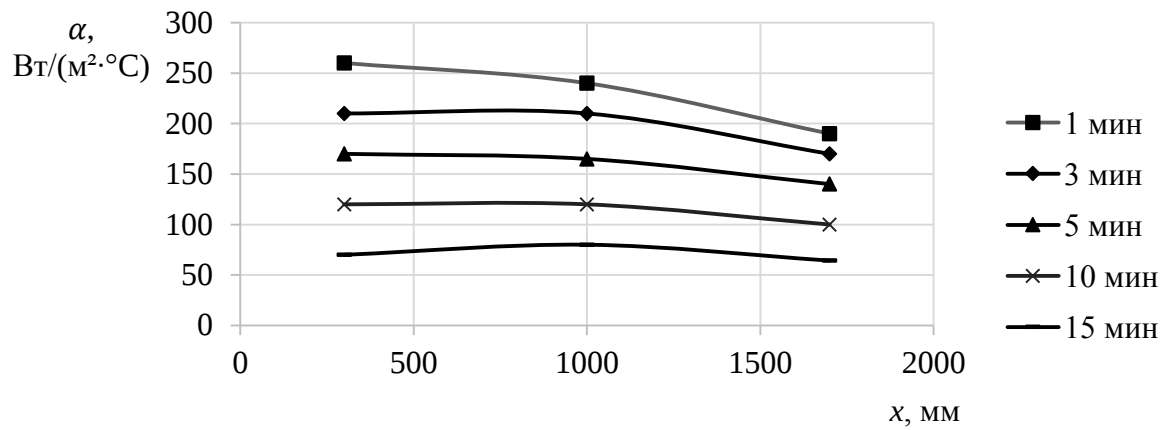
Как и в случае с тепловым потоком с уменьшением нагрузки, действующей на диоксид углерода в исследуемом сечении, коэффициент теплоотдачи уменьшается. Наиболее сильно данное изменение проявлялось в опытах 2 и 3, в то время как коэффициент теплоотдачи в опыте 1 значительно изменялся только при больших тепловых потоках в начальный момент замораживания. Это свидетельствует о том, что наблюдаемый процесс увеличения теплоотдачи происходит лишь до некоторого предела.

Теоретическое исследование, проведенное в главе 2, показало, что интенсивность теплоотдачи увеличивается из-за того, что структура гранул диоксида углерода в замораживающей колонки с увеличением нагрузки становится более плотной, поэтому площадь контакта гранул диоксида углерода со стенкой увеличивается. Как было показано ранее, прочность диоксида углерода достаточна для восприятия значительных давлений, таким образом, разрушение самих гранул не происходит. Однако учитывая то, что гранулы диоксида углерода засыпаются в колонку свободно и не утрамбовываются, очевидно, что их упаковка не является максимально плотной. Таким образом, именно на начальном участке происходит уплотнение структуры и в дальнейшем при достижении определенной глубины интенсивность теплоотдачи становится постоянной.

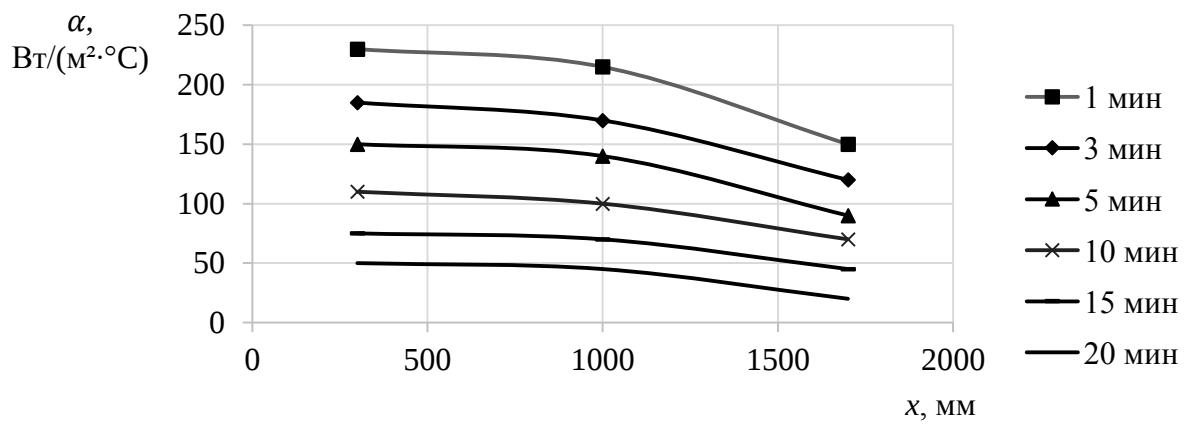
Для количественной оценки наблюдаемого явления был произведен перерасчет массы пригруза в единицы длины столба диоксида углерода. Таким образом, горизонтальное сечение на высоте 300 мм от основания в опыте 1 соответствует глубине 4.35 м, а в опыте 2 – глубине 3.2 м.

На рисунке 3.7 представлены зависимости величины коэффициента теплоотдачи от глубины замораживания. Экспериментальные точки выбраны в соответствии с действующим тепловым потоком.

Опыт 1:



Опыт 2:



Опыт 3:

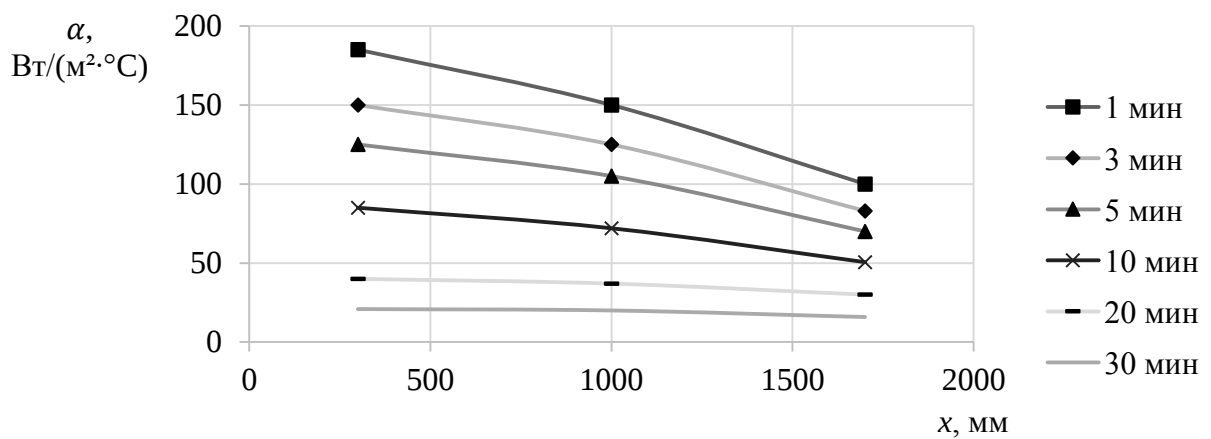


Рисунок 3.6 – Изменения коэффициента теплоотдачи α в зависимости от глубины x для разных моментов времени

Как видно из рисунка, величина коэффициента теплоотдачи наиболее резко возрастает на первых 2.5–3 м, и далее выполаживается, принимая вблизи 4 м практически независимое от глубины значение.

На основании полученных результатов можно прогнозировать, что на глубине более 5 метров значение коэффициента теплоотдачи от глубины зависеть не будет. Таким образом, в замораживающей колонке заполненной твердым диоксидом углерода существует начальный участок длиной 5 м на протяжении которого интенсивность теплоотдачи возрастает.

Анализ экспериментальных данных позволяет установить вид зависимости коэффициента теплоотдачи от величины теплового потока на глубине более 5м:

$$\alpha = 0.63 \cdot q_{\text{ст}}^{0.7} . \quad (3.17)$$

Принимая во внимания, что коэффициент теплоотдачи на глубине 5 м должен достигнуть постоянного значения, определяемого выражением (3.17), и предполагая, что при нулевой глубине коэффициент теплоотдачи равен нулю, произведём аппроксимацию полученных в эксперименте значений коэффициента теплоотдачи для промежуточных глубин эллиптической зависимостью. Выражение (3.17) примет вид (3.18).

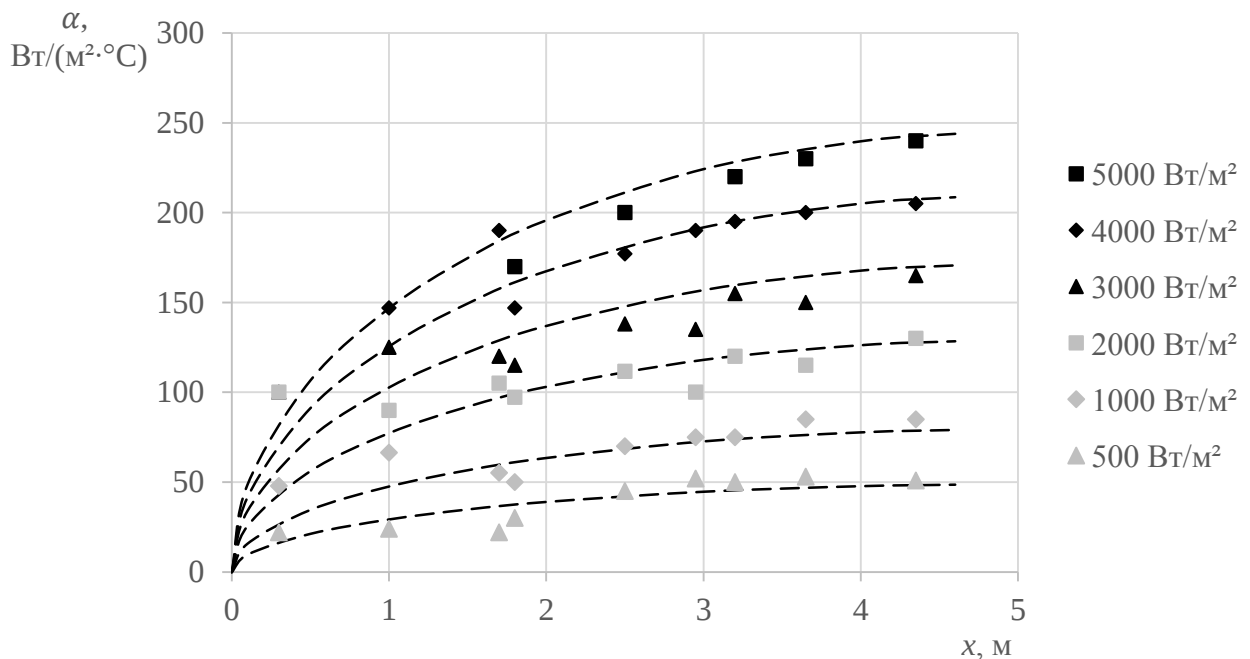


Рисунок 3.7 – Изменения коэффициента теплоотдачи α по глубине колонки x для различных значений теплового потока

$$\alpha = \begin{cases} 0.63 \cdot q_{\text{ст}}^{0.7} \cdot \sqrt{1 - 0.04(x - 5)^2}, & \text{при } x \leq 5 \\ 0.63 \cdot q_{\text{ст}}^{0.7} & , \text{при } x > 5 \end{cases}, \quad (3.18)$$

где x – глубина замораживания, м

Кривые аппроксимации, полученные по формуле (3.18), представлены на рисунке 3.7 пунктирными линиями. Как видно из графика, данная зависимость удовлетворительно описывает экспериментальные точки.

Вид зависимости (3.17) близок к виду зависимости (2.12), полученной в эксперименте [68]. Их сравнение представлено на рисунке 3.8. Зависимость (2.12) была получена без учета начального участка, однако, как отмечалось в описании данного эксперимента, при загрузке диоксида углерода производилось его механическое уплотнение. Таким образом, данная упаковка гранул в достаточной мере соответствует условиям, наблюдаемым в проведенном эксперименте с гранулированным твердым диоксидом углерода, на глубине более 5 м.

Формула (2.12) получена по результатам исследования дробленого диоксида углерода. Как видно из рисунке 3.8, теплоотдача при использовании гранулированного диоксида углерода менее интенсивна, что может свидетельствовать о том, что площадь контакта частиц со стенкой для дробленого диоксида углерода больше, чем для гранулированного.

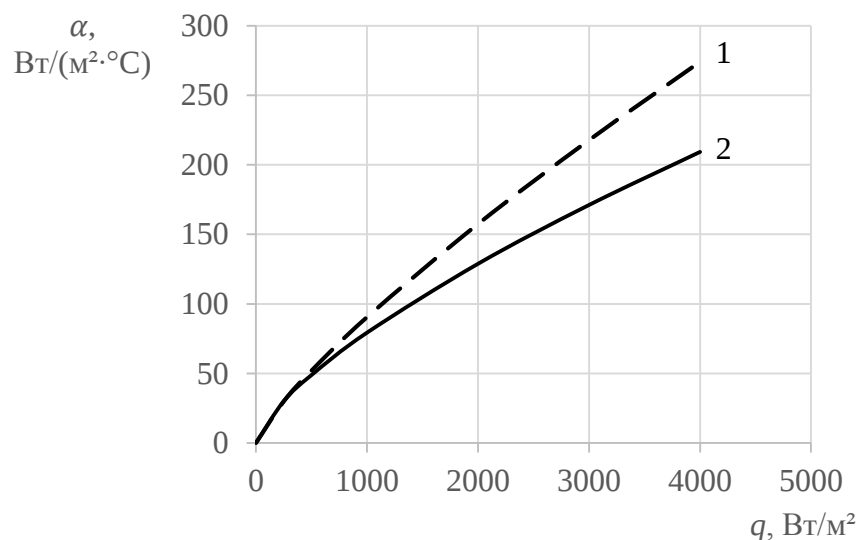


Рисунок 3.8 – Зависимость коэффициента теплоотдачи α от теплового потока q рассчитанная по формуле (3.17) – 1 и (2.12) – 2

Сравнение полученной из эксперимента зависимости (3.17) и полученной теоретически зависимости (2.14) показывает, что они являются близкими при величине теплового потока от 500 до 1500 Вт/м² и значении коэффициента n равного 0.93. Расхождение при больших значениях теплового потока может объясняться тем, что при величине теплового потока больше 1500 Вт/м² на контакте гранул со стенкой образуется значительный объем углекислого газа, приводящий к возникновению на площадках контакта термического сопротивления, которое не учитывалось зависимостью (2.14).

3.4.2 Анализ процесса теплообмена между твердым диоксидом углерода и хладоносителем при комбинированном способе замораживания

В результате проведения экспериментальных исследований по изучению процесса теплоотдачи от жидкости к гранулированному твердому диоксиду углерода получено большое количество экспериментальных данных в виде графиков зависимости температуры жидкости в емкости от времени по трём температурным датчикам. Анализ полученных данных производился на персональном компьютере с использованием программных комплексов MS Excel и STATISTICA.

Значения температуры в разных точках ёмкости, измеренные тремя датчиками, близки между собой. Их среднеарифметическое значение было принято как средняя температура в ёмкости в рассматриваемый момент времени.

Результаты опытов в виде графиков изменения средней температуры хладоносителя представлены на рисунке 3.9.

Вычисления коэффициента теплоотдачи выполнялось по зависимости (3.12). Величина удельной поверхности гранул твердого диоксида углерода, рассчитанная по (3.14), равна 2.1 м²/кг.

Результаты расчёта коэффициента теплоотдачи в зависимости от температуры хладоносителя представлены на рисунке 3.10.

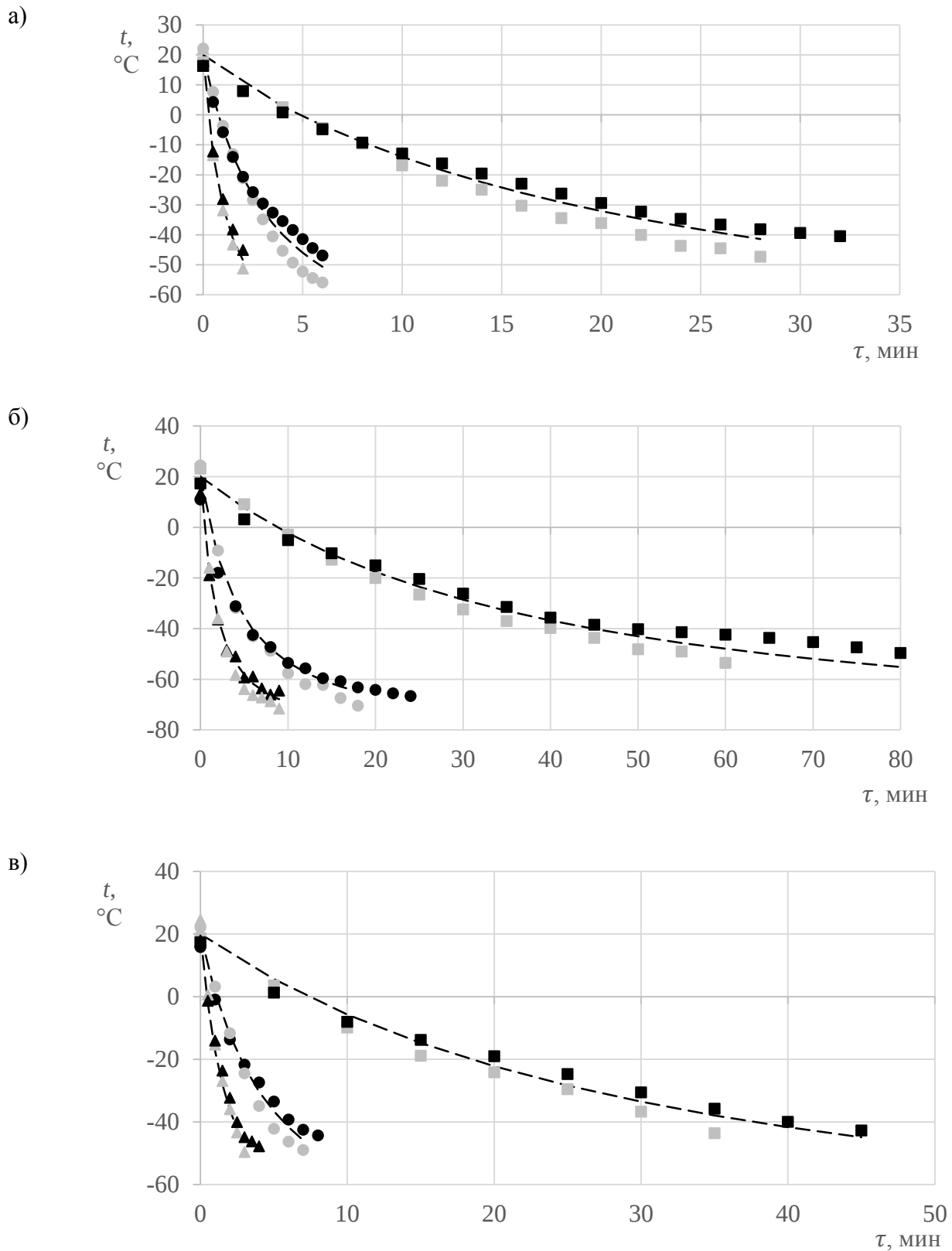


Рисунок 3.9 – Изменение средней температуры хладоносителя (*а* – водный раствор хлористого кальция, *б* – этиловый спирт, *в* – водный раствор этиленгликоля) при массовой концентрации в ней 2 % (квадраты), 6 % (круги) и 10 % (треугольники) твердого диоксида углерода

Экспериментальные точки на рисунке 3.10 являются усреднёнными по времени на интервалах от 30 до 120 с. Разброс точек является значительным, и составляет до 50% от среднего за весь исследуемый интервал времени. Однако качественно можно выделить следующие закономерности: коэффициент теплоотдачи возрастает прямо пропорционально концентрации диоксида углерода в испарителе; с уменьшением температуры хладоносителя в испарителе от 20 °С до температуры его кристаллизации коэффициент теплоотдачи уменьшается до 50%; в зависимости от типа используемого хладоносителя, значения коэффициента теплоотдачи при одинаковой температуре могут отличаться на 30 % и более.

Приняв, что основным механизмом передачи тепла от жидкости к твердому диоксиду углерода является вынужденная конвекция, зависимость изменения коэффициента теплоотдачи может быть описана критериальным уравнением вида:

$$Nu = c \cdot Re^n \cdot Pr^m. \quad (3.19)$$

За определяющий размер при нахождении чисел Нуссельта и Рейнольдса примем средний диаметр цилиндрических гранул диоксида углерода.

Критерий Рейнольдса зависит от скорости движения среды. В рассматриваемом процессе характер движения газо-жидкостной смеси не может быть определен точно. Он зависит от большого количества факторов, которые непрерывно изменяются в объеме емкости.

За определяющую скорость целесообразно принять среднюю скорость отвода газа из ёмкости, поскольку данный параметр в наибольшей степени характеризует интенсивность перемешивания жидкости в ёмкости.

Количество газа V_{CO_2} , м³/с, образуемое в единицу времени, определяется выражением:

$$V_{CO_2} = \frac{Q}{r \cdot \rho_r} = \frac{\alpha \cdot \Delta T \cdot m \cdot n}{r \cdot \rho_r}. \quad (3.20)$$

Средняя скорость отвода газа из ёмкости ω , м/с, будет равна отношению объема выделяемого газа в единицу времени V_{CO_2} к площади её поперечного сечения F , м²:

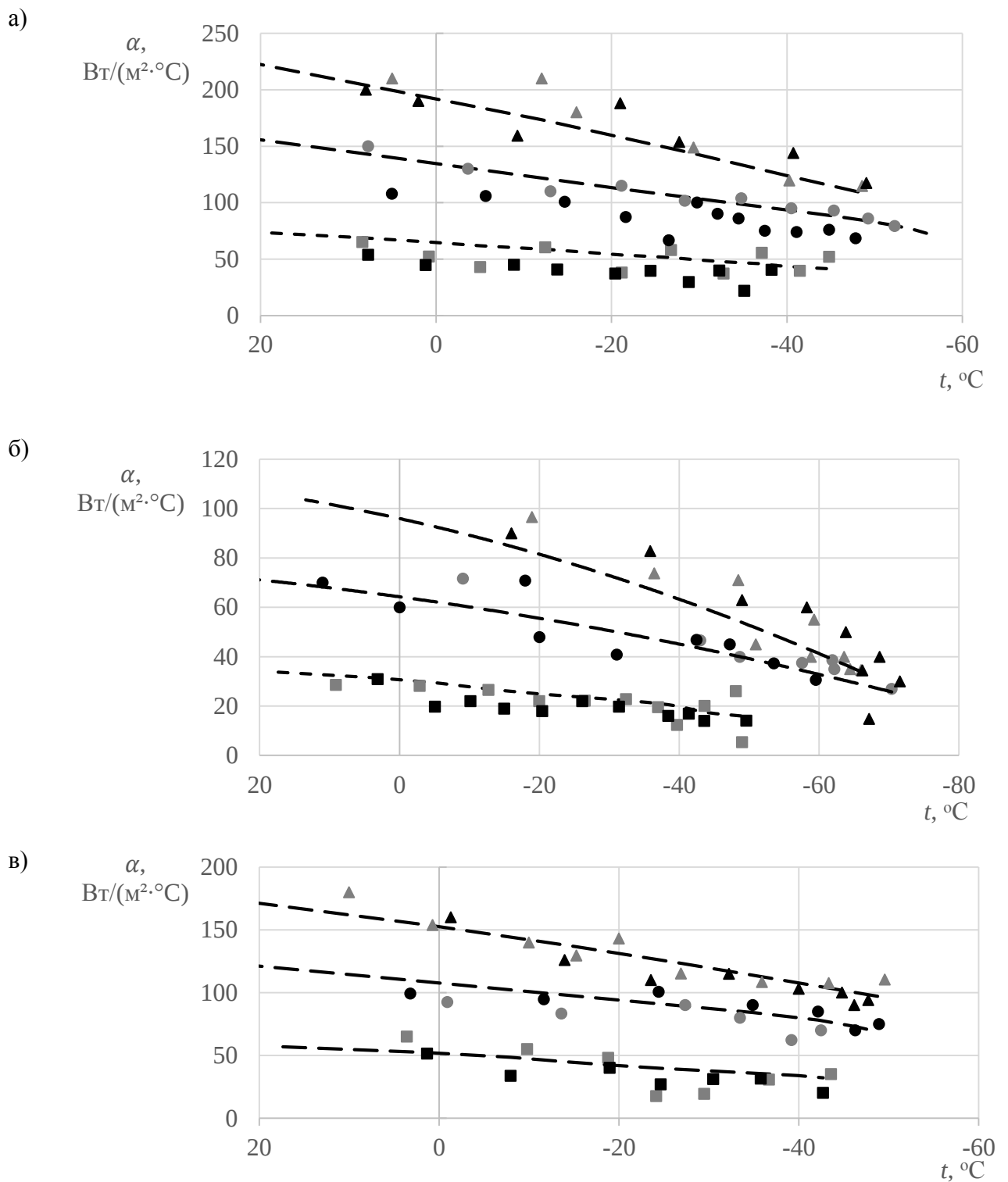


Рисунок 3.10 – Значения коэффициента теплоотдачи α от твердого диоксида углерода к хладоносителю (a – водный раствор хлористого кальция, b – этиловый спирт, v – водный раствор этиленгликоля) при массовой концентрации диоксида углерода 2 % (квадраты), 6 % (круги) и 10 % (треугольники) в зависимости от температуры жидкости t

$$\omega = V_{\text{CO}_2}/F. \quad (3.21)$$

Значение коэффициента теплоотдачи, необходимое для расчёта теплового потока в формуле (3.20), может быть рассчитано аналитически по формуле (2.37).

После статистической обработки экспериментальных данных была получена следующая зависимость:

$$Nu = 0.4 \cdot (Re \cdot Pr)^{0.7} = 0.4 \cdot Pe^{0.7}, \quad (3.22)$$

где $Nu = \alpha \cdot d/\lambda$ – число Нуссельта; $Pe = C_p \cdot \gamma \cdot w \cdot d/\lambda$ – число Пекле.

Подставив в (3.22) значения чисел подобия, были получены значения коэффициента теплоотдачи, которые представлены для исследуемых в лабораторном опыте случаев на рисунке 3.10 пунктирными линиями. Результаты экспериментальных исследований представлены в работе [71].

Сравнение расчетных значений и данных экспериментов показывает, что при малых концентрациях диоксида углерода в ёмкости значения, полученные в эксперименте, до 50% меньше расчетных. Для концентраций в 6% и 10% результаты являются более точными, чем при концентрации в 2%, отклонение экспериментальных точек от расчетных значений не превышает 15–20 %.

Полученное критериальное уравнение отражает влияние теплофизических свойств жидкости на процесс теплоотдачи. Точность расчёта по определению коэффициента теплоотдачи для различных жидкостей близка. Таким образом, из зависимости (3.22) могут быть получены выражения для определения коэффициента теплоотдачи для различных жидкостей.

3.5 Исследования процесса замораживания грунтов с использованием математических моделей

3.5.1 Постановка задачи. Обоснование способа математического моделирования

При исследовании и проектировании процесса искусственного замораживания грунтов большое значение имеет математическое моделирование

процесса. С развитием вычислительной техники и методов расчета появились программные комплексы для моделирования различных физических процессов путем численного решения систем дифференциальных уравнений в частных производных различными методами. Большое развитие получили комплексы, выполняющие расчет методом конечных элементов.

Программный комплекс COMSOL Multiphysics является мощным средством численного моделирования различных физических процессов методом конечных элементов. Применительно к задачам искусственного замораживания грунтов он позволяет решать задачи теплопроводности, конвекции, осложнённые фазовым переходом при различных граничных условиях.

Данный программный комплекс нашёл широкое применение при моделировании теплопереноса в массиве грунта. Он использовался в работах [18, 74, 76, 81, 90, 100 и др.] для моделирования термодинамических процессов при искусственном замораживании грунтов и показал свою точность и эффективность.

При отсутствии фильтрации грунтовых вод процесс искусственного замораживания грунтов представляет собой процесс нестационарной теплопроводности в массиве грунта. Усреднив по объёму свойства многокомпонентной среды, которой является влажный грунт, можно рассматривать протекание процесса в однородной среде.

При моделировании процесса теплопроводности в однородной среде с фазовым переходом в программном комплексе COMSOL Multiphysics решается система нестационарных дифференциальных уравнений (3.23).

$$\begin{aligned} \rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \rho \cdot C_p \cdot \mathbf{u} \cdot \nabla T &= \nabla(k \cdot \nabla T) + Q, \\ \rho &= \theta \cdot \rho_{phase1} + (1 - \theta) \cdot \rho_{phase2}, \\ C_p &= \frac{1}{\rho} \left(\theta \cdot \rho_{phase1} \cdot C_{p_{phase1}} + (1 - \theta) \cdot \rho_{phase2} \cdot C_{p_{phase2}} \right) + L \frac{\partial a_m}{\partial T}, \\ k &= \theta \cdot k_{phase1} + (1 - \theta) \cdot k_{phase2}, \\ a_m &= \frac{1}{2} \cdot \frac{(1 - \theta) \cdot \rho_{phase2} - \theta \cdot \rho_{phase1}}{\theta \cdot \rho_{phase1} + (1 - \theta) \cdot \rho_{phase2}}, \end{aligned} \quad (3.23)$$

где ρ – плотность, кг/м³; C_p – теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(кг·°C); T – температура, °C; t – время, с; $\mathbf{u}$ – вектор скорости движения среды, м/с, в исследуемой задаче равен нулю; k – теплопроводность среды, Вт/(м·°C); Q – теплоприток от различных внутренних источников теплоты, Вт; θ – соотношение объемов разных фаз при данной температуре; a_m – массовое соотношение между фазами; L – скрытая теплота фазового перехода, Дж/кг; индексы *phase1* и *phase2* показывают к какой фазе относятся свойства: к мерзлому грунту или талому, соответственно.

Система (3.23) дополняется зависимостями физических свойств моделируемого твердого тела как функций от фазового состояния в данной точке при данной температуре.

Задача может решаться в различной постановке: в одномерной, двумерной и трехмерной. Интегрирование производится по четырем переменным: трем координатам и времени. Определяемым параметром является температура в каждом узле конечно-элементной сетки моделируемого объема.

После создания геометрической модели исследуемого массива в модель вносятся необходимые для решения физические свойства грунта в талом и мерзлом состоянии. Задаётся начальная температура.

Процессу замораживания грунтов соответствуют различные граничные условия, задаваемые на поверхности стенки замораживающей колонки. Задание в качестве граничных условий коэффициента теплоотдачи дополняет систему (3.23) уравнением:

$$-\mathbf{n} \cdot (-k\nabla T) = \alpha \cdot (T_{ext} - T), \quad (3.24)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°C); T_{ext} – температура среды в непосредственной близости от данной точки поверхности, °C; T – температура поверхности в данной точке, °C; $\mathbf{n}$ – вектор, направленный по нормали от поверхности стенки колонки.

Для доказательства возможности применения программного комплекса для моделирования процесса замораживания грунтов колонками, заполненными

твердым диоксидом углерода, было выполнено моделирование лабораторных опытов, выполненных в данной работе, результаты которых представлены в разделе 3.4.

Геометрические размеры моделируемого массива и его физические свойства соответствовали исследуемым в лабораторных экспериментах (см. рисунок 3.1). Размер треугольного конечного элемента составлял 1 мм.

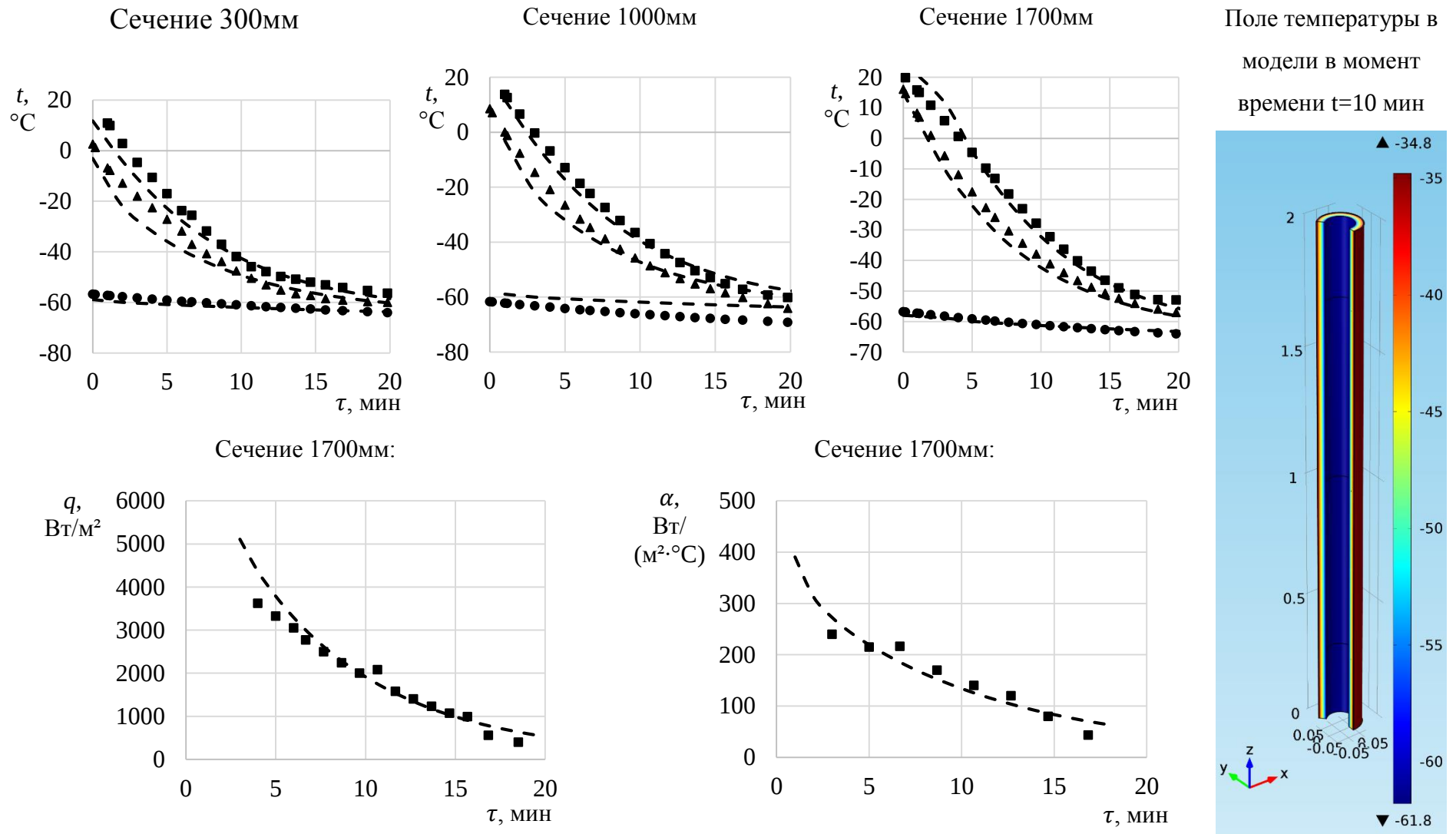
На внутренней поверхности замораживающей колонки задавался коэффициент теплоотдачи. Температура внутри колонки была принята равной минус 78.9 °С. Коэффициент теплоотдачи задавался в соответствии с зависимостью (3.18). Некоторые результаты моделирования опыта с пригрузом массой 12.5кг представлены на графиках рисунка 3.11.

Анализ полученных результатов показывает, что динамика изменения температурного поля, теплового потока и коэффициента теплоотдачи в исследуемой математической модели близка к наблюдаемой в экспериментальном исследовании.

Некоторое расхождение в величине теплового потока наблюдается в первые минуты моделируемого промежутка времени. Оно может быть вызвано неточностями в измерении температуры в эксперименте из-за инертности измерительного лабораторного оборудования в условиях значительных тепловых потоков.

В диапазоне от 500 до 4000 Вт/м² достигается удовлетворительное совпадение результатов, следовательно рассматриваемый метод математического моделирования позволяет моделировать процесс формирования ледогрунтового ограждения при замораживании грунтов твердым диоксидом углерода.

Для проверки достоверности экспериментальных данных и оценки возможностей рассматриваемого метода моделирования было проведено моделирование опытов по замораживанию песчаного грунта одиночной замораживающей колонкой длиной 1 м, заполненной дробленым диоксидом углерода, выполненных в работе [68] и изложенных в разделе 1.2.



При моделировании этой задачи на внутренней поверхности замораживающей колонки был задан коэффициент теплоотдачи, величина которого определялась по зависимости (2.12). Температура внутри колонки принималась равной минус 78.9 °С. Физические свойства и геометрические размеры массива были приняты равными исследуемым в лабораторном эксперименте. Свойства грунта указаны в таблице 3.3.

Результаты математического моделирования и лабораторных экспериментов представлены на рисунке 3.12.

Как видно из рисунка, полученные в результате математического моделирования зависимости хорошо повторяют полученные в результате лабораторных экспериментов. Наблюдаемые отклонения могут быть вызваны недостаточно точным определением физических свойств массива.

В работе автора [36] представлены результаты моделирования лабораторных экспериментов, выполненных в [68], по замораживанию грунтов группой замораживающих колонок, заполненных дробленым твердым диоксидом углерода. Моделирование показало удовлетворительное совпадение расчетных зависимостей с полученными в результате экспериментов.

Таблица 3.3 – Теплофизические свойства моделируемого массива

	Талое состояние	Мерзлое состояние
Температура внутри колонки, °С	-78.9	
Диаметр колонки, м	0.1; 0.219	
Плотность грунта, кг/м ³	2530	
Пористость грунта	0.34	
Теплопроводность грунта, Вт/(м·°С)	2	2.7
Теплоёмкость грунта, Дж/(кг·°С)	1760	1420
Усредненная скрытая теплота фазового перехода, кДж/кг	44.75	
Начальная температура, °С	10; 20	
Температура замерзания воды, °С	0	

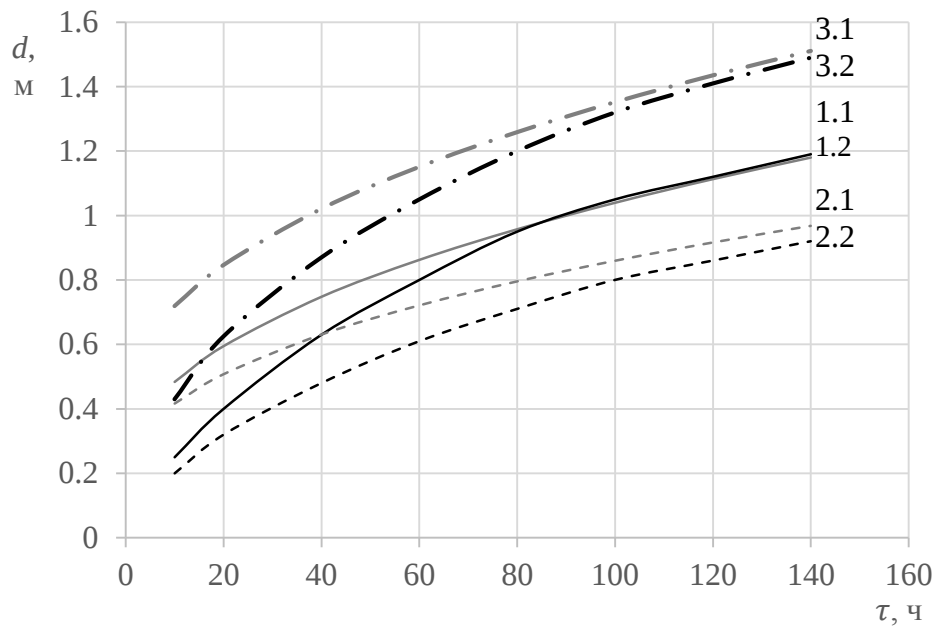


Рисунок 3.12 – Изменение диаметра ледогрунтового цилиндра d от времени замораживания τ , полученные по результатам математического моделирования (1.1, 1.2, 1.3) и лабораторного эксперимента (1.2, 2.2, 3.2): 1.1, 1.2 – диаметр колонки 0.1 м, начальная температура 10 °C; 2.1, 2.2 – диаметр колонки 0.1 м, начальная температура 20 °C; 3.1, 3.2 – диаметр колонки 0.2 м, начальная температура 10 °C

Сравнение зависимостей, полученных по результатам математического моделирования, с зависимостями, полученными по результатам экспериментальных исследований, показывает удовлетворительное их совпадение. Это доказывает возможность моделирования процесса замораживания грунтов колонками, заполненными твердым диоксидом углерода, в программном комплексе COMSOL Multiphysics.

3.5.2 Моделирование искусственного замораживания грунтов в подземном строительстве

По результатам математического моделирования процесса замораживания грунтов твердым диоксидом углерода возможно оценить динамику образования ледогрунтового ограждения в различных геологических условиях; определить

зависимости изменения температуры стенки колонки и теплового потока к ней в зависимости от глубины; определить диапазон изменения часового и удельного расхода твердого диоксида углерода в процессе роста ледогрунтового ограждения; оценить влияние расстояния между колонками на изменение параметров замораживания грунтов.

В работе было проведено моделирование процесса искусственного замораживания грунтов в условиях, характерных для городского подземного строительства. Было выполнено моделирование замораживания грунтов одиночной замораживающей колонкой и группой замораживающих колонок, заполненных твердым диоксидом углерода.

Анализ литературных источников [13, 56, 69] и геологических условий г. Москвы показывает, что в большинстве случаев замораживанию подвергаются песчаные и супесчаные грунты. На основании этого в работе произведено моделирование массива грунта сложенного песками, супесями и суглинками.

Количество воды, которое содержится в грунте, характеризуется его весовой влажностью. Для рассматриваемых грунтов, данный параметр изменяется в достаточно широких пределах от 5 до 20–25 % [9, 78, 82]. В работе рассмотрены два случая, когда весовая влажность составляла 10 и 20 %.

Количество воды в грунте определяет изменение теплосодержания грунта в процессе замораживания, так как величины плотности и теплоемкости исследуемых грунтов отличаются не более чем на 10–15 % [77, 94].

Принятые для моделирования теплофизические свойства массива грунта представлены в таблице 3.4.

Как было установлено по результатам лабораторного исследования, длина начального участка, с изменяющейся по высоте теплоотдачей, составляет 5 м, на основании этого для моделирования замораживания грунтов одиночной замораживающей колонкой её длина была принята равной 8 м и диаметр равным 0.156 м.

В работе выполнено моделирование процесса образования одиночного ледогрунтового цилиндра вокруг замораживающей колонки для двух различных

граничных условий на её стенке: при задании коэффициента теплоотдачи, описываемого зависимостью (3.18); и при постоянной температуре, равной минус 78.9 °С.

Результаты математического моделирования представлены на рисунке 3.13. Изменение отношения диаметра ледогрунтового цилиндра d , м, образуемого при задании на стенке колонки коэффициента теплоотдачи, к диаметру d_0 , м, образуемому при постоянной температуре стенки, в зависимости от глубины замораживания в момент времени 240 ч показано на графике 3.13а. На графике 3.13б показано изменение диаметра ледогрунтового цилиндра d_0 в процессе замораживания.

Таблица 3.4 – Исходные данные для моделирования процесса замораживания с использованием твердого диоксида углерода

	Номер условий		
	1	2	3
Тип грунта	Песок	Супесь	Суглинок
Объемный вес, кг/м ³	1800	1950	2100
Теплоемкость, Дж/(кг °С):			
- в талом состоянии	1580	1430	1370
- в мерзлом состоянии	1460	1320	1270
Теплопроводность, Вт/(м °С):			
- в талом состоянии	2	1.6	1.3
- в мерзлом состоянии	2.7	2.2	1.8
Скрытая теплота фазового перехода при весовой влажности, кДж/м ³ :			
- 10%	59940	64990	69900
- 20%	119880	129870	139860
Начальная температура грунта, °С	10		
Температура замерзания грунтовых вод, °С	0		

Как видно из графиков, диаметр ледогрунтового цилиндра d_0 на 10 сутки после начала замораживания достиг 1.5–2 м в зависимости от теплофизических свойств грунта. Это хорошо согласуется с данными полученными при опытно-промышленном внедрении, описанными в разделе 1.3. При учете коэффициента теплоотдачи в замораживающей колонке, диаметр ледогрунтового цилиндра, образуемого в процессе замораживания, был меньше на 5–15 %, по сравнению с колонкой с постоянной температурой стенки.

Анализ графиков показывает, что диаметр ледогрунтового цилиндра увеличивается с глубиной замораживания. При увеличении глубины от 0 до 5 м увеличение отношения d/d_0 составило до 10 %, что соответствует 15–20 см через 240 часов после начала замораживания. Величина d/d_0 не зависит от весовой влажности.

При различных физических свойствах массива, качественный характер изменения отношения d/d_0 сохраняется. Минимальная скорость образования ледогрунтового ограждения наблюдается в районе устья колонки, и далее она увеличивается до отметки 4–5 м где становится постоянной.

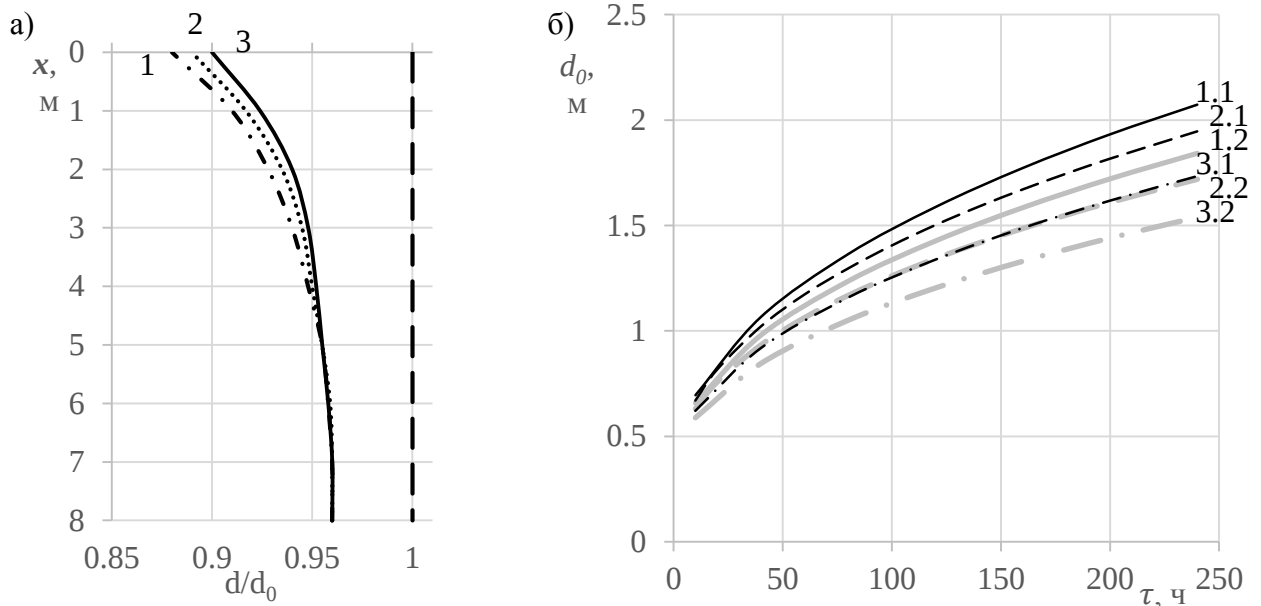


Рисунок 3.13 – Изменение отношения d/d_0 по глубине замораживания x в момент времени 240 ч (а) и изменение d_0 во времени τ (б): 1, 1.1, 1.2 – песок; 2, 2.1, 2.2 – супесь; 3, 3.1, 3.2 – суглинок. 1.1, 2.1, 3.1 – весовая влажность 10%, 1.2, 2.2, 3.2 – весовая влажность 20%

Проведенное моделирование замораживания грунтов одиночной замораживающей колонкой позволило установить изменение температуры стенки колонки $t_{ст}$, °С, в процессе замораживания на различной глубине. Для супеси график изменения $t_{ст}$ показан на рисунке 3.14. Для песка и суглинка закономерности изменения температуры стенки по глубине колонки близки.

Результаты моделирования показывают, что изменение температуры стенки колонки при глубине более 5 м не зависит от глубины. Из графика видно, что в процессе роста ледогрунтового цилиндра температура стенки колонки изменялась на 2 °С в течение первых суток замораживания, и в дальнейшем уменьшалась не более чем на 1 °С, достигая значений минус 72–73 °С на глубине более 5 м. Наибольшие изменения температуры в процессе замораживания происходили вблизи устья колонки. Изменение весовой влажности грунта не влияет на температуру стенки колонки в процессе замораживания грунтов.

Таким образом, изменения температуры стенки колонки в процессе замораживания грунтов являются незначительными, следовательно при проектировании процесса искусственного замораживания грунтов с использованием твёрдого диоксида углерода температуру стенки колонки можно принимать не зависящей от времени, и равной: минус 68–70 °С при глубине замораживания от 0 до 2 м, 70–72 °С при глубине от 2 до 4 м и 72–74 °С на большей глубине.

По результатам моделирования был построен график изменения теплового потока к 1 м² поверхности колонки q , Вт/м² в зависимости от диаметра ледогрунтового цилиндра d , м, который представлен на рисунке 3.15.

Как видно из графика, величина теплового потока к колонке лежит в диапазоне от 1500 до 2500 Вт/м² при диаметре ледогрунтового цилиндра 0.4 м, образуемом через 10 ч после начала замораживания. В процессе увеличения ледогрунтового цилиндра тепловой поток уменьшается до 500–1000 Вт/м² при диаметре 2 м. В зависимости от типа грунта величина теплового потока может отличаться до 50 %.

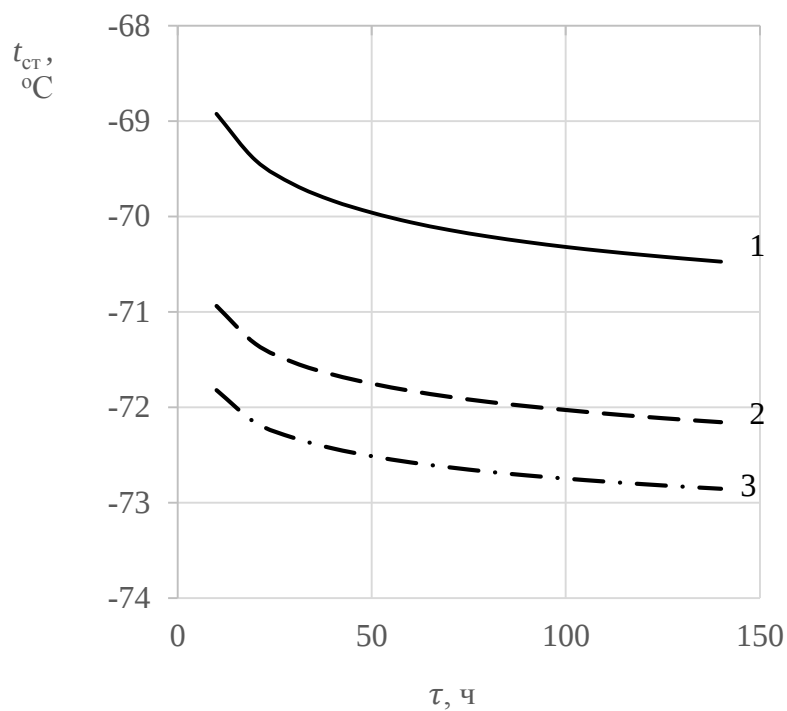


Рисунок 3.14 – Изменение температуры стенки колонки $t_{ст}$, в процессе замораживания: 1 – глубина 1 м, 2 – 3 м, 3 – 5 м

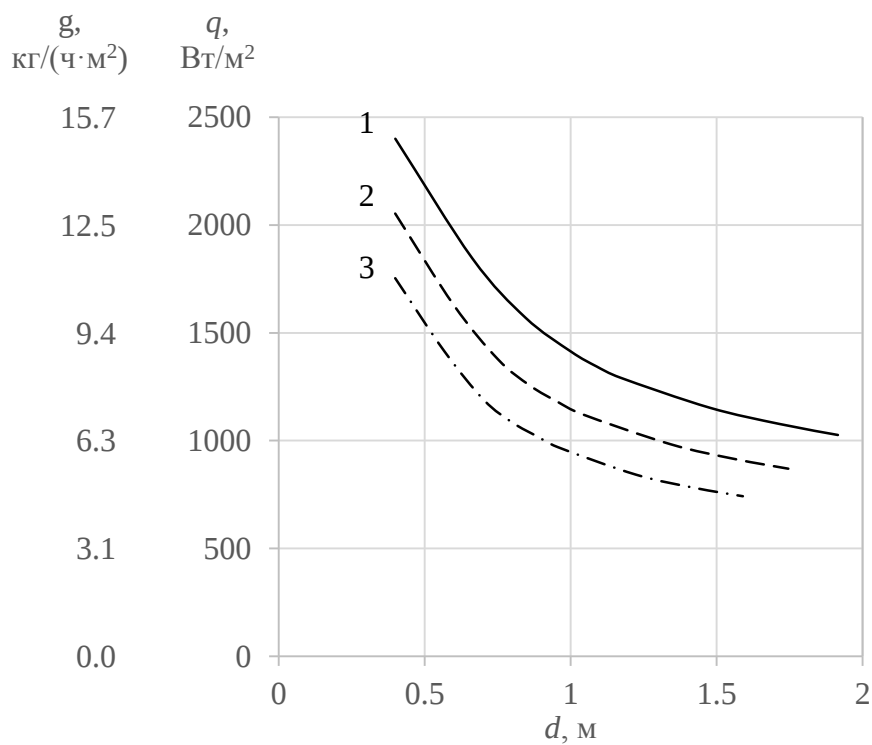


Рисунок 3.15 – Изменение теплового потока q и часового расхода твердого диоксида углерода g в зависимости от диаметра ледогрунтового цилиндра d : 1 – песок, 2 – супесь, 3 – суглинок

Анализ полученных данных показывает, что тепловой поток к колонке не зависит от весовой влажности грунта и его теплоемкости, а зависит только от теплопроводности замороженного грунта, что соответствует теоретической зависимости (2.10).

Расход твердого диоксида углерода g , кг/(ч·м²), равен отношению теплового потока к замораживающей колонке в единицу времени к величине скрытой теплоты сублимации. Таким образом, кривые, показанные на рисунке 3.15, могут быть представлены в виде зависимостей расхода диоксида углерода от диаметра ледогрунтового цилиндра.

Как видно из графика, часовой расход твердого диоксида углерода снижается с ростом ледогрунтового цилиндра от 10–16 кг/(м²·ч) в начальный период до 3–6 кг/(м²·ч) при толщине ограждения 1.5–2 м

Моделирование замораживания грунтов группой замораживающих колонок производилось в двумерной постановке задачи. Схема расчётной модели представлена на рисунке 3.16. Расположение колонок в данной модели было принято линейным. Для цилиндрических ограждений из-за незначительности толщины ограждения, не превышающей 1–2 м в городском подземном строительстве по сравнению с диаметром окружности расположения скважин, данная модель остается достаточно точной.

Высота исследуемой области H , м, принималась равной 8 м.

Коэффициент теплоотдачи на стенке замораживающей колонки находился по зависимости (3.17). На боковых гранях модели S задавались граничные условия в форме нулевого теплового потока. Теплофизические свойства грунта принимались по таблице 3.4. Диаметр замораживающих колонок d был принят равным 0.156 м. Расстояние между колонками l было принято равным 0.9, 1.1 и 1.3 м.

Выполненное моделирование позволило получить зависимости толщины ограждения E , м, от времени замораживания для различных расстояний между колонками. Данные зависимости для супеси с весовой влажностью 10 % представлены на рисунке 3.17. Зависимости для песков и суглинков качественно аналогичны.

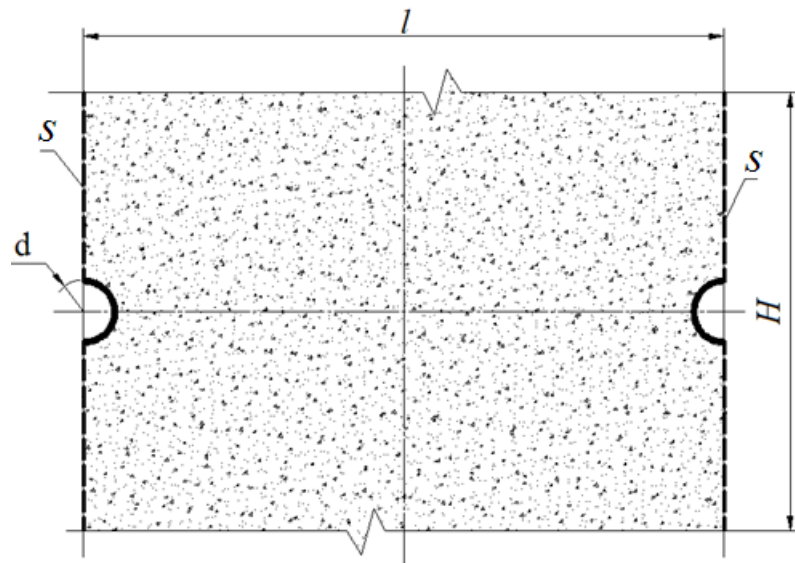


Рисунок 3.16 – Расчетная схема для моделирования замораживания грунтов группой колонок

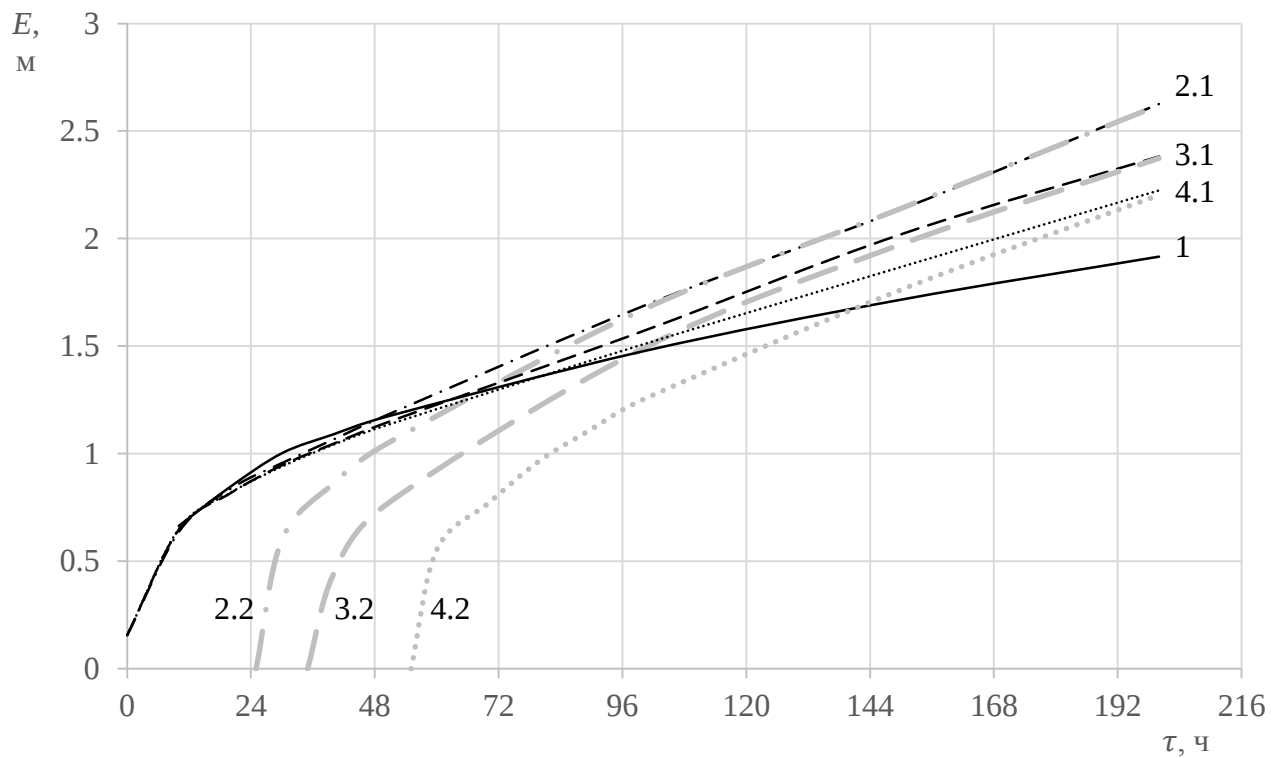


Рисунок 3.17 – Изменение толщины ледогрунтового ограждения E от времени τ для одиночной замораживающей колонки (1) и группы замораживающих колонок при l равном 0.9 м (2.1, 2.2), 1.1 м (3.1, 3.2) и 1.3 м (4.1, 4.2); 2.1, 3.1, 4.1 – толщина в главной плоскости, 2.2, 3.2, 4.2 – в замковой плоскости

Как видно из графика, до момента смыкания соседних ледогрунтовых цилиндров динамика их образования близка к динамике образования ограждения вокруг одиночной колонки. Соседние ледогрунтовые цилиндры сомкнулись через 25 ч после начала замораживания при расстоянии между колонками 0.9 м, через 35 ч при расстоянии 1.1 м, и через 54 ч при расстоянии 1.3 м.

После смыкания ледогрунтовых цилиндров скорость формирования ограждения в главной плоскости становится больше по сравнению со скоростью образования одиночного ледогрунтового цилиндра. На 8 сутки после начала замораживания толщина ограждения в главной плоскости составила 2.6 м при расстоянии между колонками 0.9 м. К тому же моменту времени диаметр одиночного ледогрунтового цилиндра достигает только 1.8 м.

Выравнивание фронта ледогрунтового ограждения происходит пропорционально времени смыкания соседних ледогрунтовых цилиндров. При расстоянии между колонками 0.9 м толщина ограждения в замковой плоскости стала близка толщине ограждения в главной плоскости через 70 ч после начала замораживания, при расстоянии 1.1 м – через 110 ч, при расстоянии 1.3 м – через 170 ч. Таким образом, с достаточной точностью время выравнивания фронта ледогрунтового ограждения $\tau_{вр}$, ч, может быть определено как: $\tau_{вр} = 3 \cdot \tau_{см}$, где $\tau_{см}$ – время смыкания соседних ледогрунтовых цилиндров, ч. Результаты моделирования показывают, что выравнивание фронта промерзания происходит при толщине ограждения в главной плоскости, равной $1.5 \cdot l$.

Как видно из графика, в промежуток времени между $\tau_{см}$ и $\tau_{вр}$ скорость формирования ледогрунтового ограждения в главной плоскости может быть, с достаточной для инженерных расчётов точностью, принята равной скорости образования ограждения вокруг одиночной замораживающей колонки.

Математическое моделирование позволяет оценить затраты тепла на образование ледогрунтового ограждения. На рисунке 3.18 представлен график зависимости суммарного теплопритока к замораживающей колонке $Q_{см}$, Дж, от толщины ограждения в замковой плоскости $E_{зм.п.}$, м, для супеси.

Как видно из рисунка, суммарный теплоприток к колонке, необходимый для образования ледогрунтового ограждения, возрастает с ростом расстояния между замораживающими колонками. Увеличение расстояния между колонками от 0.9 до 1.3 м приводит к тому, что количество тепла, необходимое для смыкания соседних ледогрунтовых цилиндров, увеличивается от 90 до 220 МДж.

Смыкание ледогрунтовых цилиндров после начала замораживания происходит за малый промежуток времени, равный 1–3 суток. Таким образом, количество тепла, затрачиваемое на охлаждение окружающего массива, мало по сравнению с затратами тепла на образование ледогрунтового ограждения. В этом случае можно утверждать, что расход тепла, необходимый для смыкания ледогрунтовых цилиндров, пропорционален объему замороженного грунта и не зависит от времени.

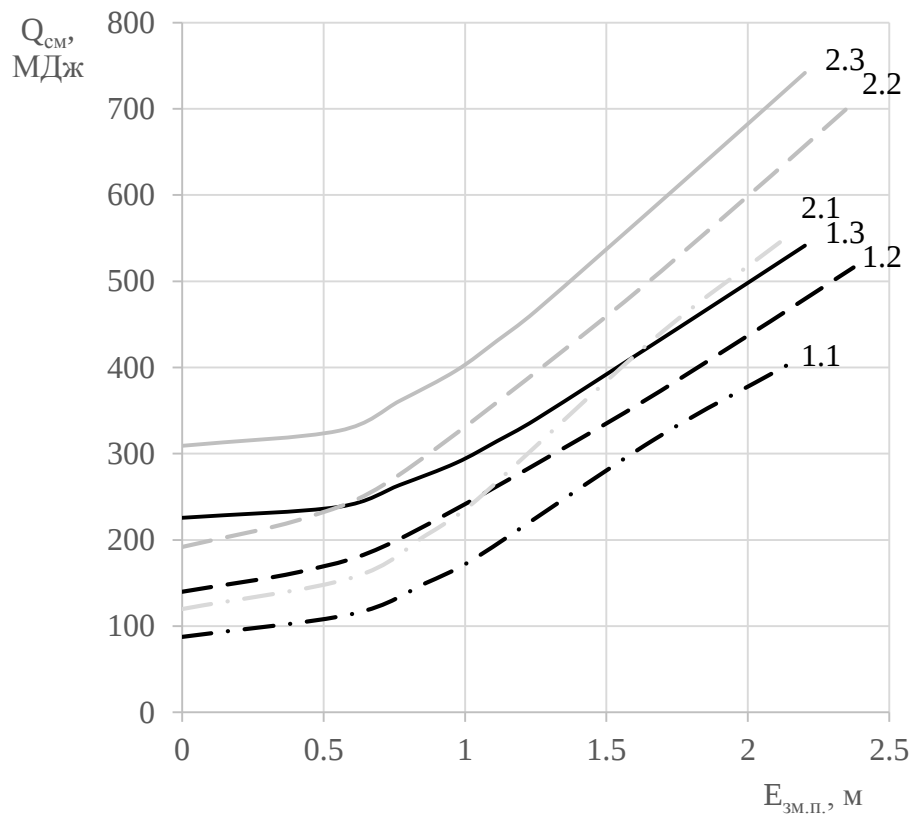


Рисунок 3.18 – Зависимость суммарного притока тепла к колонке $Q_{см}$ от толщины ограждения в замковой плоскости $E_{зм.п.}$: 1.1 и 2.1 – $l = 0.9$ м; 1.2 и 2.2 – $l = 1.1$ м; 1.3 и 2.3 – $l = 1.3$ м. 1.1, 1.2, 1.3 – весовая влажность 10 %, 2.1, 2.2, 2.3 – весовая влажность 20 %

После смыкания соседних ледогрунтовых цилиндров формирование ограждения в замковой плоскости происходит без значительного увеличения суммарного теплопритока к колонке до достижения ограждением толщины 0.5–0.8 м. Дальнейшее увеличение суммарного теплопритока к колонке происходит пропорционально увеличению толщины ледогрунтового ограждения в замковой плоскости, при этом разница между суммарными теплопритоками при различных расстояниях между колонками остаётся постоянной.

При увеличении массовой влажности грунта возрастание расхода тепла на образование ледогрунтового ограждения определяется величиной скрытой теплоты кристаллизации дополнительной воды в грунте.

Результаты определения величины $Q_{см}$ для других исследуемых грунтов (песков и суглинков) близки к значениям полученным для супесей. Это объясняется тем, что удельная теплоемкость и плотность исследуемых грунтов отличаются не значительно. Величина $Q_{см}$ для песков на 4–6 % меньше, чем для супесей, а для суглинков на 4–6 % больше.

Результаты моделирования позволяют оценить изменение удельного расхода твердого диоксида углерода на замораживание 1 м³ грунта G , кг/м³, в процессе формирования ледогрунтового ограждения. Удельный расход твердого диоксида углерода определяется отношением затрат тепла на замораживание 1 м³ грунта к скрытой теплоте сублимации твердого диоксида углерода.

Графики зависимости G от толщины ледогрунтового ограждения в замковой плоскости для супеси представлены на рисунке 3.19.

Анализ полученных зависимостей показывает, что расход твердого диоксида углерода на замораживание 1 м³ конструкции ледогрунтового ограждения является постоянной величиной при толщине ограждения 0.6–0.8 м, и мало зависит от типа грунта и расстояния между замораживающими колонками. Увеличение весовой влажности на 10 % приводит к увеличению расхода твердого диоксида углерода на 40 % – с 250 до 380 кг/м³. Дальнейший рост ледогрунтового ограждения происходит с возрастанием удельного расхода твердого диоксида углерода до 10 % при увеличении толщины ограждения в замковой плоскости от 0.5 до 2 м.

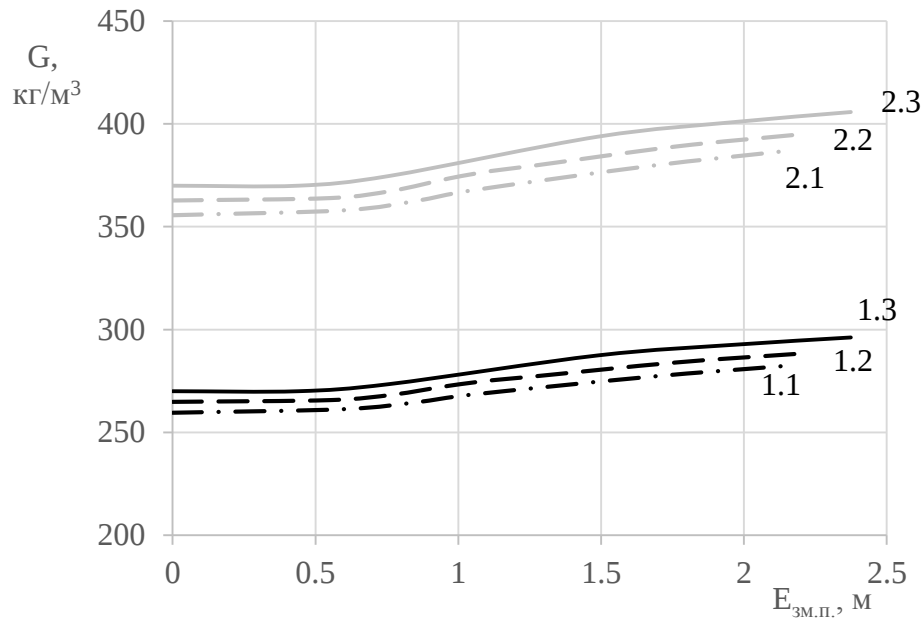


Рисунок 3.19 – Изменение удельного расхода твердого диоксида углерода на замораживание $1 м^3$ грунта G в зависимости от толщины ограждения в замковой плоскости $E_{з.п.}$: 1.1 и 2.1 – $l = 0.9 м$; 1.2 и 2.2 – $l = 1.1 м$; 1.3 и 2.3 – $l = 1.3 м$. 1.1, 1.2, 1.3 – весовая влажность 10 %, 2.1, 2.2, 2.3 – весовая влажность 20 %

3.6 Выводы по главе

Анализ результатов экспериментальных исследований и математического моделирования позволяет сделать следующие выводы:

1. Подтверждены результаты ранее проведенных исследований и показано, что коэффициент теплоотдачи от стенки замораживающей колонки к твердому диоксиду углерода является степенной функцией от теплового потока к замораживающей колонке. Однако из-за различия вида исследуемого диоксида углерода (гранулированный вместо дробленого) данная зависимость количественно имеет другой вид.
2. Интенсивность теплоотдачи от стенки колонки к твердому диоксиду углерода изменяется по глубине в верхней части колонки. Было установлено, что с увеличением глубины замораживания структура гранул твердого диоксида углерода уплотняется, что приводит к увеличению площади контакта гранул со стенкой. Уплотнение под действием собственного веса происходит до глубины

3–5 м. Зависимость изменения коэффициента теплоотдачи в верхней части колонки имеет вид произведения эллиптической зависимости от глубины замораживания на степенную функцию теплового потока к замораживающей колонке.

3. Процесс теплообмена между твердым диоксидом углерода и хладоносителем может быть представлен как процесс теплопередачи при вынужденной конвекции, вызванной перемешиванием жидкости потоками, выделяющегося при сублимации, углекислого газа.

4. По результатам статистической обработки данных, полученных в экспериментах, установлена критериальная зависимость числа Нуссельта от числа Пекле, позволяющая определять коэффициент теплоотдачи от твердого диоксида углерода к хладоносителю с учетом свойств жидкости и концентрации твердого диоксида углерода в ней.

5. Доказано, что программный комплекс COMSOL Multiphysics, реализующий численное решение систем дифференциальных уравнений методом конечных элементов, может использоваться для математического моделирования процесса искусственного замораживания грунтов с использованием твердого диоксида углерода.

6. Установлено, что температура стенки замораживающей колонки с течением времени изменяется незначительно и может быть принята постоянной. Уменьшение температуры стенки колонки с глубиной происходит на верхних 4–5 м столба твердого диоксида углерода от минус 68 °С до минус 74 °С. На глубине более 5 м температура стенки может быть принята равной минус 74–76 °С.

7. Время выравнивания фронта промерзания $\tau_{вр}$ (когда толщина ограждения в замковой плоскости становится близка к толщине ограждения в главной плоскости) может быть определено как: $\tau_{вр} = 3 \cdot \tau_{см}$, где $\tau_{см}$ – время смыкания соседних ледогрунтовых цилиндров. Между моментами смыкания соседних цилиндров и выравниванием фронта скорость его движения в главной плоскости, может быть принята равной скорости образования ограждения вокруг одиночной замораживающей колонки.

4 ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИИ ЗАМОРАЖИВАНИЯ ГРУНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТВЕРДОГО ДИОКСИДА УГЛЕРОДА

4.1 Обоснование новых технологических схем замораживания грунтов с использованием твердого диоксида углерода

На основании проведенных исследований и анализа опыта промышленного внедрения для повышения эффективности использования твердого диоксида углерода может быть предложена новая технологическая схема реализации способа замораживания грунтов колонками, заполненными твердым диоксидом углерода.

Идея технологической схемы состоит в том, что выделяемый при сублимации твердого диоксида углерода в колонке углекислый газ не выбрасывается в атмосферу сразу, а подаётся по трубе диаметром 10–30 мм в основание соседней колонки, где вступает в теплообмен вновь. При этом может быть получено до 68 кДж тепла на килограмм твердого диоксида углерода необходимых для нагрева выделяющегося газа до температуры 0 °С [39].

При реализации данной схемы замораживающие колонки могут быть соединены в группы по 3–5 штук по аналогии с замораживанием грунтов с использованием жидкого азота. Колонка может соединяться гибким, легко съёмным рукавом с «питающей» трубой соседней колонки, таким образом выделяющийся при сублимации углекислый газ будет перетекать из одной колонки в другую. При этом в колонке будет возрастать скорость движения газа, что приведет к увеличению коэффициента теплоотдачи между потоком газа и стенкой. Положительным фактором в данной схеме является дополнительное перемешивание гранул и пылеватых частиц диоксида углерода в потоке газа, тем самым снижается риск образования «пробок» по длине колонки.

При пассивном замораживании твердый диоксид углерода может размещаться только в первой колонке группы, остальные колонки будут охлаждаться струей углекислого газа.

В настоящее время нерешенной является задача механизации погрузки твердого диоксида углерода в замораживающие колонки. На большинстве объектов опытного внедрения загрузка производилась при помощи ручного инструмента. Однако данный способ не обеспечивает требуемой интенсивности загрузки, особенно в течение первых суток замораживания, когда в условиях значительных тепловых потоков к колонкам, расход диоксида углерода превышает 10 кг на 1 м длины замораживающей колонки в час [91].

Одним из решений данной задачи может являться использование малогабаритной погрузочно-разгрузочной техники (фронтальных погрузчиков и т.д.). При этом приемные воронки на устьях замораживающих колонок должны быть выполнены размерами и объемом равным или превышающим ёмкость ковша. Для ускорения загрузки приёмная воронка может быть выполнена одна на несколько соседних колонок (на 2 или 3). Однако в этом случае стоит уделить дополнительное внимание равномерности поступления диоксида углерода в колонки группы.

Перспективным может являться разработка специальных емкостей-дозаторов, устанавливаемых на замораживающие колонки, производящих загрузку твердого диоксида углерода автоматически с заданным интервалом по времени.

В технологической схеме с подачей сжатого воздуха в замораживающую колонку процесс загрузки диоксида углерода может быть объединен с подачей воздуха. Для этого гранулы диоксида углерода необходимо подавать в магистраль со сжатым воздухом, в результате они будут транспортироваться по питающей трубе в замораживающую колонку, однако данная схема является технологически сложной и требует дальнейших исследований.

При характерной для замораживания грунтов твердым диоксидом углерода длине замораживающих колонок (до 20 м), их монтаж может производиться методом завинчивания без бурения скважин [1, 32]. Это позволит сократить время, затрачиваемое на монтаж замораживающих колонок. Преимущество данного способа монтажа наиболее сильно проявляется при строительстве в условиях плотной городской застройки, когда монтаж бурового оборудования затруднен.

Эффективность данной технологии монтажа колонок возрастает с уменьшением их диаметра. Таким образом, данный способ можно рекомендовать к применению при диаметре колонок 100–156 мм.

При комбинированном способе замораживания помимо конструкций испарителей, описанных в главе 1, в практике могут найти применения и другие конструкции. В частности, интерес представляет вариант пластинчато-ребристого (матричного) испарителя (рисунок 4.1а) и видоизмененный вариант трубного испарителя (рисунок 4.1б).

Особенностью матричного испарителя является особая форма каналов для пропускания жидкости в виде вертикальных листов, скреплённых перегородками. Данная конструкция отличается компактностью и малым весом при достаточно большой площади теплообмена, однако сложность ее изготовления может препятствовать широкому применению.

Более простым в реализации является вариант трубного испарителя с вертикально расположенными трубами. В этом случае под действием силы тяжести обеспечивается плотный контакт между стенками труб и диоксидом углерода. Применение такого испарителя несколько усложняет процесс загрузки из-за большей высоты конструкции.

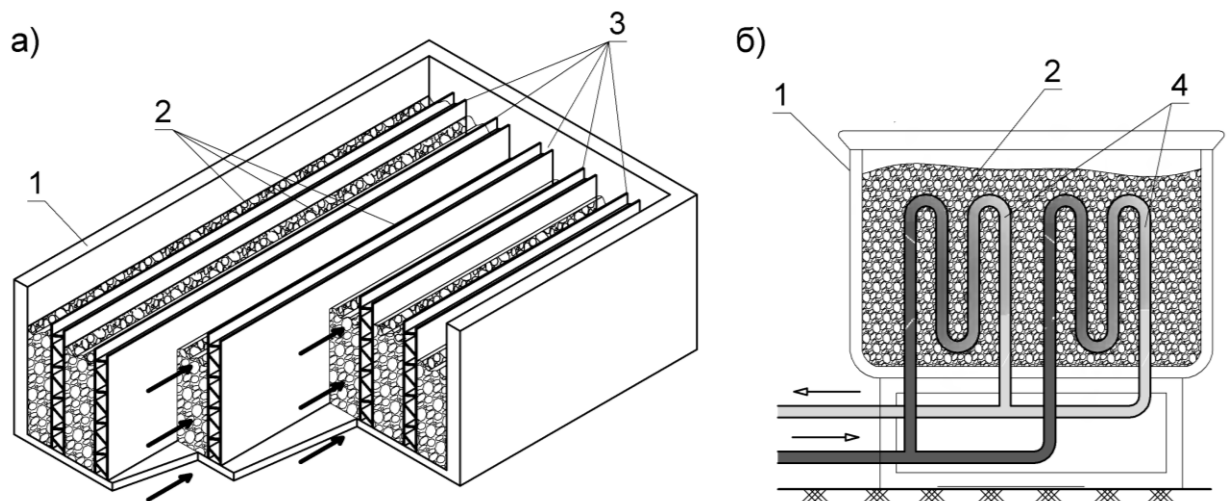


Рисунок 4.1 – Матричный (а) и трубный (б) испарители: 1 – теплоизолированная емкость; 2 – твердый диоксид углерода; 3 – плоские каналы; 4 – U-образные вертикальные трубки

Перспективным вариантом реализации комбинированного способа замораживания может являться схема, в которой испаритель с твердым диоксидом углерода устанавливается дополнительно к компрессорной замораживающей станции в качестве добавочного источника холода. При этом возможно два варианта ее подключения: параллельно замораживающей станции (рисунок 4.2а), и последовательно с замораживающей станцией (рисунок 4.2б).

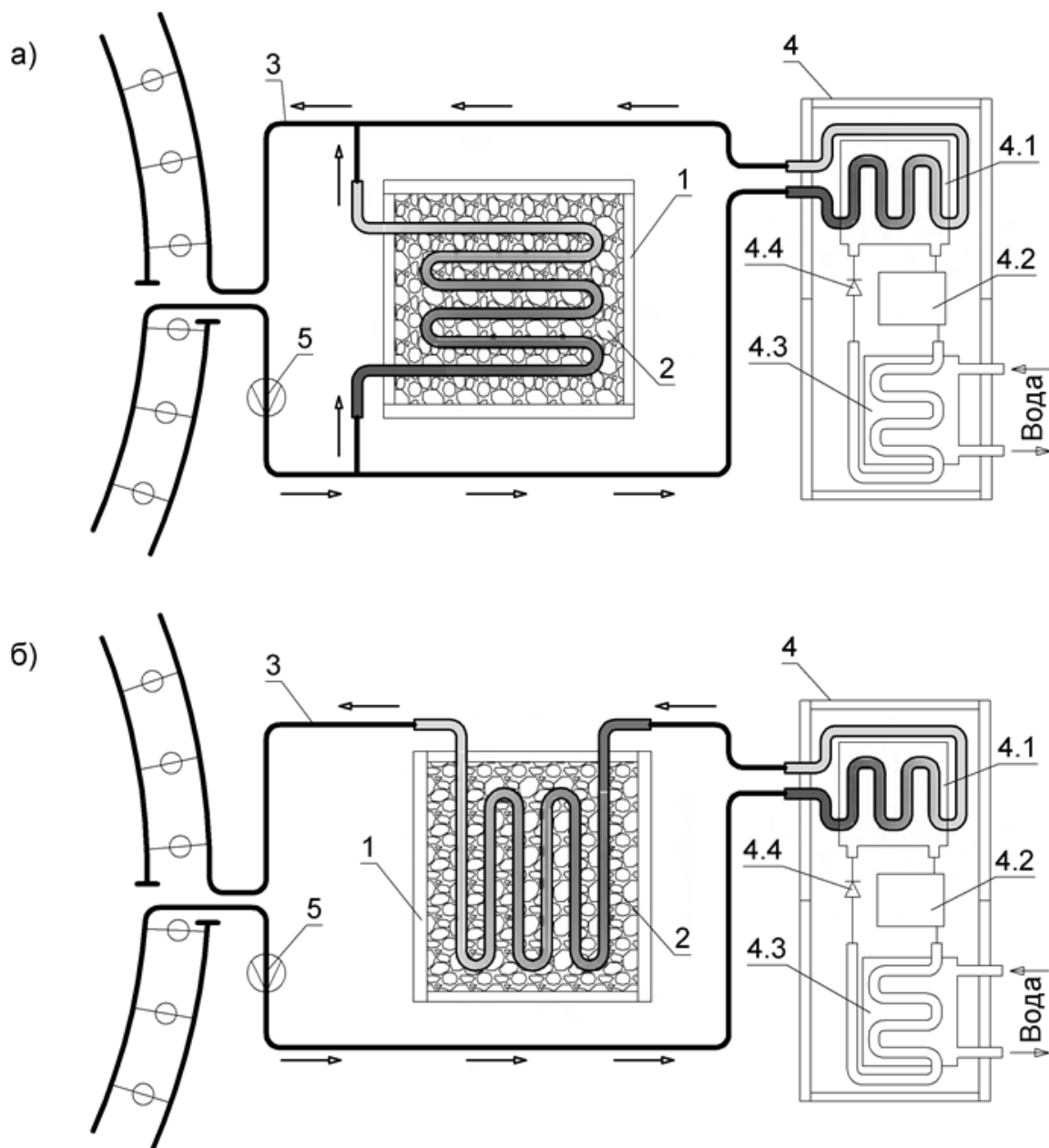


Рисунок 4.2 – Варианты схемы включения испарителя в рассольную сеть (а – параллельно, б – последовательно): 1- испаритель; 2 – твердый диоксид углерода; 3 – рассольная сеть; 4 – замораживающая станция (4.1 – испаритель; 4.2 – компрессор; 4.3 – конденсатор; 4.4 – клапан); 5 – насос

В данной технологической схеме испаритель выполняет функцию по временному увеличению мощности замораживающей станции в начальный период, когда возможный тепловой поток к замораживающим колонкам много больше её мощности. Таким образом, путем незначительных материальных затрат на установку испарителя можно добиться сокращения времени активного замораживания. Применение испарителя позволяет дополнительно охлаждать хладоноситель до температур, недостижимых при использовании данной замораживающей станции. Это сократит затраты на приобретение и обслуживание низкотемпературных замораживающих станций, и уменьшит время активного замораживания.

Испаритель может оставаться единственным источником холода в период пассивного замораживания. При этом замораживающая станция может быть демонтирована и перебазирована на другой строительный объект. Это повысит экономическую эффективность её использования.

Уравнение теплового баланса для данной технологической схемы можно записать в виде:

$$V \cdot c(T_{o,з.с.} - T_{i,з.с.}) + V \cdot c(T_{o,ис.} - T_{i,ис.}) = V \cdot c(T_{o,к.} - T_{i,к.}), \quad (4.1)$$

где V – расход хладоносителя через рассольную сеть, кг/с; c – теплоемкость хладоносителя, Дж/(кг·°C); T_o , T_i – соответственно температура хладоносителя на входе и выходе компрессорной замораживающей станции (З.С.), испарителя (ИС.) и замораживающей колонки (К.).

При последовательном включении испарителя в рассольную сеть он служит для понижения температуры хладоносителя до значений ниже минимально возможной температуры жидкости на выходе из компрессорной замораживающей станции $T_{o,з.с.}$. Если хладоноситель на выходе из испарителя будет иметь температуру $T_{o,ис.}$ при которой, температура на выходе из замораживающей колонки $T_{o,к}$ будет ниже $T_{o,з.с.}$, тогда замораживающая станция не сможет его более охладить, тем самым она будет выведена из системы охлаждения жидкости, то есть охлаждение будет происходить только за счет твердого диоксида углерода.

Из (4.1) можно определить долю тепла, воспринимаемую замораживающей станцией:

$$\beta = \frac{(T_{o,з.с.} - T_{i,з.с.})}{(T_{o,к.} - T_{i,к.})} \quad (4.2)$$

При $\beta = 0$ всё тепло от хладоносителя будет восприниматься испарителем. Значение $\beta = 1$ соответствует случаю, когда испаритель не участвует в охлаждении хладоносителя.

Из практики известно, что разность между температурой хладоносителя на выходе из колонки и на её входе ($T_{o,к.} - T_{i,к.}$) при температуре подаваемого хладоносителя минус 25 °С равна 3–5 °С, а при температуре минус 45 °С равна 12–16 °С [13, 56]. Таким образом, если принять равными мощность компрессорной замораживающей станции и испарителя, что соответствует $\beta = 0.5$, то температура хладоносителя, подаваемого в замораживающие колонки, при применении предлагаемой технологической схемы может быть уменьшена до 8 °С по сравнению с обычным рассольным замораживанием.

В случае включения испарителя в рассольную сеть параллельно замораживающей станции (см. рисунок 4.2а), он служит для повышения общей мощности замораживающей установки, при этом температура хладоносителя на выходе из испарителя и замораживающей станции может быть одинаковой.

4.2 Исходные данные для проектирования замораживания грунтов

Ледогрунтовое ограждение, создаваемое при искусственном замораживании грунтов в подземном строительстве, должно обладать следующими свойствами: быть прочным и герметичным; быть способным воспринимать горное и гидростатическое давление; препятствовать влиянию строительных работ на целостность окружающего массива, фундаментов окружающих зданий и сооружений, инженерных коммуникаций; не зависеть от горно-геологических,

теплофизических и гидрогеологических свойств массива; создаваться в короткий промежуток времени; обладать минимальной стоимостью создания.

Выбор способа и схемы замораживания грунтов производится после детального изучения массива грунта, подвергаемого замораживанию, и проекта будущего сооружения. К основным факторам, определяющим выбор способа, можно отнести: гидрогеологическое строение массива и его теплофизические свойства; режим фильтрации грунтовых вод, их температура, химические свойства; наличие вблизи будущей выработки зданий и сооружений, при этом особое внимание стоит уделять сооружениям с высокой температурой (теплосети, сети водоснабжения, канализационные коллекторы и т.д.).

Перед началом проектирования производится анализ расположения коммуникаций, зданий и сооружений в зоне производства работ. Определяется геологическое строение массива грунта вокруг возводимого сооружения. По результатам комплексного лабораторного исследования образцов грунта, слагающих массив, определяются их состав, гранулометрические, механические и теплофизические свойства в талом и мерзлом состоянии при температурах, достигаемых в процессе замораживания грунта. Количество исследуемых параметров определяется спецификой конкретного строительного объекта. При небольших глубинах и однородном массиве определение механических и теплофизических свойств грунта может производиться по данным литературных источников или из опыта практики.

К теплофизическим свойствам относятся: теплопроводность и теплоемкость грунта в талом и мерзлом состоянии; начальная температура грунта.

Основными определяемыми параметрами в процессе проектирования ледогрунтового ограждения являются: толщина ледогрунтового ограждения; время активного замораживания; режим загрузки твердого диоксида углерода и его общее необходимое количество.

Определение технологических параметров процесса замораживания производится на основании предварительного исследования процесса теплопередачи в массиве грунта. При этом должны рассматриваться различные

способы и схемы производства работ, различные геометрические и технологические начальные условия и параметры.

Исследование процесса теплопередачи возможно производить двумя путями: на основании аналитического расчета по разработанным методическим рекомендациям; или на основании математического моделирования конкретной задачи.

Способ математического моделирования требует значительного вычислительного времени, тем самым не позволяя производить технико-экономическое сравнение большой выборки возможных начальных условий. Экономия времени на исследования процесса теплопередачи в массиве грунта достигается совмещением данных путей: проведением предварительного расчета и выбор начальных условий по аналитическим зависимостям, с последующей проверкой и корректировкой при помощи математического моделирования.

Выбор способа искусственного замораживания грунтов с использованием твердого диоксида углерода обосновывается технико-экономическим сравнением различных вариантов производства работ. Основными факторами, которые могут привести к необходимости производства работ данным способом являются: высокая начальная температура грунтового массива (более 40 °С) из-за наличия вблизи замораживаемого массива источников высокой температуры (канализационные коллекторы, тепловые сети, подземные сооружения и т.д.); низкая температура замерзания грунтовых вод (менее минус 20 °С), вызванная наличием в них примесей солей или нефтепродуктов; высокая скорость потока грунтовых вод (свыше 2 м/сутки); малые объемы замораживаемого грунта.

Зная гидродинамический режим движения подземных вод, оценивается возможность замораживания грунта при данной температуре стенки колонки, которая определяется принятым способом замораживания. Используя закон Дарси и уравнение теплового баланса в работе [95] получена зависимость для определения максимальной скорости фильтрации грунтовых вод U_c , м/сутки, в зависимости от теплопроводности замороженного грунта и расположения колонок:

$$U_c = \frac{k_f}{4 \cdot S \cdot \ln\left(\frac{S}{4 \cdot r_0}\right)} \cdot \frac{\Delta T_s}{\Delta T_0}, \quad (4.3)$$

где r_0 – радиус замораживающей колонки, м; k_f – теплопроводность замороженных грунтов, Вт/(м·°C); S – расстояние между колонками, м; ΔT_s – разница между температурой стенки замораживающей колонки и температурой замерзания грунтовых вод, °C; ΔT_0 – разница между начальной температурой грунтовых вод и температурой их замерзания, °C.

Если полученное значение U_c меньше наблюдаемого в массиве, то замораживание грунтов невозможно. В этом случае применяется способ замораживания, обеспечивающий более низкую температуру (способ с использованием твердого диоксида углерода или замораживание жидким азотом), или предпринимаются меры по снижению коэффициента фильтрации массива грунта [62].

Способ искусственного замораживания грунтов с загрузкой твердого диоксида углерода в замораживающие колонки может применяться при мощности участка замораживания не более 20 м и общей длине колонки не более 40 м.

При большей глубине и мощности данный способ может быть реализован при использовании гранулированного диоксида углерода и его механизированной погрузки в замораживающие колонки. При этом диаметр замораживающей колонки должен быть не менее 0.156 м для недопущения образования в них «пробок».

Комбинированный способ замораживания грунтов может применяться как в условиях характерных для замораживания колонками, заполненными твердым диоксидом углерода, так и в условиях характерных для рассольного замораживания, однако общий объем замораживаемого грунта не должен превышать 400 м³.

4.3 Определение геометрических размеров ледогрунтового ограждения

Основными параметрами, определяемыми при проектировании искусственного замораживания грунтов с использованием твердого диоксида углерода являются: толщина ледогрунтового ограждения; расположение замораживающих скважин; время активного и пассивного замораживания; частота загрузки диоксида углерода в активный и пассивный периоды.

Для расчета толщины ледогрунтового ограждения необходимо определить действующее на него давление от грунта и грунтовых вод; принять на основании лабораторного исследования прочностные свойства замороженного грунта. При производстве работ по замораживанию грунтов в устойчивых, крепких породах, когда ледогрунтовое ограждение выполняет функцию противofильтрационной завесы, толщина ограждения может приниматься из геометрических соображений равной расстоянию между колонками.

Расчет давления от веса грунта и подземных вод на ледогрунтовое ограждение можно производить по следующим зависимостям [56]:

$$\begin{aligned} p'_n &= \sum_{i=1}^{n-1} \gamma_i \cdot h_i \cdot A_i, \\ p''_n &= \sum_{i=1}^n \gamma_i \cdot h_i \cdot A_i, \\ p_B &= \gamma_B \cdot h_B, \end{aligned} \tag{4.4}$$

где p'_n – давление в кровле n -го пласта, Па; p''_n – давление в подошве n -го пласта, Па; γ_i – удельный вес грунта i -го пласта, с учетом взвешивающего действия грунтовых вод, Н/м³; γ_B – удельный вес воды, Н/м³; h_i – мощность i -го пласта, м; h_B – напор вод, м; A_i – коэффициент бокового распора i -го пласта, равный $tg^2(45^\circ - \varphi_i/2)$; φ_i – угол внутреннего трения грунта, град.

Расчетным значением прочности замороженного грунта, слагающего ледогрунтовое ограждение, является значение мгновенной прочности на одноосное сжатие при температуре равной 0.3 от температуры стенки колонки

деленное на коэффициент запаса (от 3 до 5), или значение длительной прочности при той же температуре без учета коэффициента запаса.

Для характерных для городского подземного строительства глубин толщина ледогрунтового ограждения в замковой плоскости может определяться по формуле Ляме [85]:

$$E = R \left(\sqrt{\left(\frac{[\sigma]}{[\sigma] - 2 \cdot p_0} \right)} - 1 \right), \quad (4.5)$$

где E – толщина ледогрунтового ограждения, м; $[\sigma]$ – прочность грунтов на одноосное сжатие с учетом коэффициента запаса, МПа; P – суммарное давление на ледогрунтовое ограждение, МПа.

Для каждого слоя массива грунта определяется требуемая толщина в кровле и почве. Дальнейший расчет параметров производится в зависимости от выбранного способа замораживания грунтов.

4.4 Определение параметров технологии замораживания грунтов с загрузкой твердого диоксида углерода в замораживающие колонки

4.4.1 Определение расстояния между замораживающими колонками

В неустойчивых грунтах давление на ледогрунтовое ограждение возрастает с увеличением глубины. Это приводит к тому, что требуемая толщина ограждения так же возрастает. Увеличение толщины ограждения приводит к увеличению времени, необходимого на его образование (рисунок 4.3).

Расстояние между замораживающими скважинами выбирается исходя из условия выравнивания фронта промерзания ледогрунтового ограждения к моменту окончания активного замораживания. Это минимизирует объем замораживания лишнего грунта. Как было показано в главе 3 выравнивание фронта промерзания происходит при толщине ограждения в главной плоскости равной $1.5 \cdot l$, где l –

расстояние между скважинами. Предварительное определение расстояние между скважинами производится по выражению (4.6), но не менее 0.9м.

$$l = 0.7 \cdot E . \quad (4.6)$$

Значение толщины ограждения в формуле (4.6) принимается для слоя грунта, с минимальной толщиной.

Зная необходимую максимальную толщину ограждения E_m , м, определяется диаметр расположения замораживающих скважин $D_{ск}$, м (для кольцевого ограждения):

$$D_{ск} = D_v + E_m + 0.01h , \quad (4.7)$$

где D_v – диаметр выработки, м; h – глубина замораживающих скважин, м.

Количество замораживающих скважин n принимается равным:

$$n = \frac{L}{l} , \quad (4.8)$$

где L – длина ограждения, м. Для кольцевого ограждения равная $\pi D_{ск}$.

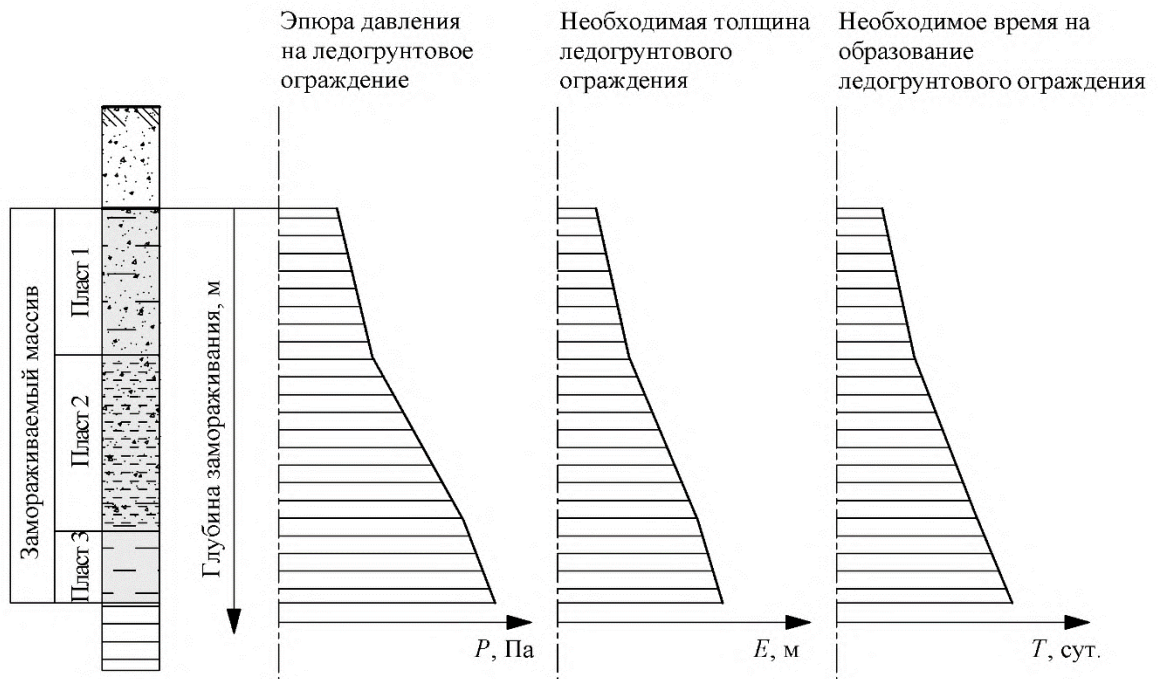


Рисунок 4.3 – Характер изменения давления на ледогрунтовое ограждение, необходимой его толщины и времени образования по глубине замораживания

Время, необходимое для образования ледогрунтового ограждения требуемой толщины, определяется в кровле и в почве каждого пласта. Температура стенки колонки принимается постоянной: минус 72–74 °С для глубины более 4 м; минус 70–72 °С для глубины 2–4 м; и минус 68–70 °С для глубины до 2-ух м от поддерживаемого уровня диоксида углерода в колонке.

Существующие точные решения по определению времени активного замораживания достаточно сложны, что не позволяет найти им применение в практике [48, 53]. В связи с этим распространение получил балансовый метод. Однако он содержит значительное количество эмпирических параметров, неизвестных для безрассольного способа замораживания.

Достаточно точными и простыми для применения являются аналитические зависимости для определения времени замораживания грунтов, полученные проф. Н.Г. Трупаком [55]. В предложенных зависимостях температура стенки колонки принимается постоянной. При температурах стенки, характерных для замораживания грунтов твердым диоксидом углерода наблюдается некоторое расхождение между рассчитанным временем активного замораживания и временем, полученным по результатам математического моделирования. Данное расхождение может быть устранено путем введения дополнительного поправочного множителя для определения расчетного значения расстояния между замораживающими колонками $l_{пр}$. Полученные модифицированные зависимости имеют вид (4.9) и (4.10), где: τ – время активного замораживания, ч; τ_1 – время смыкания соседних ледогрунтовых цилиндров, ч; τ_2 – время образования ограждения проектной толщины от момента смыкания соседних цилиндров, ч.

Величина Q_i , Дж/м³, определяет изменение теплосодержания массива грунта в процессе замораживания. Значение Q_i может быть определено по выражению (4.11).

$$\tau = \begin{cases} \tau_1 \\ \tau_1 + \tau_2, \text{ при } \widehat{r_{лц}} \approx l_{пр}/2 \\ E \leq (1.1 \div 1.2) \cdot l_{пр} \end{cases}; \quad (4.9)$$

$$\begin{aligned}
\tau_1 &= \frac{\widehat{r_{\text{лц}}}^2}{16 \cdot (t_0 - t_{\text{ср}}) \cdot k_{\text{зг}}} \cdot \ln \left(\frac{\widehat{r_{\text{лц}}}}{r_{\text{к}}} \right) (Q_i + 1.43 \cdot A \cdot \sqrt{B}), \\
\tau_2 &= \frac{\widehat{r_{\text{лц}}}^2 \cdot E_i \cdot l_{\text{пр}}}{4 \cdot \pi \cdot (t_0 - t_{\text{ср}})} \cdot \ln \left(\frac{\widehat{r_{\text{лц}}}}{r_{\text{к}}} \right) (Q_i + 0.91 \cdot A \cdot \sqrt{B}), \\
A &= 1.13 \cdot (t_{\text{нач}} - t_0) \sqrt{k_{\text{тг}} \cdot c_{\text{тг}} \cdot \gamma_{\text{тг}}}, \\
B &= \frac{Q_i}{(t_0 - t_{\text{ср}}) \cdot k_{\text{зг}}} \ln \left(\frac{\widehat{r_{\text{лц}}}}{r_{\text{к}}} \right), \\
\widehat{r_{\text{лц}}} &= \begin{cases} \frac{l_{\text{пр}}}{2} & r_{\text{лц}} \leq \frac{l_{\text{пр}}}{2} \\ \frac{1}{2} \cdot (E^2 + l_{\text{пр}}^2)^{\frac{1}{2}} & r_{\text{лц}} > \frac{l_{\text{пр}}}{2} \end{cases}, \\
l_{\text{пр}} &= 0.75 \cdot l + 0.2;
\end{aligned} \tag{4.10}$$

$$\begin{aligned}
Q_i &= \rho_{\text{тг}} \cdot C_{\text{тг}} \cdot (t_{\text{нач}} - t_0) + \rho_{\text{зг}} \cdot C_{\text{зг}} \cdot (t_0 - t_{\text{ср}}) + \\
&\quad + m \cdot \rho_{\text{в}} \cdot R_{\text{л}},
\end{aligned} \tag{4.11}$$

где $k_{\text{тг}}$, $k_{\text{зг}}$, - теплопроводность талого и замороженного грунта, Вт/(м·°C); $\rho_{\text{тг}}$, $\rho_{\text{зг}}$, $\rho_{\text{в}}$ – плотность талого грунта, замороженного грунта и воды, соответственно, кг/м³; $C_{\text{тг}}$, $C_{\text{зг}}$ – удельная теплоемкость талого и замороженного грунта, соответственно, кДж/м³·°C; $t_{\text{нач}}$ – начальная температура грунта, °C; t_0 – температура замерзания воды, °C; $t_{\text{ср}}$ – средняя температура ограждения, равная 24 °C; m – влажность грунта, д.е.; $R_{\text{л}}$ – скрытая теплота плавления льда, равная 335 кДж/кг; E – толщина ограждения в замковой плоскости, м; $r_{\text{к}}$ – радиус замораживающей колонки, м; $r_{\text{лц}}$ – половина толщины ограждения в главной плоскости, м; l – расстояние между замораживающими колонками, м.

4.4.2 Обоснование режима загрузки твердого диоксида углерода в замораживающую колонку

Способ замораживания грунтов с загрузкой диоксида углерода в замораживающие колонки позволяет в процессе активного замораживания

создавать ледогрунтовое ограждения, в котором его толщина увеличивается с ростом глубины. Это приводит к снижению расхода твердого диоксида углерода ввиду уменьшения объема замораживаемого грунта в верхней части ограждения.

Данная схема (рисунок 4.4) состоит в том, что поддерживаемый уровень твердого диоксида углерода в колонке x , повышается с заданной скоростью w_{CO_2} , м/ч, в процессе роста ледогрунтового ограждения от $x_{нач}$ до $x_{кон}$ к моменту завершения активного замораживания. В результате время образования ограждения в нижних частях колонки будет больше, что позволит создать ограждение с возрастающей по глубине толщиной.

Твердый диоксид углерода загружается в замораживающую колонку с таким расчетом, чтобы его уровень был на 0.5–1 м выше её дна, и далее в процессе замораживания уровень диоксида углерода повышается.

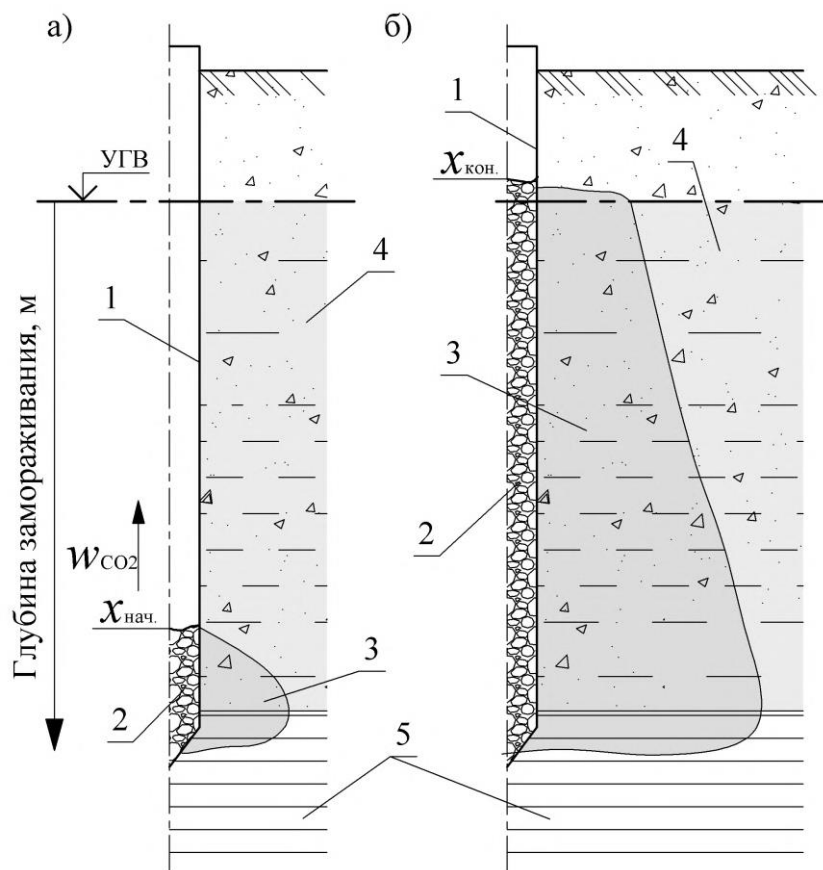


Рисунок 4.4 – Изменение уровня диоксида углерода в колонке от начала процесса замораживания (а) до завершения периода активного замораживания (б): 1 – замораживающая колонка; 2 – твердый диоксид углерода; 3 – ледогрунтовое ограждение; 4 – обводненный грунт; 5 – водоупорные породы

Необходимая скорость повышения уровня диоксида углерода w'_i , м/ч, в k -ом слое грунта определяется выражением:

$$w_{CO2k} = \frac{\tau'_k - \tau''_k}{h_k}, \quad (4.12)$$

где τ'_k и τ''_k – время образования ограждения в k -ом слое грунта в почве и кровле, соответственно, ч; h_i – мощность k -ого слоя, м.

Уровень диоксида углерода в k -ом слое будет понижаться в результате притока тепла от окружающего массива. Скорость понижения уровня диоксида углерода w'_i , м/ч, определяется выражением:

$$w'_k = \frac{4}{d_k^2 \cdot \pi \cdot \rho_{CO2}} \frac{1}{R} \sum_{i=n}^{n-k} q_{li} \cdot h_i, \quad (4.13)$$

где q_{li} – тепловой поток к 1 м длины колонки, определяемый по зависимости (2.10), Дж/(ч·м); n – общее количество слоев замораживаемого массива.

Количество твердого диоксида углерода, которое необходимо загружать в замораживающую колонку в единицу времени m , кг/ч, чтобы поддерживать скорость увеличения уровня диоксида углерода w_{CO2i} находится по выражению:

$$m = (w_{CO2i} + w'_k) \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \rho_{CO2}. \quad (4.14)$$

После того, как уровень диоксида углерода достигнет отметки выше грунтовых вод замораживание грунта будет производиться при постоянном уровне диоксида углерода в замораживающей колонке в течение времени τ''_1 .

После образования ледогрунтового ограждения проектных размеров начинается стадия пассивного замораживания, которая завершается после окончания проходки выработки в замороженном массиве и закрепления стенок водонепроницаемой крепью.

Ледогрунтовое ограждение в незакрепленной области вблизи забоя должно обладать требуемой прочностью. На промежутке ствола, где установлена постоянная крепь, достаточно поддерживать минимальную толщину ледогрунтового ограждения, выполняющую функцию противифльтрационной

завесы, но не воспринимающую горное и гидростатическое давление, то есть, с толщиной в замковой плоскости порядка 0.5–0.8 м.

Таким образом, уровень диоксида углерода в колонке может понижаться вслед за подвиганием забоя строящейся выработки.

Отсюда следует, что скорость понижения уровня диоксида углерода в колонке равна скорости проходки ствола. При этом количество диоксида углерода, необходимое для его поддержания, определяется выражением (4.14).

Время в течение которого верхняя часть колонки может находиться без контакта с твердым диоксидом углерода, и при этом ограждение уменьшится до заданной минимальной толщины, определяется по выражению:

$$\tau_{pz}' = \left(\frac{\left(S_c - \frac{\pi \cdot l^2}{4} \right) \cdot Q_i}{S_{\text{лпо.ед.}} \cdot 1.13 \cdot t_{\Gamma} \cdot \sqrt{\lambda_{\text{тг}} \cdot c_{\text{тг}} \cdot \gamma_{\text{тг}}}} \right)^{1/2}. \quad (4.15)$$

В случае если за время τ_{pz}' завершить проходку не удастся необходимо вновь заполнить колонку на всю глубину с поддержанием в ней диоксида углерода в течение времени $\tau_{\text{вст}}$, ч, определяемого по выражению:

$$\tau_{\text{вст}} = \frac{\gamma_{\text{зг}} \cdot C_{\text{зг}} \cdot S_{\text{зг}} \cdot (t_{\text{ст}} - t_{\text{ср}})}{q_{\text{ст}} \cdot \pi \cdot d_{\text{к}}}. \quad (4.16)$$

После завершения проходки происходит ликвидация ограждения. Параметры данного процесса определяются аналогично рассольному замораживанию.

После полной ликвидации ограждения могут быть демонтированы замораживающие трубы, а скважины ликвидированы.

4.4.3 Определение стоимости производства работ по замораживанию грунта твердым диоксидом углерода

Как было показано в разделе 3.5 расход диоксида углерода на замораживание единицы объема грунта мало зависит от времени замораживания и определяется только объемом замораживаемого массива. Исходя из этого полная стоимость

образования ледогрунтового ограждения складывается из стоимости бурения скважин, монтажа замораживающих колонок и стоимости твердого диоксида углерода, в которую включены затраты на его транспортировку, хранение и загрузку в замораживающую колонку. Полная стоимость замораживания грунта P , руб., равна:

$$P = P_1 + P_2, \quad (4.17)$$

где P_1 – стоимость бурения скважин и монтажа замораживающих колонок и стоимость их обслуживания, руб.; P_2 – стоимость твердого диоксида углерода, руб..

Величина P_1 прямо пропорциональна количеству скважин n и равна:

$$P_1 = n \cdot h \cdot a + T \cdot n \cdot b, \quad (4.18)$$

где a – стоимость бурения скважины и монтажа колонки, руб.; b – стоимость обслуживания одной колонки в единицу времени, руб.; T – время замораживания, ч; h – длина скважины, м.

Приняв расход диоксида углерода на замораживание 1 м^3 грунта постоянным во времени, будем считать стоимость требуемого диоксида углерода пропорциональной объему замораживаемого грунта. Объем замораживаемого грунта в i -ом слое массива V_i , м^3 , определяется по приближенным формулам, полученным из геометрического рассмотрения задачи:

$$\begin{aligned} V_i &= \left(\frac{\pi \cdot n}{4} (x + a_i)^2 - 2 \cdot S_i \right) \cdot h_i, \\ x &= \frac{L}{n}, \\ S_i &= \left(\frac{x}{2} + a_i \right)^2 \cdot \arccos \left(\frac{x}{x + \frac{a_i}{2}} \right) - \frac{x \cdot E_i}{4}, \\ a_i &= \frac{E_i^2}{4.4 \cdot x}, \end{aligned} \quad (4.19)$$

где S_i – средняя площадь поперечного сечения ледогрунтового ограждения i -ого слоя, м^2 ; L – длина окружности (прямой) по которой располагаются скважины, м; x – расстояние между скважинами, м; E_i – толщина ограждения в замковой плоскости в i -ом слое массива, м; n – количество замораживающих скважин.

Общее количество диоксида углерода, необходимое для образования ледогрунтового ограждения G , кг, определяется по формуле:

$$G = \frac{1.2}{R} \sum_{i=1}^n Q_i V_i, \quad (4.20)$$

где R – теплота сублимации твердого диоксида углерода, Дж/кг; Q_i – изменение теплосодержания грунта в процессе замораживания, определяемое по (4.11), Дж/м³.

Стоимость твердого диоксида углерода, необходимого для замораживания грунта P_2 , руб., определяются по выражению:

$$P_2 = c \cdot G, \quad (4.21)$$

где c – стоимость диоксида углерода, руб/кг.

Как показал выполненный предварительный расчет, при различных значениях стоимостных параметров минимальная стоимость производства работ достигается при расстоянии между колонками от 0.7 до 1.2 м в зависимости от стоимости бурения, монтажа колонок, и стоимости диоксида углерода.

На рисунке 4.5 показан график изменения стоимости замораживания грунта колонками, заполненными твердым диоксидом углерода, и при применении рассольного замораживания по данным [68]. Для расчета принято: стоимость твердого диоксида углерода 15 руб./кг, удельный расход твердого диоксида углерода 180 кг/м³, стоимость бурения и монтажа колонок 3500 руб./м.

Границы заштрихованной области графика на рисунке 4.5 определяются объемом замораживаемого грунта, приходящегося на одну замораживающую колонку. Уменьшение расстояния между колонками приводит к увеличению стоимости, но уменьшает время активного замораживания.

Из графика видно, что применение способа замораживания с использованием твердого диоксида углерода позволяет снизить стоимость замораживания грунтов по сравнению с рассольным способом при объеме замораживаемого грунта менее 350 м³. При замораживании грунтов в объеме от 150 до 300 м³ снижение стоимости замораживания может достигать 15 %.

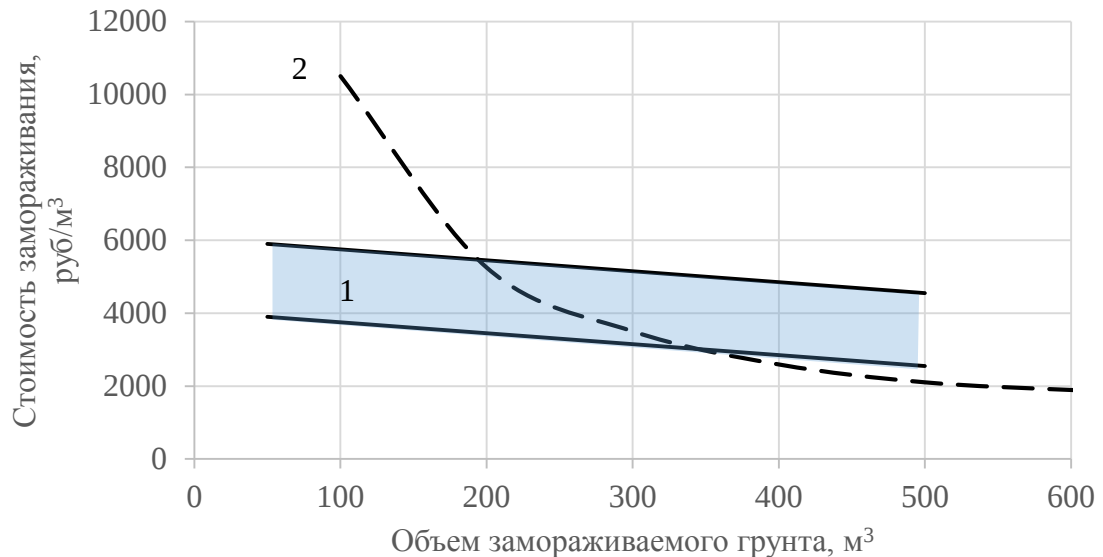


Рисунок 4.5 – Изменение стоимости замораживания 1 м^3 грунта в зависимости от объема замораживаемого грунта. Область 1 – замораживание с использованием твердого диоксида углерода; кривая 2 – рассольное замораживание с использованием установки ПХУ-50 [68]

4.5 Определение параметров технологии замораживания при комбинированном способе замораживания грунтов

При комбинированном способе замораживания грунтов определение параметров технологии происходит по методикам, известным для рассольного способа. Основные методики определения технологических параметров представлены, в частности, в работах [5, 9, 24, 51, 68, 75, 85].

По результатам расчета определяются: мощность замораживающей станции, температура хладоносителя на входе и выходе из замораживающих колонок, объемный расход хладоносителя в рассольной сети. Данные сведения являются исходными при проектировании испарителя, использующего твердый диоксид углерода в качестве источника холода.

Теоретические основы проектирования различных испарителей изложены в [3, 48, 50, 63 и др.]. Методика проектирования испарителя зависит от его типа. Результатом проектирования должен являться испаритель минимально возможных

размеров, простой конструкции, обеспечивающий охлаждение жидкости с заданным расходом до заданной температуры.

Испаритель должен быть покрыт слоем теплоизоляционного материала, не допускающим теплоприток из окружающей среды. После загрузки и равномерного распределения твердого диоксида углерода, испаритель должен быть закрыт негерметичной теплоизолирующей крышкой, препятствующей соприкосновению хладагента с окружающим воздухом.

Конструкция испарителя должна обеспечить удобную загрузку диоксида углерода, плотный и равномерный его контакт со всей поверхностью теплообмена.

С достаточной точностью основные параметры могут быть определены в соответствии с нижеследующими рекомендациями в зависимости от вида испарителя.

4.5.1 Технологическая схема с трубным испарителем

На первом этапе расчета производится выбор конструкции испарителя: с горизонтальными трубами или с вертикальными трубами. Определяется возможность заполнения его незамерзающей жидкостью.

Наиболее простым в изготовлении является испаритель с горизонтальными трубами. При этом наибольшая эффективность теплопередачи достигается при его заполнении незамерзающей жидкостью.

Расчет испарителя производится методом последовательных приближений на основе комплексного анализа, учитывающего стоимость изготовления и эксплуатации, ремонтпригодность, долговечность.

Значительную часть эксплуатационных расходов, переменных в зависимости от выбранной конфигурации испарителя, составляют расходы на электроэнергию, затрачиваемую на перекачивание хладоносителя.

Твердый диоксид углерода должен легко распределяться по объему емкости, это требует учёта размера гранул при выборе расстояния между трубами. Минимальным является шаг труб, равный трём её диаметрам.

Последовательность проектирования может быть следующая.

Определяются максимальные габариты испарителя, исходя из которых, выбирается диаметр и количество трубок (или секций змеевиков). Из технологических соображений выбирается толщина стенок трубок.

Определяется скорость движение жидкости в единичной трубке ω_p , м/с:

$$\omega_p = \omega_{\text{маг.}} \cdot \frac{S_{\text{маг.}}}{S_p}, \quad (4.22)$$

где $S_{\text{маг}}$ – площадь поперечного сечения магистрального трубопровода, м²; S_p – площадь трубки, м².

Определяется коэффициент теплопередачи в трубе по формуле (2.35) и длина единичной трубы по формуле (2.36). Рассчитывается гидравлическое сопротивление конструкции, как сумма гидравлических сопротивлений во всех трубах и сопротивлений входного и выходного коллекторов [21]. Рассчитывается стоимость изготовления испарителя на конкретном предприятии.

Расчет повторяется вновь при иных значениях диаметра и количества трубок несколько раз. По результатам сравнения полученных данных выбирается наиболее дешевая конструкция.

Расход диоксида углерода в единицу времени g , кг/с, определяется тепловым потоком отводимым от труб по формуле:

$$g = \frac{F_{\text{тр}} \cdot k \cdot |-78.9 - T_{\text{ср}}|}{R}, \quad (4.23)$$

где $F_{\text{тр}}$ – общая поверхность поверхности теплообмена (площадь поверхности труб), м²; k – коэффициент теплопередачи в трубе, Вт/(м²·°C), определяемый по формуле (2.35).

Количество диоксида углерода, которое необходимо загружать за одну загрузку m , кг, определяется шагом загрузки по времени τ_3 , с, определяемым из технологических соображений и размерами испарителя, равно:

$$m = \frac{Q \cdot \tau_3}{R}. \quad (4.24)$$

4.5.2 Технологическая схема с беструбным испарителем

Испаритель, в котором охлаждение хладоносителя происходит при непосредственном контакте с твердым диоксидом углерода, должен обеспечить удобную загрузку диоксида углерода, равномерное его распределение в потоке жидкости, а также отделение частиц диоксида углерода от хладоносителя при подаче его в прямой трубопровод рассольной сети.

В процессе проектирования необходимо минимизировать объем испарителя, который определяется объемом канала, по которому протекает жидкость в нем V , м^3 :

$$V = l_{\text{ис}} \cdot S, \quad (4.25)$$

где $l_{\text{ис}}$ – длина канала, м; S – поперечное сечение канала, м^2 .

Канал может иметь изгибы и повороты, при этом их влияние на теплообмен является малым. Основное требование, предъявляемое к форме канала – обеспечение равномерного распределения диоксида углерода по его длине.

На первом этапе расчета определяется средняя температура хладоносителя в испарителе $t_{\text{ср}}$, $^{\circ}\text{C}$. Ввиду её незначительного изменения по длине канала, характер изменения температуры может быть принят линейным, тогда $t_{\text{ср}}$ будет равно:

$$t_{\text{ср}} = \frac{1}{2} \cdot \Delta t + t_2, \quad (4.26)$$

где Δt – разность между температурами на входе и выходе испарителя, $^{\circ}\text{C}$; t_2 – требуемая температура на выходе из испарителя, $^{\circ}\text{C}$.

Как показали проведенные лабораторные исследования коэффициент теплоотдачи, определяемый из выражения (3.22), зависит от концентрации диоксида углерода в испарителе, объема и скорости движения газа.

Уравнение теплового баланса для испарителя имеет вид:

$$Q_x \cdot \rho_x \cdot C_x \cdot \Delta t = m_{\text{co2}} \cdot n_{\text{co2}} \cdot \alpha_{\text{co2cp}} \cdot (t_{\text{co2}} - t_{\text{ср}}), \quad (4.27)$$

где Q_x – расход хладоносителя через испаритель, $\text{м}^3/\text{с}$; ρ_x – плотность хладоносителя, $\text{кг}/\text{м}^3$; C_x – теплоемкость хладоносителя, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C})$; m_{co2} – масса

твердого диоксида углерода в испарителе, кг; n_{co2} – удельная площадь поверхности гранул твердого диоксида углерода, м²/кг; t_{co2} – температура сублимации твердого диоксида углерода, °C; α_{co2cp} – средний коэффициент теплоотдачи от гранул диоксида углерода к хладоносителю, Вт/(м²·°C).

Значение коэффициента теплоотдачи α_{co2cp} для водного раствора хлористого кальция, водного раствора этиленгликоля и этилового спирта определяется по графикам рисунка 3.10. Для других жидкостей данный коэффициент может быть получен из уравнения 3.22.

Масса диоксида углерода, загружаемая в испаритель в единицу времени m_{co2} , кг/с, определяется по выражению:

$$m_{co2} = \frac{Q_x \cdot \rho_x \cdot C_x \cdot \Delta t}{R}, \quad (4.28)$$

где R – скрытая теплота сублимации твердого диоксида углерода, Дж/кг.

Требуемый объем испарителя находится по зависимости:

$$V = \rho_l \cdot \frac{m_{co2}}{c_{co2}} \cdot 100\%, \quad (4.29)$$

где c_{co2} – концентрация твердого диоксида углерода в испарителе, %.

При изготовлении испарителя целесообразно сечение канала принимать не более трех площадей поперечного сечения магистрального трубопровода рассольной сети. По длине канала необходимо предусмотреть горизонтальные перегородки, не допускающие переноса гранул диоксида углерода вместе с течением жидкости, чтобы не допустить его попадания вместе с хладоносителем в рассольную сеть.

Концентрация твердого диоксида углерода в испарителе должна поддерживаться постоянной. Средняя концентрация диоксида углерода в испарителе может быть принята в диапазоне от 6 до 10%.

Частота загрузки твердого диоксида углерода в испаритель зависит от принятого возможного отклонения концентрации диоксида углерода от среднего значения. Приняв отклонение равным $\pm a\%$ время τ между загрузками определяется из выражения:

$$\tau = \frac{2 \cdot a \cdot R}{100\% \cdot n_{CO_2} \cdot \alpha_{CO_2_{cp}} \cdot (t_{CO_2} - t_{cp})}. \quad (4.30)$$

Величина a должна быть не более 2%. При её увеличении процесс теплообмена становится менее эффективным.

Возможная компоновка испарителя для охлаждения хладоносителя твердым диоксидом углерода показана на рисунке 4.6.

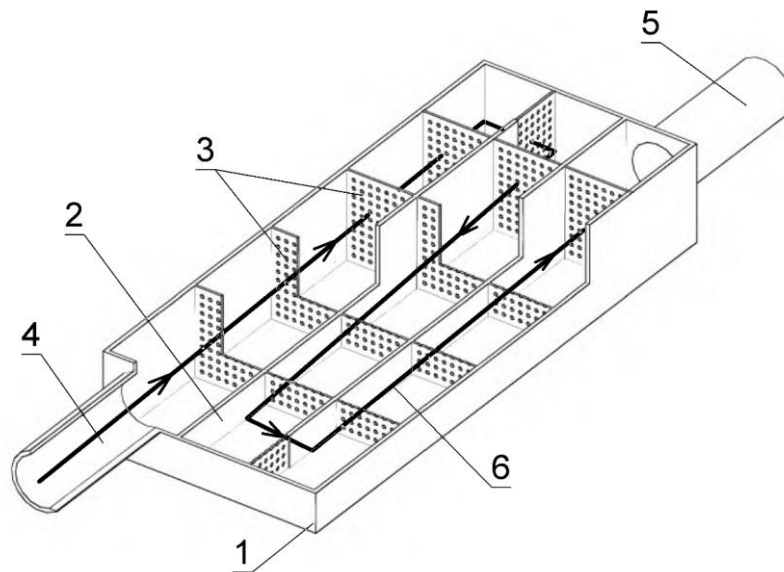


Рисунок 4.6 – Испаритель для охлаждения хладоносителя твердым диоксидом углерода: 1 – теплоизолированный внешний кожух; 2 – внутренние глухие перегородки; 3 – внутренние перфорированные перегородки; 4 – трубопровод забора хладоносителя; 5 – трубопровод подачи хладоносителя; 6 – линия тока жидкости в испарителе

4.6 Рекомендации по технологии производства работ по замораживанию грунтов твердым диоксидом углерода

Способ искусственного замораживания грунтов может быть реализован двумя путями: с доставкой твердого диоксида углерода, выработанного на специализированных заводах к месту производства работ, а также с выработкой твердого диоксида углерода непосредственно на строительной площадке из жидкой углекислоты с помощью специальных «сухоледных» установок.

При первом способе доставка твердого диоксида углерода производится в специальных изотермических контейнерах, которые представляют собой изолированные емкости с «двойными» стенками, пространство между которыми заполнено теплоизоляционным материалом.

Твердый диоксид углерода, обычно, производится двух видов: в брикетах или в гранулах различного диаметра.

Брикетируемый «сухой лед» на короткие расстояния может перевозиться в автосамосвалах, укрытый слоем плотной ткани. Доставка гранулированного диоксида углерода таким образом нежелательна [68].

При сроках хранения от 3 до 5 часов брикеты «сухого льда» можно хранить в штабелях на специально подготовленной площадке, укрытых белой плотной тканью, не допуская воздействия на них прямых солнечных лучей.

Изотермические контейнеры для местного хранения твердого диоксида углерода могут быть изготовлены непосредственно на строительной площадке. В качестве материала стенок, дна и крышки могут выступать деревянные доски, фанера или листовая сталь. Слой теплоизоляционного материала должен составлять не менее 100 мм и обладать коэффициентом теплопроводности не более $0.05 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$ [38]. Все стыки должны быть плотными и относительно герметичными. Наружная поверхность емкости должна быть выкрашена белой краской.

На основании анализа опыта промышленного внедрения, перед началом производства работ по замораживанию грунтов, а также в их процессе, рекомендуется иметь необходимый запас твердого диоксида углерода на 1–2 дня производства работ.

При производстве твердого диоксида углерода непосредственно на строительном объекте необходимо использовать специализированные транспортные и накопительные изотермические цистерны для жидкого диоксида углерода [39]. Необходимо иметь две независимых линии (независимые емкости для хранения, трубопроводы и грануляторы) по его производству, суммарной мощностью равной проектной.

В случае использования в качестве хладоносителя огне- и взрывоопасных незамерзающих жидкостей их количество и условия хранения должны быть определены из условия обеспечения безопасности производства работ.

При замораживании грунта с загрузкой твердого диоксида углерода в замораживающие колонки предпочтение следует отдавать гранулированному твёрдому диоксиду углерода. В противном случае частицы твердого диоксида углерода, полученные в результате дробления блоков, должны быть малыми (не более 20–50 мм). Дробление блоков должно производиться непосредственно перед загрузкой диоксида углерода в замораживающие колонки.

При расположении уровня грунтовых вод близко к поверхности, когда высота колонок не позволяет помещать в них достаточное количество диоксида углерода, на устье колонки устанавливаются специальные воронки-бункеры, объем которых позволит поддерживать уровень диоксида углерода выше уровня грунтовых вод в течение времени, достаточного для загрузки всех колонок силами, привлеченных к данной работе рабочих.

Наиболее благоприятные условия теплообмена будут достигаться при заполнении замораживающих колонок незамерзающей жидкостью. Заполнение производится после помещения твердого диоксида углерода в колонки. Таким образом, жидкость заполняет только пространство между гранулами.

Диаметр замораживающих колонок выбирается исходя из достижения необходимой скорости замораживания грунтов и технико-экономического сравнения вариантов. При меньшем диаметре замораживающих колонок расход диоксида углерода незначительно возрастает, в то время как стоимость бурения может отличаться существенно.

Для уменьшения влияния скорости потока грунтовых вод на процесс замораживания применяют следующие способы, как по отдельности, так и комбинированно [48]: расположение замораживающих колонок на более близком расстоянии друг от друга; использование многорядного замораживания; предварительный тампонаж грунта цементным, глинистым или глиноцементным раствором.

При наличии вблизи замораживаемой зоны откачки грунтовой воды, создающей дополнительное движение грунтовых вод, необходимо уменьшить интенсивность откачки, или при близком (до 10–30 м) расположении – её отключить.

Диоксид углерода при больших концентрациях в воздухе приводит к удушью, проблемам в работе легких, сердца [80]. Таким образом, его применение в закрытых пространствах (при замораживании грунтов из выработок) должно обосновываться в каждом конкретном случае при этом необходимо обеспечить приточно-вытяжную вентиляцию рабочей зоны.

Поскольку плотность углекислого газа больше плотности воздуха, на строительной площадке он будет скапливаться в низменных участках, таким образом, не рекомендуется производить работы по разработке грунта вблизи места производства работ по замораживанию грунта в активный его период, когда объёмы выделяемого газа значительны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная диссертация является научной квалификационной работой, в которой изложено решение научной задачи обоснования параметров технологии замораживания грунтов с использованием твердого диоксида углерода, обеспечивающих уменьшение сроков замораживания в 2–2.5 раза, ресурсосбережение и снижение стоимости замораживания малых объемов грунта до 15 % при строительстве городских подземных сооружений в сложных горно-геологических условиях.

Основные научные и практические результаты работы, полученные лично автором, заключаются в следующем:

1. Установлено, что при создании конструкции ледогрунтового ограждения замораживающими колонками, заполненными твердым диоксидом углерода, коэффициент теплоотдачи от стенки к твёрдому диоксиду углерода является степенной функцией от теплового потока, возрастающей с глубиной на верхних пяти метрах и не зависит от неё на большей глубине.
2. Разработана схема загрузки твердого диоксида углерода в замораживающие колонки, позволяющая путем изменения уровня твердого диоксида углерода в колонке в процессе активного замораживания управлять процессом образования ледогрунтового ограждения, тем самым создавать ограждение переменной по глубине толщины.
3. Доказана возможность применения программного комплекса COMSOL Multiphysics для моделирования и исследования процесса образования ледогрунтового ограждения вокруг замораживающих колонок с использованием твердого диоксида углерода.
4. Установлены зависимости для определения параметров технологии замораживания грунтов замораживающими колонками, заполненными твердым диоксидом углерода, позволяющие определить режим загрузки твердого диоксида

углерода в замораживающие колонки и время активного замораживания в произвольных горно-геологических условиях.

5. Обоснованы параметры комбинированной технологии замораживания грунтов, при которой хладоноситель охлаждается твердым диоксидом углерода в испарителе. Установлено, что в качестве хладоносителя при реализации данной технологии могут быть использованы жидкости на основе полидиметилсиликсана, этилбензола или органические спирты.

6. Обоснован новый вариант комбинированного способа замораживания, при котором испаритель включается в рассольную сеть совместно с компрессорной замораживающей станцией, что позволяет повысить мощность замораживающей станции, понизить температуру хладоносителя и обеспечить ресурсосбережение.

7. Разработана методика по определению площади поверхности теплообмена испарителя для охлаждения хладоносителя твердым диоксидом углерода при комбинированном способе замораживания грунтов.

8. Обоснованы направления для дальнейших исследований по совершенствованию технологии замораживания грунтов с использованием твердого диоксида углерода, позволяющие ускорить процесс образования ледогрунтового ограждения и снизить стоимость работ за счет последовательного соединения замораживающих колонок в группы и механизации процесса загрузки твердого диоксида углерода.

9. Разработаны Рекомендации по проектированию и производству работ по искусственному замораживанию грунтов с использованием твердого диоксида углерода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алюшин, Ю.А. Обоснование эффективности новой конструкции замораживающей колонки при строительстве подземных сооружений / Ю.А. Алюшин, А.В. Корчак, М.Н. Шуплик // Горный журнал. – 2015. – № 11. – С. 112 – 118.
2. Баранник, В.П. Низкотемпературные экологически чистые хладоносители / В.П. Баранник, Б.Т. Маринюк // Холодильная техника. – 2003. – №6. – С.14–15.
3. Барановский Н.В. Пластинчатые и спиральные теплообменники. – М.: Машиностроение, 1973. – 288 с.
4. Бахолдин, Б.В. Выбор оптимального режима замораживания в строительных целях / Б.В. Бахолдин. – М.: Госстройиздат, 1963. – 71 с.
5. Башмаков, В.М. Обоснование параметров технологии замораживания грунтов с учетом влияния теплового воздействия подземных коммуникаций и фильтрации подземных вод: дис. ... канд. тех. наук / В.М. Башмаков. – М., 1996. – 148 с.
6. Быков, А.В. Использование жидкого азота при сооружение ствола / А.В. Быков, В.Т. Хворостяной, Д.Т. Трофимов // Шахтное строительство. – 1982. – № 9. – С. 22–24.
7. Вакуленко, И.С. Анализ и перспективы развития способа замораживания горных пород в подземном строительстве / И.С. Вакуленко, П.В. Николаев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – №3, – С. 338–346.
8. Виноградов, С.Н. Выбор и расчет теплообменников: Учебное пособие / С.Н. Виноградов, К.В. Таранцев, О.С. Виноградов. – Пенза: Пензенский Государственный Университет, 2001. – 100 с.
9. ВСН 189-78 Инструкция по проектированию и производству работ по искусственному замораживанию грунтов при строительстве метрополитенов и тоннелей. – М.: Минтрансстрой, 1978. – 116 с.

10. Вялов, С.С. Расчеты на прочность и ползучесть при искусственном замораживании грунтов / С.С. Вялов, Ю.К. Зарецкий Ю.К., С.Э. Городецкий. – Л.: Стройиздат, 1981. – 199 с.
11. Гегель, Л.С. Выбор промежуточных хладоносителей / Л.С. Гегель, М.Л. Галкин // Холодильный бизнес. – 2005. – № 1. – С. 17–20.
12. Долгов, О.А. Методика расчета процесса замораживания горных пород при проходке стволов шахт способом замораживания на большую глубину / О.А. Долгов // Замораживание горных пород при проходке шахт / Под ред. Г.И. Маньковского. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – С. 9 – 64.
13. Дорман, Я.А. Искусственное замораживание грунтов при строительстве метрополитенов /Я.А. Дорман. – М.: Транспорт, 1971. – 272 с.
14. Дымент, О.Н. Гликоли и другие производные окисей этилена и пропилена / О.Н. Дымент, К.С. Казанский, А.М. Мирошенков; под общей ред. О.Н. Дымента. – М.: Химия, 1976. – 376 с.
15. Иоффе, И.Л. Проектирование процессов и аппаратов химической технологии /И.Л. Иоффе. – Л. : Химия, 1991. – 325 с.
16. Исаченко, В. П. Теплопередача / В.П. Исаченко, А.А, Осипова, А.С. Сукомел. – М.: Энергия, 1975. – 415 с.
17. Картозия, Б.А. Исследование механических процессов в породных массивах с искусственной неоднородностью, и разработка методов их прогнозирования в подземном строительстве: дис. ... д-ра. техн. наук /Б.А. Картозия. – М., 1979. – 372с.
18. Квашин, Г.М. Компьютерное моделирование термомеханических свойств замерзающей почвы / Г.М. Квашин, О.П. Квашина, Т.П. Сорокина // Вестник КрасГАУ. –2010. –№. 7. – С. 146–151.
19. Кириллов, В.В. Теоретические основы создания и оптимизации свойств хладоносителей для систем косвенного охлаждения: дис. ... д-ра. техн. наук /В.В. Кириллов. – СПб., 2009. – 306 с.
20. Киселев, В.Н. Искусственное замораживание грунтов / В.Н. Киселев, Е.А. Депланьи // Метро и тоннели. – 2003. – Спецвыпуск: Январь. – С. 18–23.

21. Кудинов, А.А. Техническая гидромеханика / А.А. Кудинов. – М.: Машиностроение, 2008. – 368 с.
22. Лебедев, Г.Д. Выбор нового хладоносителя для замораживания горных пород. / Г.Д. Лебедев // Труды ВНИИОМШС: Вопросы организации и механизации горнопроходческих работ. – 1974. – т.23. – с. 50–53.
23. Смирнов, В. И. Строительство подземных газонефтехранили / В.И. Смирнов. – М.: Газоилпресс, 2000. – 250 с.
24. Маньковский, Г.И. Специальные способы сооружения стволов шахт/ Г.И. Маньковский. – М.: Наука, 1965. – 316 с.
25. Методические рекомендации по замораживанию горных пород жидким азотом при проходке вертикальных стволов шахт / С.А. Съедин, В.Ф. Мозговой, В.Д. Качура, Д.П. Трофимов. – Белгород: ВИОГЕМ, 1985. – 45 с.
26. Мигай, В.К. Моделирование теплообменного энергетического оборудования / В.К. Мигай. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 264 с.
27. Михеев, М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев М.А., И.М. Михеева. – 2-ое изд., стереотип. –М.: Энергия, 1977. – 344 с.
28. Мишедченко, О.А. История развития способа искусственного замораживания пород / О.А. Мишедченко // Горный информационно - аналитический бюллетень. – 2010. – №2. – С. 226–231.
29. Мозговой, В.Ф. Параметры режима работы колонок при замораживании пород жидким азотом в шахтном строительстве: дис. ... канд. техн. наук / В.Ф. Мозговой. – Днепропетровск, 1982. – 130 с.
30. Насонов, И.Д. Замораживание фильтрующих горных пород /И.Д. Насонов. – М.: Недра, 1968. – 188 с.
31. Насонов, И.Д. Закономерности формирования ледопородных ограждений при сооружении стволов шахт / И.Д. Насонов, М.Н. Шуплик. –М.: Недра, 1976. – 237 с.
32. Никитушкин, Р.А. Обоснование параметров ресурсосберегающей технологии искусственного замораживания грунтов при строительстве городских

подземных сооружений: дис. ... канд. техн. наук /Р.А. Никитушкин. – М., 2011. – 130с.

33. Никифоров, К.П. Применение твердого холодоносителя («сухого льда») для искусственного замораживания грунта / К.П. Никифоров, В.Н. Киселев, Е.А. Депланьи // Подземное пространство мира. – 2000. – № 3. – С. 24–28.

34. Николаев, П.В. Опыт и перспективы развития ресурсосберегающих технологий замораживания грунтов в городском подземном строительстве /П.В. Николаев // Горный информационно - аналитический бюллетень. – 2014. – №2. – С. 367–371.

35. Николаев, П.В. Совершенствование технологии искусственного замораживания грунтов с использованием твердых криоагентов / П.В. Николаев // Горный информационно - аналитический бюллетень. – 2014. – №10. – С. 392 – 400.

36. Николаев, П.В. Математическое моделирование процесса искусственного замораживания грунтов с применением твердого диоксида углерода/ П.В. Николаев, М.Н. Шуплик // Горный информационно - аналитический бюллетень. – 2015. – № 11. – С. 243–251.

37. Николаев, П.В. Обоснование выбора промежуточного хладоносителя для искусственного замораживания грунтов / П.В. Николаев, М.Н. Шуплик // Горный информационно - аналитический бюллетень. – 2016. – №1. – С. 320–332.

38. Пименова, Т.Ф. Свойства, производство, применение и хранение диоксида углерода / Т.Ф. Пименова. –М.: АгроНИИТЭИММП, 1987. – 207 с.

39. Пименова, Т.Ф. Производство и применение сухого льда, жидкого и газообразного диоксида углерода / Т.Ф. Пименова. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. – 208 с.

40. Прочность и ползучесть мерзлых грунтов и расчеты ледогрунтовых ограждений/ С.С. Вялов, Г.В. Гмошинский, С.Э. Городоецкий, В.Г. Григорьева, и др. М.: Изд-во АН СССР, 1962. – 255 с.

41. Опыт применения азотного замораживания неустойчивых водонасыщенных грунтов при сооружении тоннеля инженерного коллектора в Москве / В.Г. Лернер,

- А.А. Рожков, М.Н. Шуплик, А.В. Грабарь // Подземное пространство мира. – 2000. – № 5–6. – С. 23–37.
42. Пржедецкий, Б.М., Об искусственном замораживании грунтов с позиции сегодняшнего дня / Б.М. Пржедецкий, Б.М. Бершицкий // Метро и тоннели. – 2007. – №2. –С. 33–34.
43. Перспективы технологии замораживания грунтов в подземном строительстве / М.Н. Шуплик, В.А. Плохих, К.П. Никифоров, В.Н. Киселев // Подземное пространство мира. – 2001. – № 4. – С. 28–38.
44. Применение искусственного замораживания грунтов при сооружении межтоннельной сбойки Серебряноборских тоннелей / И.Н. Тараненко, К.П. Никифоров, В.Н. Киселев и др.// Метро и тоннели. – 2008. – № 2. – С. 20–23.
45. Применение твердого холодоносителя, "сухого льда" для зонального замораживания грунтов на строительстве Лефортовского тоннеля / В.А. Плохих, К.П. Никифоров, В.Н. Киселев, Е.А. Депаньи // Метро и тоннели. – 2001. – №4. – С. 13–18.
46. Сивачёв А.Е. Повышение эффективности систем хладоснабжения с промежуточным хладоносителем: дис. ... канд.техн.наук /А.Е. Сивачев. – СПб., 2012. – 138 с.
47. Способ замораживания грунтов при строительстве подземных сооружений / М.Н. Шуплик, В.А. Плохих, К.П. Никифоров, В.Н. Киселев, В.Н. Борисенко: Патент РФ №2235827: МПК E02D3/115, E21D1/12., – 03 март 2003 г.
48. Справочник по сооружению шахтных стволов специальными способами / В.В. Давыдов, Е.Г. Дуда, А.И. Кавешников и др. ; под общ. ред. Н.Г. Трупака. – М.: Недра, 1980. – 391 с.
49. Справочник по теплообменникам: в 2 т. /пер. с англ. под ред. О.Г. Мартыненко. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
50. Справочник по теплообменным аппаратам / П. И. Бажан, Г. Е. Каневец, В. М. Селиверстов. и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 200 с.
51. Съедин, С.А. Временные методические рекомендации по определению оптимальных параметров технологии замораживания пород при сооружении

- стволов шахт / С.А. Съедин, Я.М. Адигамонов, И.Д. Насонов. – Белгород: ВИОГЕМ, 1978. – 30 с.
52. Съедин, С.А. Применение жидкого азота при сооружении вертикальных стволов шахт / С.А. Съедин // Шахтное строительство. – 1987. – №10. – С. 25–27.
53. Технология строительства подземных сооружений. Специальные способы строительства: ученик для ВУЗов / И.Д. Насонов, В.И. Ресин, М.Н Шуплик., В.А. Федюкин. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Изд. академии горн. наук, 1998. – 375 с.
54. Трупак, Н.Г. Замораживание горных пород при проходке стволов / Н.Г. Трупак. – М.: Углетехиздат, 1954. – 896 с.
55. Трупак, Н.Г. Замораживание грунтов в подземном строительстве / Н.Г. Трупак. – М.: Недра, 1974. – 280 с.
56. Трупак, Н.Г. Замораживание грунтов при строительстве подземных сооружений / Н.Г. Трупак. – М.: Недра, 1979. – 344 с.
57. Трупак, Н.Г. Замораживание пород при сооружении вертикальных шахтных стволов / Н.Г. Трупак. – М.: Недра, 1983. – 270 с.
58. Трупак, Н.Г. Применение жидкого кислорода для замораживания грунтов / Н.Г. Трупак // Шахтное строительство. – 1980. – № 1. – С. 19–20.
59. Тютюнник, П.М. Прочность и устойчивость замороженных горных пород / П.М. Тютюнник. – М. Недра, 1965. – 90 с.
60. Федотов, Е.Л. О температуре сублимации сухого льда / Е.Л. Федотов // Холодильная техника. – 1969. – № 5. – С. 12–15.
61. Федотов, Е.Л. Сублимация сухого льда в условиях конвективно-радиационного теплоотвода / Е.Л. Федотов // Холодильная техника. – 1970. – №1. – С. 37–41.
62. Федюкин, В.А. Проходка стволов шахт способом замораживания / В.А. Федюкин. – М.: Недра, 1968. – 350 с.
63. Фраас, А. Расчет и конструирование теплообменников / А. Фраас, М. Оцисик. – М.: Атомиздат, 1971. – 328 с.
64. Хакимов, Х.Р. Замораживание грунтов в строительных целях / Х.Р. Хакимов. – М.: изд-во лит. по строит., арх. и строит. мат., 1962. – 187 с.

65. Хаузен, Х. Теплопередача при противотоке, прямотоке и перекрестном токе / Х. Хаузен. – пер. с нем. – М.: Энергоиздат, 1981. – 384 с.
66. Химическая энциклопедия: в 5 т. – М.: Советская энциклопедия, 1988.
67. Шуплик, М.Н. Анализ специальных способов строительства подземных сооружений в городских условиях /М.Н. Шуплик // Горный информационно - аналитический бюллетень. – 2014. – № S1. – С. 523–546.
68. Шуплик, М.Н. Обоснование и разработка ресурсосберегающих технологий замораживания грунтов при строительстве городских подземных сооружений: дис. ... д-ра.техн.наук / М.Н. Шуплик. – М., 1989. – 318 с.
69. Шуплик, М.Н. Специальные способы строительства подземных сооружений /М.Н. Шуплик // Горный информационно - аналитический бюллетень. – 2013. –№ S1. – с. 595–625.
70. Шуплик, М.Н. Технология искусственного замораживания грунтов с применением твердых криоагентов в подземном строительстве /М.Н. Шуплик, В.Н. Борисенко // Горный информационно - аналитический бюллетень. – 2006. – №8. – С. 381–384..
71. Шуплик, М.Н. Исследование параметров процесса теплообмена при замораживании горных пород с применением твердого диоксида углерода / М.Н. Шуплик, П.В. Николаев // Горный информационно - аналитический бюллетень. – 2015. –№ 1. – С. 42–50.
72. Щекудов, Е.В. Проектирование специальных работ по обеспечению сохранности сооружений при проходке Лефортовского тоннеля /Е.В. Щекудов, О.С. Байдаков // Сб. науч. тр. «Специальные способы работ и материалы, используемые при сооружении городских транспортных тоннелей» –М.: ЦНИИС, 2003. – С. 84–98.
73. Яковлев, В.Н. Пути совершенствования способа замораживания водонасыщенных грунтов / В.Н.Яковлев // Метрострой. – 1983. –№ 7. – С. 12–14.
74. Acuña, J. Distributed thermal response tests - New insights on U-pipe and Coaxial heat exchangers in groundwater-filled boreholes: Doctoral thesis / J. Acuña – Stockholm: KTH School of Industrial Engineering and Management, 2013. – 141 p.

75. Andersland, O. Frozen Ground Engineering / O. Andersland, B. Ladanyi. – New Jersey: Wiley, 2004. – 384 p.
76. Bergeron, F. Simulation of Ground Heat Exchanger for Cryogenic Applications / F. Bergeron, P. Pasquier // Proc. COMSOL Conference. – Boston, 2013.
77. Côté, J. A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials / J. Côté, J. -M. Konrad // Canadian Geotechnical Journal. – 2005. – Vol. 42. – P. 443–458.
78. Côté, J. Thermal conductivity of base-course materials / J. Côté, J. -M. Konrad // Canadian Geotechnical Journal. – 2005. – Vol. 42. – P. 61–78.
79. Clark, B.R. Martian Glaciation and the Flow of Solid CO₂ / B.R. Clark, R.P. Mullin // ICARUS. – 1976. – Vol. 27. – P. 215–228.
80. Dunford, J.V. Asphyxiation due to dry ice in a walk-in freezer / J.V. Dunford, J. Lucas, N. Vent etc. // The Journal of Emergency Medicine. – 2009. – Vol. 36. – № 4. – P. 353–356.
81. Eppner, F. Development of a Thermo-Hydro-Geochemical Model for Low Temperature Geoexchange Applications / F. Eppner, P. Pasquier, P. Baudron // Proc. COMSOL Conference. – Boston, 2015.
82. Frivik, P.E. Ground freezing: thermal properties, modelling of processes and thermal design. State-of-the-art report. / P.E. Frivik // Engineering Geology. – 1981. – Vol. 18. – P. 115–133.
83. Frivik, P.E. Thermal design of artificial soil freezing system / P.E. Frivik, E. Thorbergsen // Proc. 2nd ISFG, Thondneim. – 1980. – Vol. 1. – P. 556–567.
84. Gallavresi, F. Ground freezing— the application of the mixed method (brine— liquid nitrogen) / F. Gallavresi // Engineering Geology. – 1981. – Vol. 18. – №1–4. – P. 361–375.
85. Harris, J.S. Ground freezing in practice / J.S. Harris. – London: Thomas Telford, 1995. – 264 p.
86. Hu, X. -D. Equivalent parabolic arch method of average temperature calculation for straight double-row-pipe frozen soil wall / X.- D. Hu, F. Zhao, S. She, C. Shu // Journal of the China Coal Society. – 2012. – Vol. 37. – P. 28–32.

87. Hu, X.-D. Analytical solution to steady-state temperature field of single-circle-pipe freezing. / X.-D. Hu, J. Chen, Y. Wang, W.-P. Li. // J. Shanghai Jiaotong Univ. – 2013 – Vol. 18. – № 6. – P. 706–711.
88. Ladanyi, B. Stress transfer mechanism in frozen soils / B. Ladanyi // In Proc. of the 10th Canadian Cong. of App. Mech. – 1985. – P. 11–23.
89. Ladanyi, B. Mechanics of freezing and thawing in soil / B. Ladanyi, M. Shen // Frost in geotechnical engineering. – 1989. – Vol. 1. – P. 73–103.
90. Li, Q. COMSOL Multiphysics: A Novel Approach to Ground Water Modeling / Q. Li, K. Ito, C.S. Lowry, S.P. Loheide // Ground water. – 2009. – Vol. 47. – № 4. – P. 480–487.
91. Nikolaev, P. Energieeffiziente Technologien der Verfestigung von wasserführendem Baugrund mit festem Kühlmittel / P. Nikolaev, A. Serova, M. Shuplik // RDB e.V. Bergbau. – 2015. – №8. – P. 357–359.
92. Nikolaev, P.V. Advanced technology of ground improvement - artificial ground freezing with using solid carbon dioxide / P.V. Nikolaev, M.N. Shuplik // TU Bergakademie Freiberg: collected works of “10 Freiberg – St. Petersburger Kolloquium junger Wissenschaftler” – Freiberg, 2015. – P. 73–78.
93. Porcellinis, P. Brine substitute liquids for soil freezing at very low temperatures / P. Porcellinis, J.L. Rojo // Engineering Geology. – 1981. – Vol. 18. – P. 203–210.
94. Salomone, L.A. Thermal performance of soils / L.A. Salomone, W.D. Kovacs // Journal of the Geotechnical Engineering Division. – 1984. – Vol. 110. – №3. – P. 359–374.
95. Sanger, F.J. Thermal and rheological computations for artificially ground constriction / F.J. Sanger, F.H. Sayles // Proc. 1st ISGF, Bochum, – 1979. – Vol. 2. – P. 95–118.
96. Schmall, P.C. Ground freezing in a congested urban area / P.C. Schmall, J.A. Sopko // Geostrata - geoinstitute of ASCE. – 2014. – Vol. 18. – № 3. – P. 28–32.
97. Shah, R.K. Fundamentals of Heat Exchanger Design / R.K. Shah, D.P. Sekulic. – New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2003. – 976 p.

98. Stoss , K. Uses and limitations of ground freezing with liquid nitrogen / K. Stoss, J. Valk // Engineering geology. – 1979. – Vol. 13. – №1–4. – P. 485–494.
99. Thulukkanam, K. Heat Exchanger Design Handbook / K. Thulukkanam. Boca Raton: CRC Press, 2013. – 1260 p.
100. Zanchini, E. Effects of flow direction and thermal short-circuiting on the performance of small coaxial ground heat exchangers / E. Zanchini, S. Lazzari, A. Priarone // Renewable Energy. – 2010. – Vol. 35. – № 6. – P. 1255–1265.