

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»

**Автореферат**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

**Москва**

**2016**

Работа выполнена в федеральном государственном автономном  
образовательном учреждении высшего образования  
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»  
(НИТУ «МИСиС»)

Научный руководитель: ШУПЛИК Михаил Николаевич,  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: СМИРНОВ Вячеслав Иванович,  
доктор технических наук, профессор,  
советник Союза золотопромышленников

ЩЕКУДОВ Евгений Владимирович,  
кандидат технических наук, доцент,  
директор филиала АО ЦНИИС «НИЦ «Тоннели и  
метрополитены»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Санкт-Петербургский горный  
университет»

Защита диссертации состоится «22» сентября 2016 г. в 14 часов 30 мин на  
заседании диссертационного совета Д 212.132.16 при НИТУ «МИСиС» по адресу:  
119049, Москва, Ленинский проспект, д. 6., стр. 2, ауд. А-305.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке  
НИТУ «МИСиС» и на сайте НИТУ «МИСиС» ([www.old.misis.ru](http://www.old.misis.ru)).

Автореферат диссертации разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор



Вознесенский  
Александр Сергеевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Одной из проблем при строительстве подземных сооружений являются грунтовые воды, которые препятствуют ведению горно-строительных работ. Как показали исследования, до 27 % всех подземных сооружений в г. Москве возводятся в неустойчивых обводненных грунтах, требующих применения специальных способов строительства.

Многолетний опыт показывает, что одним из эффективных специальных способов строительства является способ искусственного замораживания грунтов. Наиболее широкое распространение получил рассольный способ замораживания с применением передвижных замораживающих станций мощностью от 100 до 200 кВт (типа ПХС-100/ТНТ-100/200).

Технология замораживания грунтов в условиях города имеет ряд принципиальных особенностей по сравнению с шахтным строительством: малый объем замораживаемого грунта (до 300–400 м<sup>3</sup>); зачастую высокие скорости фильтрации грунтовых вод (свыше 2 м/сутки); наличие локальных источников тепла (коллекторов, теплотрасс и др.), имеющих температуру, иногда превышающую 50 °С; химическое загрязнение грунтовых вод, значительно снижающее температуру их замерзания (до -20 °С). Кроме того, способ замораживания грунтов в городских условиях часто применяется при ликвидации различных аварийных ситуаций, возникающих при прорыве воды и грунта в строящиеся выработки.

Применение в таких условиях рассольного способа замораживания не всегда эффективно. Так, при уменьшении объема замораживаемого грунта с 700 до 150 м<sup>3</sup> стоимость замораживания 1 м<sup>3</sup> увеличивается в 3–5 раз. Недостаточно низкая температура хладоносителя при рассольном замораживании зачастую не позволяет замораживать фильтрующие грунты и подземные воды с низкой температурой замерзания.

В таких условиях для замораживания грунтов целесообразно использовать безрассольные способы замораживания, в частности, способ замораживания грунтов с использованием твердого диоксида углерода («сухого льда»).

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 дальнейшего совершенствования технологии и её реализации. 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  $1 \text{ м}^2$  поверхности замораживающей колонки, пропорционален теплопроводности замороженного грунта и снижается с ростом ледогрунтового ограждения от  $10\text{--}16 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  в начальный период до  $3\text{--}6 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  при толщине ограждения  $1.5\text{--}2 \text{ м}$ .

2. Установлено, что количество твердого диоксида углерода, необходимое для создания  $1 \text{ м}^3$  конструкции ледогрунтового ограждения, является постоянной величиной при толщине ограждения до  $0.6\text{--}0.8 \text{ м}$ , лежащей в диапазоне от  $250$  до  $380 \text{ кг}/\text{м}^3$  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 твердому 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.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В последние годы для строительства подземных сооружений в сложных гидрогеологических условиях успешно прошла апробацию и внедрена безрассольная технология замораживания грунтов с использованием твердого диоксида углерода («сухого льда»), которая реализуется двумя принципиально различными способами: с непосредственной загрузкой твердого диоксида углерода в замораживающие колонки (рисунок 1); комбинированным способом, при котором твердый диоксид углерода загружается в специальный испаритель, служащий для охлаждения жидкого хладоносителя, циркулирующего по гидравлической сети, аналогичной рассольному замораживанию (рисунок 2).

Проведенный анализ показал, что по ряду параметров (низкая температура замораживания, простота организации работ, низкая материалоемкость) данные способы превосходят способ рассольного замораживания, особенно при замораживании малых объёмов грунта.

Исследованиями, направленными на развитие искусственного замораживания грунтов, занимались многие исследователи, в частности И.В. Баклашов, С.С. Вялов, Я.А. Дорман, О.А. Долгов, Ю.К. Зарецкий, Б.А. Картозия, Ю.М. Либерман, Г.И. Маньковский, В.Ф. Мозговой, И.Д. Насонов, В.И. Смирнов, Н.Г. Трупаков, Б.А. Тютюнник, В.А. Федюкин, Х.Р. Хакимов, Н.Ф. Цытович, М.Н. Шуплик, Е.В. Щекудов, В.Н. Яковлев, О.Б. Андерсланд, С.Е. Дукаревич, Х.В. Фривик, Дж.С. Харрис, С. Ху, Б. Ладани, К. Стосс и др.

Фундаментальные теоретические основы способа замораживания с использованием твердого диоксида углерода заложил М.Н. Шуплик. Опыт

дальнейшего практического внедрения способа нашел отражение в работах В.А. Плохих, К.П. Никифорова, В.Н. Киселева, Е.А. Деplanьи.

Однако объем выполненных ранее исследований недостаточен, и сделанные в них выводы о характере теплообмена между массивом грунта и замораживающими колонками, заполненными твердым диоксидом углерода, и параметрах технологии замораживания справедливы только для одного типа грунта, что не обеспечивает достаточной точности при проектировании замораживания массива с произвольными теплофизическими свойствами.

Опытно-промышленное внедрение способа замораживания с использованием твердого диоксида углерода было проведено на 5 объектах, где замораживалось от десятков до 800 м<sup>3</sup> грунта. Удельный расход твердого диоксида углерода на замораживание 1 м<sup>3</sup> грунта при этом составлял от 160 до 800 кг/м<sup>3</sup>. Столь широкий диапазон изменения расхода твердого диоксида углерода связан с недостаточно отработанной технологией замораживания и отсутствием рекомендаций по проектированию основных технологических параметров процесса замораживания грунтов с применением твердого диоксида углерода.

По результатам анализа опыта промышленного внедрения и литературных источников были сформулированы задачи, решение которых позволит достичь поставленной в работе цели. В частности, необходимо обосновать новые технологические схемы замораживания грунтов с использованием твердого

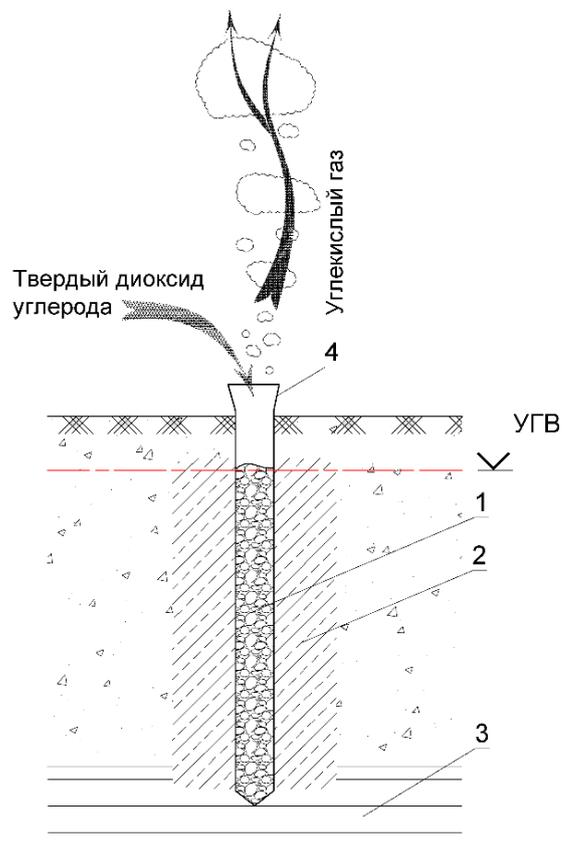


Рисунок 1 – Способ замораживания грунтов замораживающими колонками, заполненными твердым диоксидом углерода: 1 – твердый диоксид углерода; 2 – ледогрунтовый цилиндр; 3 – водоупорный пласт; 4 – замораживающая колонка

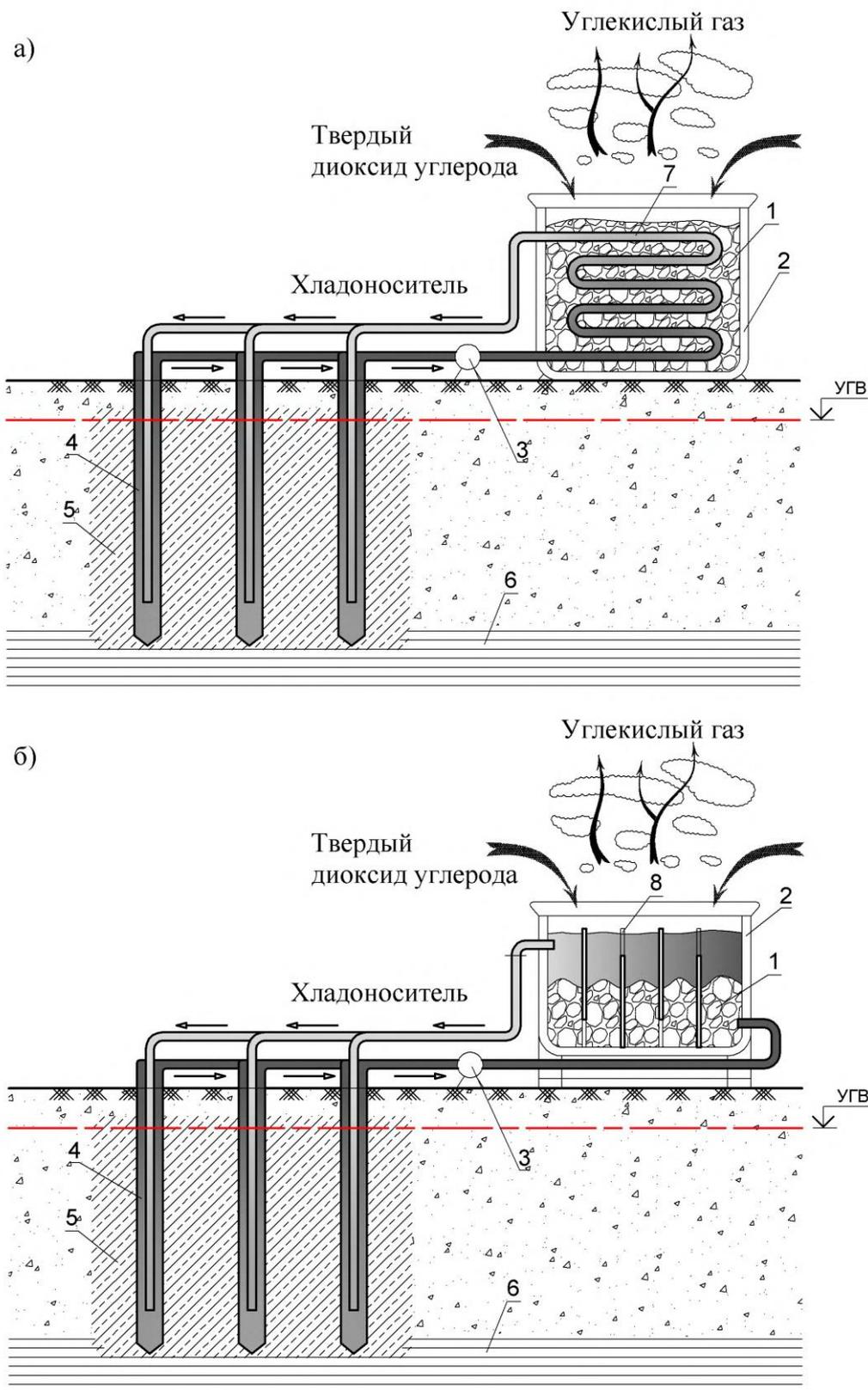


Рисунок 2 – Комбинированный способ замораживания грунтов с использованием твёрдого диоксида углерода (*а* – трубный испаритель; *б* – испаритель с непосредственной теплопередачей от твердого диоксида углерода к хладоносителю): 1 – твердый диоксид углерода; 2 – испаритель; 3 – насос рассольной сети; 4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

диоксида углерода и конструкции испарителей для комбинированного способа замораживания, необходимо исследовать процесс теплопередачи от твердого диоксида углерода к стенке замораживающей колонки, к змеевику испарителя и незамерзающей жидкости, обосновать методику определения параметров технологии замораживания грунтов твердым диоксидом углерода.

Для решения задачи по исследованию процесса теплопередачи от твердого диоксида углерода к стенке замораживающей колонки в работе произведен анализ процесса теплообмена между массивом грунта и твердым диоксидом углерода, помещенным в одиночную замораживающую колонку.

Схема процесса теплообмена между гранулами твердого диоксида углерода и стенкой колонки показана на рисунке 3. Гранулы твердого диоксида углерода 1, загруженные в колонку, касаются стенки колонки 4 по некоторой площади 3. В результате притока тепла от массива замораживаемого грунта 5 гранулы сублимируют на контакте со стенкой, образуя тонкую газовую прослойку в местах контакта. В то же время под нагрузкой от вышележащих слоев твердого диоксида углерода гранулы вновь прижимаются к стенке. От той части поверхности стенки колонки, которая не касается гранул твердого диоксида углерода, происходит конвективная теплоотдача к потоку углекислого газа 2, образовавшегося в результате сублимации твердого диоксида углерода в нижележащих слоях. Таким образом, количество тепла, поступающее к колонке в единицу времени  $Q$ , Вт, может быть представлено в виде суммы независимых слагаемых:

$$Q = q_{ст}S_0 = q_{гр}S_k + q_{г}(S_0 - S_k), \quad (1)$$

где  $q_{ст}$  – тепловой поток от массива грунта к стенке замораживающей колонки, Вт/м<sup>2</sup>;  $q_{гр}$  – тепловой поток к гранулам диоксида углерода, Вт/м<sup>2</sup>;  $q_{г}$  – тепловой поток к восходящему по колонке газу, Вт/м<sup>2</sup>;  $S_0$  – площадь поверхности колонки, м<sup>2</sup>;  $S_k$  – площадь поверхности контакта гранул со стенкой, м<sup>2</sup>.

Как показали расчёты, величина теплового потока от стенки колонки к восходящему газу много меньше величины теплового потока к гранулам твердого диоксида углерода. Тогда слагаемым  $q_{г}(S_0 - S_k)$  в уравнении (1) можно пренебречь. Толщина газовой прослойки на контакте гранул со стенкой мала,

тогда её термическое сопротивление является незначительным, и температура стенки в местах контакта равна температуре твердого диоксида углерода  $t_{CO_2} = -78.9 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Таким образом, тепловой поток от массива грунта к замораживающей колонке  $q_{ст}$  может быть представлен пропорциональным тепловому потоку  $\widehat{q}_{ст}$ , Вт, к замораживающей колонке с постоянной температурой стенки  $-78.9 \text{ } ^\circ\text{C}$ :

$$q_{ст} = n \cdot \widehat{q}_{ст}, \quad (2)$$

где  $n = S_k/S_0$ .

При рассмотрении процесса теплообмена в замораживающей колонке с учетом введения среднего по всей её поверхности термического сопротивления была получена зависимость для определения коэффициента теплоотдачи от стенки колонки к твердому диоксиду углерода  $\alpha$ , Вт/( $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ), от теплового потока  $q_{ст}$ :

$$\alpha = \frac{1}{t_{CO_2}(1-n)} q_{ст}. \quad (3)$$

Из выражения (2) следует, что величина теплового потока от массива грунта, воспринимаемого замораживающей колонкой, заполненной твердым диоксидом углерода, определяется площадью контакта гранул со стенкой.

Значение параметра  $n$  может также определяться как  $n = (1 - P)$ , где  $P$  – коэффициент пустотности структуры гранул твердого диоксида углерода. Для цилиндрических гранул правильной формы  $n = 0.91$ .

Площадь контакта гранул твердого диоксида углерода со стенкой колонки возрастает с глубиной из-за уплотнения структуры гранул в результате их разрушения под действием массовых сил от вышележащих слоев диоксида углерода. В работе показано, что при увеличении глубины до 20 м возрастание коэффициента теплоотдачи в результате этого составит не более чем 10 %.

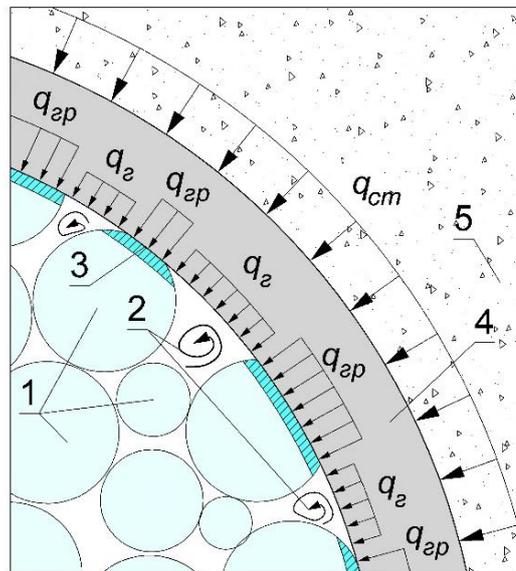


Рисунок 3 – Схема процесса теплообмена через стенку замораживающей колонки, заполненной твердым диоксидом углерода

При комбинированном способе замораживания применение в качестве хладоносителя водного раствора хлористого кальция не позволяет достичь минимально возможной температуры (-70...72 °С), так как его температура кристаллизации не ниже -55 °С. Таким образом, для комбинированного способа замораживания необходимо подобрать другой хладоноситель. Для выбора хладоносителя в работе предложены два критерия, позволяющих выполнить комплексную оценку его теплофизических свойств:

- $K_\alpha$  – критерий оценивающий теплопередающие свойства хладоносителя:

$$K_\alpha = 0.31 \cdot \lambda^{0.57} \cdot \rho^{0.52} \cdot \eta^{-0.09} \cdot C_p^{0.43} \cdot \beta^{0.1}, \quad (4)$$

где  $\lambda$  – теплопроводность, Вт/(м·°С);  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $C_p$  – удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С);  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости, Па·с;  $\beta$  – коэффициент объемного расширения, °С<sup>-1</sup>;

- $K_e$  – критерий оценивающий энергетические затраты на перекачивание хладоносителя по трубам:

$$K_e = 640 \cdot \eta. \quad (5)$$

По указанным критериям произведено сравнение 19 хладоносителей с различными температурами кристаллизации, которое показало, что для комбинированного способа замораживания могут быть рекомендованы хладоносители на основе полидиметилсиликсана или этилбензола.

В соответствии с поставленными задачами выполнены две серии лабораторных экспериментов, направленных на исследование процесса теплопередачи с использованием гранулированного твердого диоксида углерода.

В рамках первого направления лабораторных экспериментов исследовался процесс теплопередачи в замораживающей колонке, заполненной твердым диоксидом углерода, в зависимости от глубины замораживания. Целью данного направления являлось определение изменения коэффициента теплоотдачи от стенки замораживающей колонки к гранулированному твердому диоксиду углерода как функции от теплового потока и глубины.

Разработанный лабораторный стенд (рисунок 4), представлял собой две концентрические трубы. Первая труба 4 была выполнена из пластика ПВХ диаметром 160 мм и толщиной стенки 3.6 мм, вторая труба 2 выполнена из стали

диаметром 102 мм и толщиной стенки 1 мм. Кольцевой зазор между ними заполнен цементно-песчаным раствором 3. Внешняя труба по всей ее поверхности покрыта слоем теплоизоляционного материала 5 толщиной 30 мм. По длине трубы в трех горизонтальных сечениях были установлены термодатчики 6. В каждом сечении было установлено по три термодатчика на различном расстоянии от оси трубы, что позволяло фиксировать изменения температурного поля в межтрубном пространстве. В процессе опытов твердый диоксид углерода 1 загружался во внутреннюю трубу.

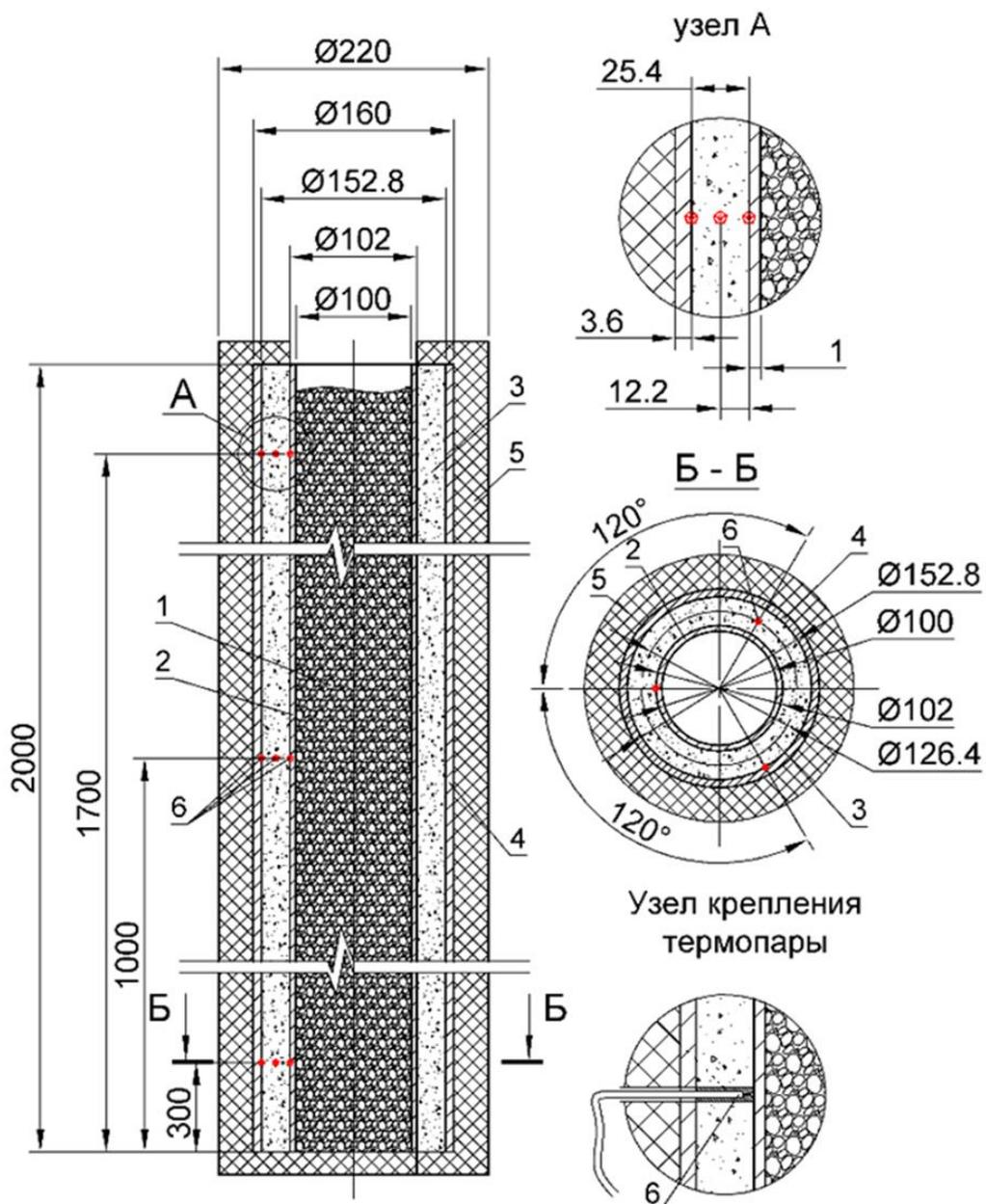


Рисунок 4 – Экспериментальная установка для исследования теплопередачи от замораживающей колонки к твердому диоксиду углерода

Для моделирования глубины замораживания на гранулы твердого диоксида углерода устанавливался специальный пригруз, создающий нагрузку от вышележащих слоёв диоксида углерода. Масса пригрузов была выбрана соответствующей высоте столба твердого диоксида углерода, равной 1.5 и 2.65 м. Таким образом, при их установке на гранулы твердого диоксида углерода в основании исследуемой замораживающей колонки создавались условия, приближенные к наблюдаемым в замораживающей колонке длиной 3.5 и 4.65 м в зависимости от массы пригруза.

По результатам обработки полученных экспериментальных данных был построен график изменения среднего коэффициента теплоотдачи по глубине от устья колонки для различных значений теплового потока (рисунок 5).

Как видно из рисунка, величина коэффициента теплоотдачи наиболее резко возрастает на первых 2.5–3 м и далее выполаживается, принимая вблизи отметки 4 м практически не зависящее от глубины значение. На основании этого можно прогнозировать, что на глубине более 5 м значение коэффициента теплоотдачи от глубины зависеть не будет. Экспериментальные точки хорошо аппроксимируются следующей степенной зависимостью от теплового потока  $q_{ст}$  и глубины  $x$ , м:

$$\alpha = \begin{cases} 0.63 \cdot q_{ст}^{0.7} \cdot \sqrt{1 - 0.04(x - 5)^2} & , \text{при } x \leq 5 \\ 0.63 \cdot q_{ст}^{0.7} & , \text{при } x > 5 \end{cases} \quad (6)$$

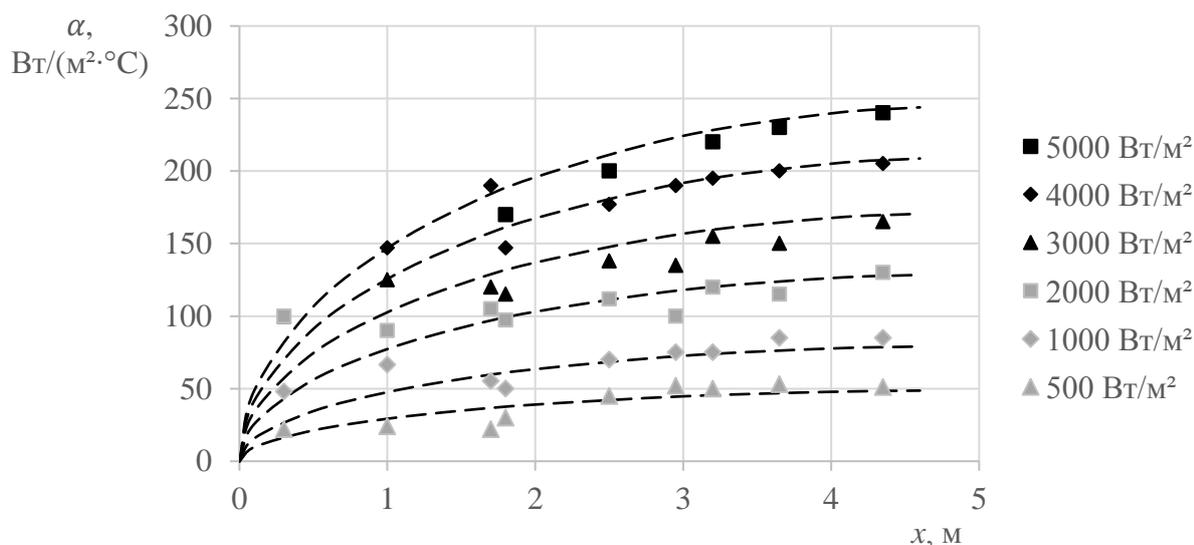


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  от глубины колонки  $x$  для различных значений теплового потока

Сравнение полученной из эксперимента зависимости (6) и полученной теоретически зависимости (3) показывает, что они являются близкими при величине теплового потока от 500 до 1500 Вт/м<sup>2</sup> и значении коэффициента  $n$ , равного 0.93. Расхождение при больших значениях теплового потока может объясняться тем, что при величине теплового потока больше 1500 Вт/м<sup>2</sup> на контакте гранул со стенкой образуется значительный объем углекислого газа, приводящий к возникновению на площадках контакта термического сопротивления, которое не учитывалось зависимостью (3).

Для определения параметров испарителя для комбинированного способа замораживания (рисунок 2б) была проведена вторая серия экспериментальных исследований, целью которой являлось определение коэффициента теплоотдачи от хладоносителя к твердому диоксиду углерода при их контакте в испарителе.

В качестве хладоносителей были выбраны три жидкости с различными теплофизическими свойствами: водный раствор хлористого кальция, водный раствор этиленгликоля и этиловый спирт. Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 6.

В процессе проведения опытов заданное количество твердого диоксида углерода  $I$  помещалось в цилиндрическую ёмкость 3 диаметром  $L = 200$  мм и высотой  $H = 200$  мм, заполненную жидкостью 2, установленную на весы 5. Концентрация твердого диоксида углерода в емкости поддерживалась постоянной. В результате теплообмена температура жидкости понижалась. Изменения температуры фиксировались тремя термодатчиками 4.

В результате проведения экспериментов были получены зависимости изменения температуры жидкости в емкости во времени, которые позволили определить величину теплового потока от гранул твердого диоксида углерода к жидкости и величину коэффициента теплоотдачи.

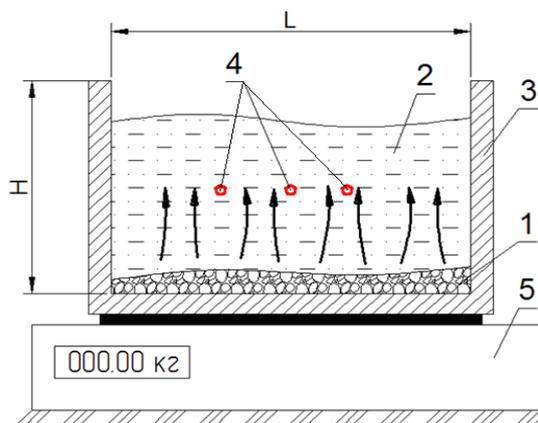


Рисунок 6 – Схема экспериментальной установки для определения коэффициента теплоотдачи от хладоносителя к твердому диоксиду

Значения коэффициента теплоотдачи, полученные в опытах, в зависимости от температуры жидкости и концентрации твердого диоксида углерода в ёмкости для одной из жидкостей представлены на рисунке 7. Для других жидкостей результаты качественно совпадают. Значения коэффициента теплоотдачи возрастают пропорционально концентрации твердого диоксида углерода в ёмкости и снижаются с уменьшением температуры до 30 % при концентрации 2 % и до 45 % при концентрации 10 %.

Результаты экспериментальных исследований были обработаны с использованием методов теории подобия, что позволило получить критериальное уравнение, позволяющее определить коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  в зависимости от свойств жидкости и концентрации твердого диоксида углерода в ней:

$$Nu = 0.4 \cdot Pe^{0.7} \quad (7)$$

где  $Nu = \alpha \cdot d / \lambda$  – число Нуссельта;  $Pe = C_p \cdot \gamma \cdot w \cdot d / \lambda$  – числе Пекле;  $d$  – средний диаметр гранул твердого диоксида углерода в емкости, м;  $w$  – скорость отвода газа из емкости, пропорциональная концентрации твердого диоксида углерода, м/с.

Рассчитанные при помощи зависимости (7) значения коэффициента теплоотдачи представлены на рисунке 7 пунктирными линиями.

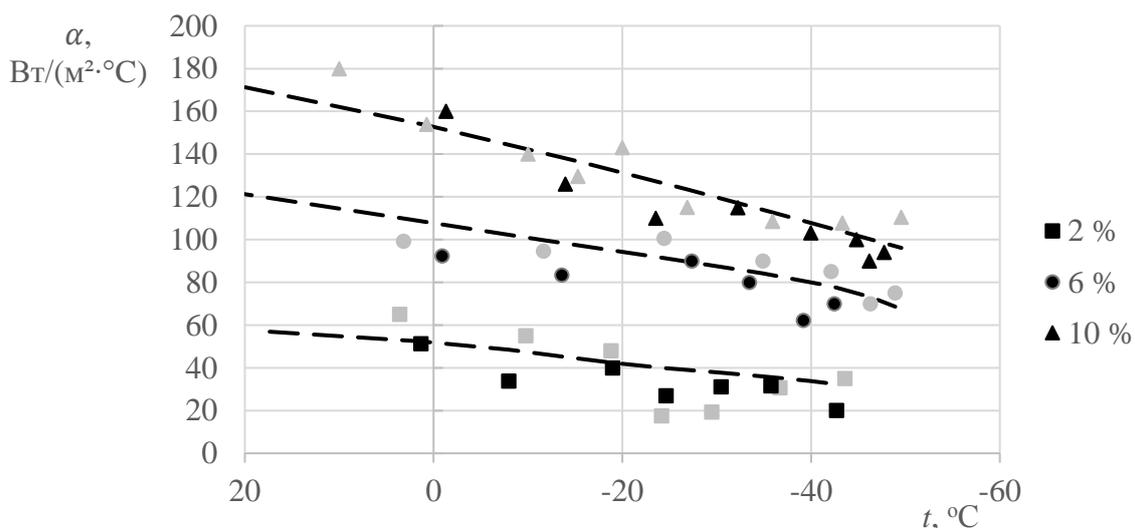


Рисунок 7 – Значения коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  от хладоносителя (водного раствора этиленгликоля) к твердому диоксиду углерода (с массовой концентрацией 2 %, 6 % и 10 %) в зависимости от температуры хладоносителя  $t$

Полученные результаты по определению коэффициента теплоотдачи от твердого диоксида углерода к колонке не позволяют в целом оценить характер изменения параметров технологии замораживания. Для этой цели произведено математическое моделирование процесса замораживания грунтов с использованием твердого диоксида углерода в программном комплексе COMSOL Multiphysics.

Для доказательства возможности применения и достоверности данного программного комплекса для моделирования процесса замораживания грунтов с использованием твердого диоксида углерода выполнено моделирование лабораторных экспериментов, проведенных в рамках данного исследования, и экспериментов, проведенных ранее другими авторами. Сравнение результатов моделирования с данными экспериментальных исследований показало удовлетворительное их совпадение (отклонение математического решения от экспериментальных данных не превысило 10 % для значений теплового потока и коэффициента теплоотдачи). Это доказывает возможность применения данного программного комплекса для моделирования процесса искусственного замораживания грунтов с использованием твердого диоксида углерода.

По результатам проведенного моделирования оценивалась динамика образования ледогрунтового ограждения в различных геологических условиях, оценивался диапазон изменения параметров процесса замораживания (температуры стенки колонки, расхода твердого диоксида углерода) при увеличении ледогрунтового ограждения и изменении расстояния между замораживающими колонками.

Было выполнено моделирование процесса замораживания грунтов, характерных для городского подземного строительства (песков, супесей и суглинков), с весовой влажностью 10 % и 20 %, одиночной замораживающей колонкой и группой замораживающих колонок, заполненных твердым диоксидом углерода.

Основные результаты моделирования представлены на рисунках 8–10.

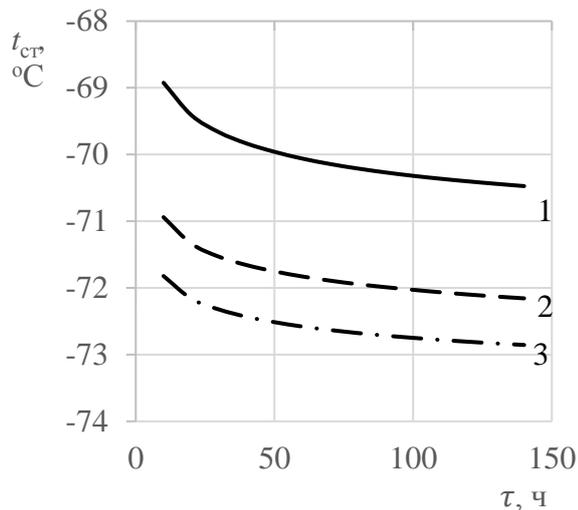


Рисунок 8 – Изменение температуры стенки колонки  $t_{\text{ст}}$  во времени  $\tau$ : 1 – глубина 1 м, 2 – 3 м, 3 – 5 м

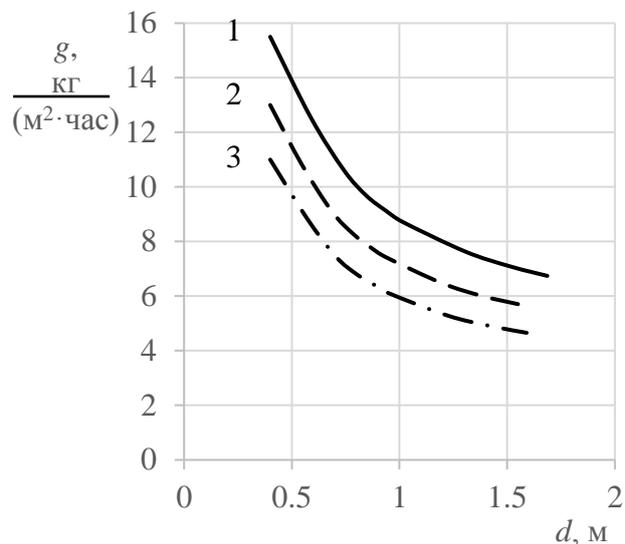


Рисунок 9 – Изменение часового расхода твердого диоксида углерода  $g$  с ростом диаметра ледогрунтового цилиндра  $d$ : 1 – песок, 2 – супесь, 3 – суглинок

На рисунке 8 представлен график изменения температуры стенки колонки в процессе замораживания для супеси. Результаты для других исследуемых грунтов отличались незначительно. Из графика видно, что температура стенки уменьшается с увеличением глубины на верхних пяти метрах на 6–8 °С – до температуры минус 72–74 °С, и далее от глубины не зависит. В процессе роста ледопородного ограждения температура стенки колонки снижается в течение первых суток замораживания на 3–5 °С, дальнейшее уменьшение температуры в процессе образования ограждения не превышает 1 °С.

Часовой расход твердого диоксида углерода  $g$ ,  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ , определялся как частное от деления теплового потока от массива грунта к колонке на скрытую теплоту сублимации твердого диоксида углерода. Изменение часового расхода твердого диоксида углерода, отнесенного к 1  $\text{м}^2$  площади поверхности колонки, в процессе роста ледогрунтового ограждения для различных горно-геологических условий показано на рисунке 9. Анализ графика показывает, что часовой расход твердого диоксида углерода пропорционален теплопроводности замороженного грунта и снижается с ростом толщины ледогрунтового ограждения от 10–16  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  в начальный период до 3–6  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  при толщине ограждения 1.5–2 м.

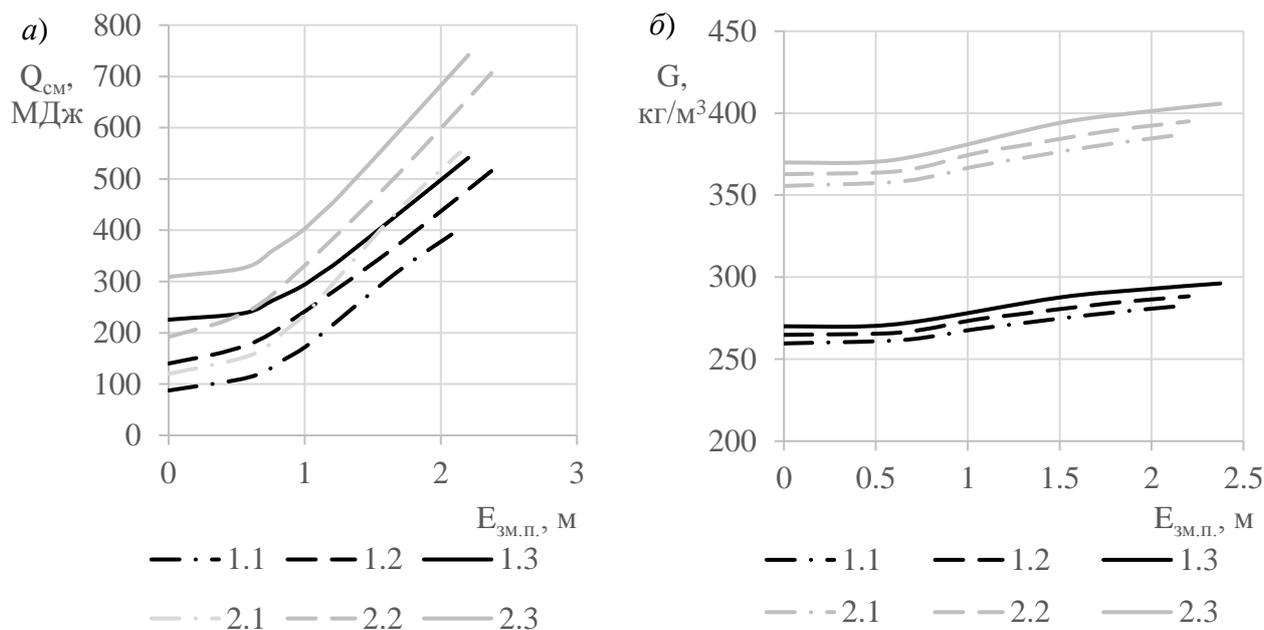


Рисунок 10 – Изменение суммарного теплопритока к замораживающей колонке  $Q_{см}$  (а) и удельного расхода твердого диоксида углерода  $G$  (б) в зависимости от толщины ограждения в замковой плоскости  $E_{з.п.}$ : 1.1, 1.2, 1.3 – весовая влажность 10 %, 2.1, 2.2, 2.3 – весовая влажность 20 %

При моделировании процесса замораживания грунтов группой замораживающих колонок, заполненных твердым диоксидом углерода (рисунок 10) расстояние между колонками  $l$ , м, принималось равным 0.9 м (кривые 1.1, 2.1), 1.1 м (кривые 1.2, 2.2) и 1.3 м (кривые 1.3, 2.3).

По результатам моделирования определены зависимости изменения суммарного теплопритока к замораживающей колонке  $Q_{см}$ , МДж, в процессе увеличения ледогрунтового ограждения (рисунок 10а) и изменения удельного расхода твердого диоксида углерода  $G$ , кг/м<sup>3</sup>, на замораживание 1 м<sup>3</sup> грунта (рисунок 10б). На графиках представлены результаты для супеси с различной массовой влажностью. Для других грунтов результаты являются близкими, так как удельная теплоемкость рассматриваемых грунтов и их плотность, определяющие затраты тепла на замораживание грунта, мало изменяются в зависимости от их типа.

Из рисунка 10а видно, что после смыкания соседних ледогрунтовых цилиндров возрастание толщины ограждения до 0.5 м происходит без значительного дополнительного отбора тепла от массива. Дальнейшее

возрастание суммарного теплопритока с ростом ограждения происходит практически по линейной зависимости от толщины. При увеличении массовой влажности грунта возрастание расхода тепла на образование ледогрунтового ограждения определяется величиной скрытой теплоты кристаллизации дополнительной воды в грунте.

Анализ результатов моделирования (рисунок 10б) показывает, что расход твердого диоксида углерода на образование  $1 \text{ м}^3$  конструкции ледогрунтового ограждения является постоянной величиной при толщине ограждения 0.6–0.8 м, 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  $\text{кг/м}^3$ . 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.

Зная закономерности изменения расхода твердого диоксида углерода в процессе формирования ледогрунтового ограждения, возможно точно прогнозировать изменение его уровня в замораживающей колонке. Это позволило предложить схему загрузки твердого диоксида углерода в замораживающие колонки, позволяющую управлять процессом создания ограждения на различной глубине. Идея схемы (рисунок 11) состоит в том, что поддерживаемый уровень твердого диоксида углерода в колонке повышается с заданной скоростью  $w_{\text{CO}_2}$ , м/сутки, в процессе

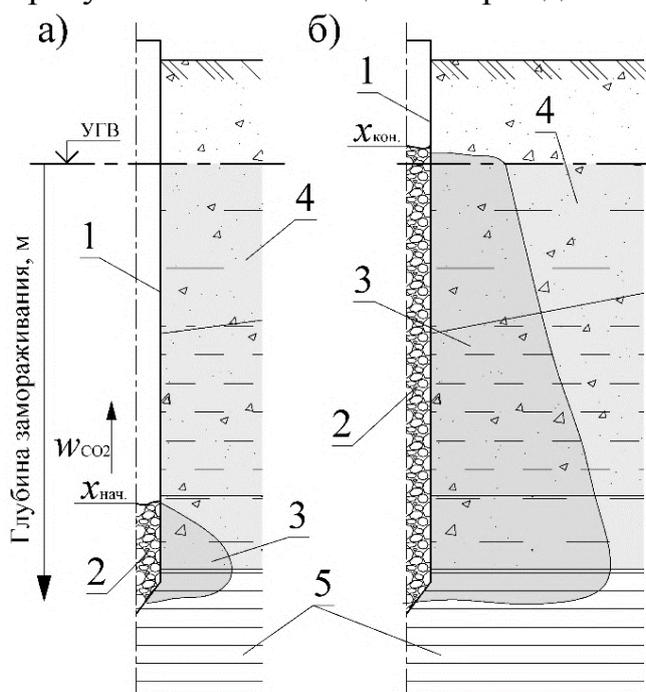


Рисунок 11 – Изменение уровня диоксида углерода в колонке от начала процесса замораживания (а) до завершения периода активного замораживания (б): 1 – замораживающая колонка; 2 – твердый диоксид углерода; 3 – ледогрунтовое ограждение; 4 – обводненный грунт; 5 – водоупорные породы

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. Это приведет к снижению объема замораживаемого грунта в верхней части колонки, что уменьшит общий расход твердого диоксида углерода.

Выполненные исследования позволили разработать Рекомендации по проектированию и производству работ по искусственному замораживанию грунтов с использованием твердого диоксида углерода. В Рекомендациях изложена методика расчета основных технологических параметров (времени активного замораживания, режима загрузки твердого диоксида углерода).

Выбор параметров технологии производится исходя из требования минимизации стоимости работ по замораживанию грунта. Это достигается путем выбора расстояния между замораживающими колонками, которое обеспечивает снижение затрат на бурение замораживающих скважин и снижение объема замораживаемого грунта, а также применением предложенной схемы загрузки твердого диоксида углерода в колонки. Основными параметрами, определяемыми при проектировании процесса загрузки, являются скорость понижения уровня диоксида углерода в колонке в результате притока тепла от массива грунта, и скорость повышения уровня твердого диоксида углерода, необходимая для создания ледогрунтового ограждения возрастающей по глубине толщины. Данные параметры определяют частоту загрузки твердого диоксида углерода и его количество, помещаемое в замораживающую колонку за один раз.

Для дальнейшего совершенствования комбинированного способа замораживания с использованием твердого диоксида углерода предложен новый вариант его реализации (рисунок 12), при котором испаритель для охлаждения хладоносителя твердым диоксидом углерода включается в рассольную сеть совместно с компрессорной замораживающей станцией (параллельно или последовательно). Это позволяет понизить температуру хладоносителя и повысить общую мощность замораживающей установки.

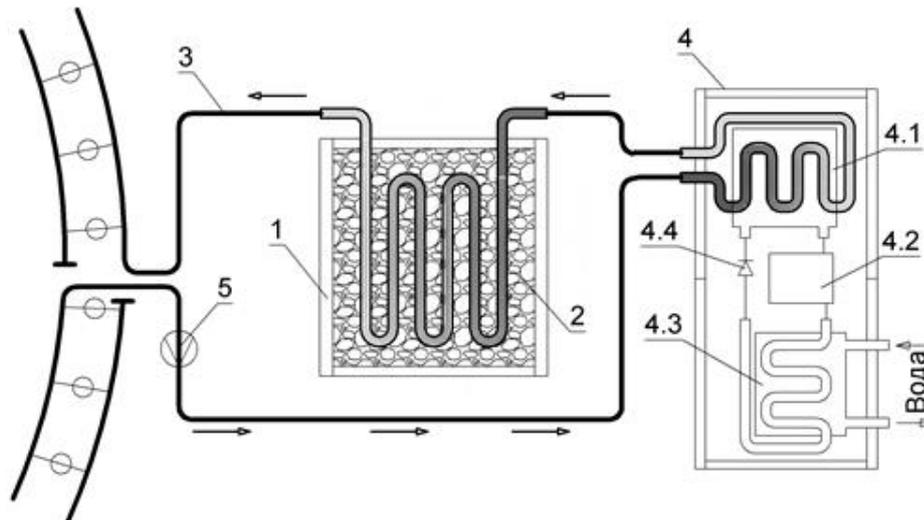


Рисунок 12 – Схема включения испарителя в рассольную сеть последовательно замораживающей станции: 1 – испаритель; 2 – твердый диоксид углерода; 3 – рассольная сеть; 4 – замораживающая станция (4.1 – испаритель; 4.2 – компрессор; 4.3 – конденсатор; 4.4 – дроссельное устройство); 5 – насос рассольной сети

На этапе пассивного замораживания компрессорная замораживающая станция может быть демонтирована и перебазирована на другой объект, тем самым будет повышена эффективность её использования.

Для комбинированного способа замораживания в работе предложены два новых типа испарителей: матричный и трубный – с вертикальным расположением труб. Такие испарители за счёт вертикального расположения поверхности теплообмена обладают большей площадью контакта с гранулами твердого диоксида углерода, что снижает общую материалоемкость конструкции.

По результатам проведенного комплексного исследования процесса теплопередачи от твердого диоксида углерода к хладоносителю разработана методика определения параметров комбинированного способа замораживания для трубного испарителя и для испарителя, в котором хладоноситель охлаждается при непосредственном контакте с гранулами твердого диоксида углерода. При проектировании комбинированного способа замораживания параметры процесса образования ледогрунтового ограждения (время активного замораживания, требуемая мощность замораживающей станции и т.д.) определяются по известным методикам для рассольного замораживания. По результатам определения требуемой мощности замораживающей станции

выбирается вид испарителя и производится расчёт его поверхности теплообмена, а также определяется режим загрузки твердого диоксида углерода.

## **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.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. Николаев П.В., Шуплик М.Н. Обоснование выбора промежуточного хладоносителя для искусственного замораживания грунтов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – №1. – С. 320–331.
2. Николаев П.В., Шуплик М.Н. Математическое моделирование процесса искусственного замораживания грунтов с применением твердого диоксида углерода // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – №11. – С. 243–250.

3. Вакуленко И.С., Николаев П.В. Анализ и перспективы развития способа искусственного замораживания горных пород в подземном строительстве // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – №3. – С. 338–346.
4. Шуплик М.Н., Николаев П.В. Исследование параметров процесса теплообмена при замораживании горных пород с применением твердого диоксида углерода // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – №1. – С. 42–49.
5. Николаев П.В. Совершенствование технологии искусственного замораживания грунтов с использованием твердых криоагентов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – №10. – С. 392–400.
6. Николаев П.В. Опыт и перспективы развития ресурсосберегающих технологий замораживания грунтов в городском подземном строительстве // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – №2. – С. 367–371.
7. Nikolaev P.V., Shuplik M.N. Advanced technology of ground improvement - artificial ground freezing with using solid carbon dioxide // TU Bergakademie Freiberg: collected works of “10 Freiberg – St. Petersburger Kolloquium junger Wissenschaftler” – Freiberg, 2015. – P. 73–78.
8. Nikolaev P., Serova A., Shuplik M. Energieeffiziente Technologien der Verfestigung von wasserführendem Baugrund mit festem Kühlmittel // RDB e.V. Bergbau. – 2015. – №8. – P. 357–359.