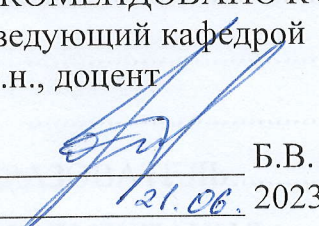


МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
Кафедра прикладной и технической физики

РЕКОМЕНДОВАНО К ЗАЩИТЕ В ГЭК  
Заведующий кафедрой  
к.т.н., доцент

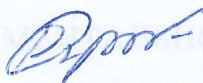
  
Б.В. Григорьев  
21.06. 2023 г.

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
магистерская диссертация

ИССЛЕДОВАНИЕ МИГРАЦИИ ИОНОВ СОЛИ NaCl  
ПРИ НАПРАВЛЕННОМ МНОГОКРАТНОМ ПРОМЕРЗАНИИ ГРУНТА

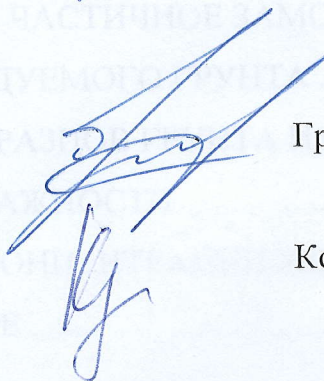
16.04.01 Техническая физика  
Магистерская программа «Физика недр»

Выполнил работу  
студент 2 курса  
очной формы обучения



Артеев Роман Алексеевич

Руководитель  
к.т.н., доцент



Григорьев Борис Владимирович

Рецензент  
д.г.-м.н., доцент, главный  
научный сотрудник  
ИКЗ ТюмНЦ СО РАН



Колунин Владимир Сергеевич

Тюмень  
2023 год

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|  |    |
|--|----|
| СПИСОК ТЕРМИНОВ .....  | 4  |
| ВВЕДЕНИЕ.....  | 5  |
| ГЛАВА 1. ИЗУЧЕННОСТЬ ПРОЦЕССА МИГРАЦИИ ИОНОВ СОЛЕЙ<br>В ПРОМЕРЗАЮЩИХ ГОРНЫХ ПОРОДАХ..... | 7  |
| ГЛАВА 2. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ .....  | 13 |
| 2.1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА.....  | 13 |
| 2.1.1. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ЯЧЕЙКА.....   | 13 |
| 2.1.2. ТЕРМОПАРЫ.....  | 19 |
| 2.1.3. АНАЛОГО-ЦИФРОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ.....   | 22 |
| 2.1.4. ПРОГРАММИРУЕМЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ.....   | 23 |
| 2.1.5. СИСТЕМА ПОДДЕРЖАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ<br>ХОЛОДНЫХ СПАЕВ ТЕРМОПАР .....                  | 27 |
| 2.1.6. ХОЛОДИЛЬНАЯ КАМЕРА .....  | 29 |
| 2.2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА.....   | 31 |
| 2.2.1. ПОДГОТОВКА ГРУНТА И ПРИГОТОВЛЕНИЕ<br>ВОДНОГО РАСТВОРА ХЛОРИДА НАТРИЯ.....         | 31 |
| 2.2.2. УПЛОТНЕНИЕ ГРУНТА.....  | 32 |
| 2.2.3. СБОРКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ .....  | 34 |
| 2.2.4. МНОГОКРАТНОЕ ЧАСТИЧНОЕ ЗАМОРАЖИВАНИЕ-<br>ОТТАИВАНИЕ ИССЛЕДУЕМОГО ГРУНТА .....     | 36 |
| 2.2.5. ИЗВЛЕЧЕНИЕ ОБРАЗЦОВ ГРУНТА И<br>ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИХ ВЛАЖНОСТИ.....                     | 37 |
| 2.2.6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРИДА НАТРИЯ<br>В ПОРОВОМ РАСТВОРЕ .....               | 38 |
| ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ.....   | 40 |
| 3.1. РЕЗУЛЬТАТЫ ПЕРВОГО ЭКСПЕРИМЕНТА.....  | 41 |
| 3.2. РЕЗУЛЬТАТЫ ВТОРОГО ЭКСПЕРИМЕНТА.....  | 42 |
| 3.3. РЕЗУЛЬТАТЫ ТРЕТЬЕГО ЭКСПЕРИМЕНТА .....  | 43 |
| 3.4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧЕТВЕРТОГО ЭКСПЕРИМЕНТА.....   | 44 |

|  |    |
|--|----|
| 3.5. РЕЗУЛЬТАТЫ ПЯТОГО ЭКСПЕРИМЕНТА .....  | 45 |
| 3.6. РЕЗУЛЬТАТЫ ШЕСТОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ..... | 47 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....                           | 49 |
| БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....             | 50 |

## СПИСОК ТЕРМИНОВ

Влажность грунта: отношение массы воды в объеме грунта к массе этого грунта, высушенного до постоянной массы [14].

Водонасыщенное состояние грунта: состояние грунта при практически полном заполнении пор грунта водой [14].

Мерзлые горные породы: породы, имеющие отрицательную температуру и содержащие лед [10].

Многолетнемерзлые породы: породы, существующие в мерзлом состоянии непрерывно более 3 – 5 лет [9].

Поровые воды (поровый раствор): природные подземные воды, включенные в поры и перемешивающиеся по ним в горных породах разного состава и прочности [9].

Сезонно-талый слой: поверхностный слой грунта (почвы), ежегодно протаивающий в теплый сезон и промерзающий в холодный и ограниченный снизу толщей многолетнемерзлых пород [9].

Температура начала замерзания: температура, при которой в порах грунта появляется лед [24].

## ВВЕДЕНИЕ

На протяжении десятилетий ученые всего мира непрерывно исследуют засоление различных по составу почв как один из основных факторов, приводящих к деградации земель сельхозназначения. Эта тема освещена в тысячах публикаций.

В докладе ООН «Состояние мировых почвенных ресурсов», составленном ведущими учеными-почвоведом, засоление почв оценивается как существенная общемировая проблема [5].

В тоже время, как в России, так и за рубежом, проводится несоизмеримо меньше исследований засоления различных по составу мерзлых горных пород. На эту тему ежегодно публикуется менее сотни научных статей, не говоря уже о монографических изданиях.

В этих публикациях отмечается, что засоление мерзлых пород приводит к существенному ухудшению их механических и прочностных свойств, возрастанию интенсивности криогенного деформирования и разрушения, ускорению процесса морозного иссушения, образованию криопэгов и другим физико-химическим явлениям. Также отмечается увеличение площади распространения и мощности сезонно-талого слоя, вызываемое ускорившейся за последние десятилетия деградацией многолетней криолитозоны, и рост темпов техногенного засоления мерзлых пород [8, 20, 22, 26].

В конечном счете, указанные последствия осложняют хозяйственное и инфраструктурное освоение территорий Крайнего Севера.

В этой связи представляется актуальным расширение экспериментальных исследований для накопления более разнообразных научных данных о процессе миграции ионов солей в различных по составу промерзающих горных породах.

Полученные знания о миграции солей в разных по составу промерзающих породах можно использовать в качестве дополнительного условия для решения конкретных инженерных задач в условиях Крайнего Севера.

Целью настоящей работы является получение экспериментальных данных о перераспределении ионов соли NaCl после частичного замораживания-оттаивания засоленного песчаного грунта.

Для достижения указанной цели было необходимо решить следующие задачи:

1. Спроектировать и собрать экспериментальную установку, предназначенную для исследования миграции ионов солей при направленном многократном промерзании грунта.
2. Разработать методику проведения эксперимента.
3. Провести серию экспериментов, в каждом из которых должно происходить, как и в естественных условиях природной среды, многократное частичное замораживание-оттаивание песчаного грунта, насыщенного водным раствором NaCl.

## ГЛАВА 1. ИЗУЧЕННОСТЬ ПРОЦЕССА МИГРАЦИИ ИОНОВ СОЛЕЙ В ПРОМЕРЗАЮЩИХ ГОРНЫХ ПОРОДАХ

Казалось бы, никаких сомнений в высокой степени изученности процесса миграции ионов солей в промерзающих горных породах быть не может. Открыв специализированный словарь или тематический учебник, можно прочесть примерно следующее [9, 20, 28]:

«Криогенное преобразование подземных вод: изменение минерализации и химического состава подземных вод, связанное с промерзанием и охлаждением водовмещающих горных пород. Замерзание воды сопровождается дифференциацией солей между ее жидкой и твердой фазами. ... Самые легкорастворимые соли (хлоридов Na, Ca, Mg и гидрокарбонатов Na) отжимаются в нижележащие водовмещающие породы. В них минерализация растворов увеличивается – происходит криогенное концентрирование подземных вод» [9].

Теория «об отжатию солей в промерзающих горных породах от фронта промерзания», во многом обязанная своей широкой известностью таким замечательным полевым исследователям, как Л.Г. Еловская, Н.П. Анисимова, Г.И. Дубиков, А.В. Брушков, Ю.Б. Шешин, И.Д. Данилов, Л.А. Жигарев, В.Н. Макаров, М.А. Минкин и др., заслуженно упоминается почти в каждом исследовании, посвященном тематике массопереноса в промерзающих засоленных породах. Однако за последние десятилетия накоплено значительное количество экспериментального материала, позволяющего, например, утверждать о том, что в промерзающих тонкодисперсных породах соли могут накапливаться в мерзлой зоне [4, 6, 18, 21].

Еще в далеком 1989 году Г. Бейкер отмечал: «Точные механизмы перераспределения солей при промерзании грунтов и то, как это влияет на грунты, в значительной степени неизвестны из-за огромных различий в грунтах, содержания влаги в грунтах, состава порового раствора и условий, при которых могут протекать эти процессы (например, температура и время и т.д.)» [1].

Спустя тридцать лет представления о миграции ионов солей в промерзающих породах все также представляют собой некое сочетание противоречивых данных, полученных в ходе теоретических, полевых и экспериментальных исследований.

В ближайшем будущем не предвидится появления какой-либо цельной и универсальной теории, позволяющей объяснить механизмы перераспределения солей при промерзании горных пород.

Единственным перспективным путем остается накопление базы данных полевых и экспериментальных исследований, позволяющей углубить представления ученых о процессе миграции ионов солей в промерзающих горных породах.

Ниже приведены аннотированные результаты экспериментальных исследований, содержательно связанных с решением третьей задачи, сформулированной в настоящей работе.

В диссертации Г. Бейкера «Перераспределение солей при промерзании засоленных песчаных колонн с применением в условиях подводной вечной мерзлоты» приводятся результаты пяти экспериментов, в каждом из которых происходило однократное частичное замораживание песчаного грунта, насыщенного водным раствором хлорида натрия [1].

Основные характеристики экспериментов:

- грунт помещался в закрытую измерительную ячейку, высотой 39 см;
- в качестве грунта использовался песок средней крупности;
- грунт полностью влагонасыщался водным раствором хлорида натрия с массовой концентрацией 35 г/л;
- замораживание грунта происходило сверху вниз;
- глубина промерзания грунта не превышала 30 см.

В каждом из пяти экспериментов поддерживались разные скорости промерзания грунта: 0,1; 0,2; 0,5; 0,97; 1,93 см/сут.



Результаты всех экспериментов аналогичны приведенным на рисунках 1.1 и 1.2.

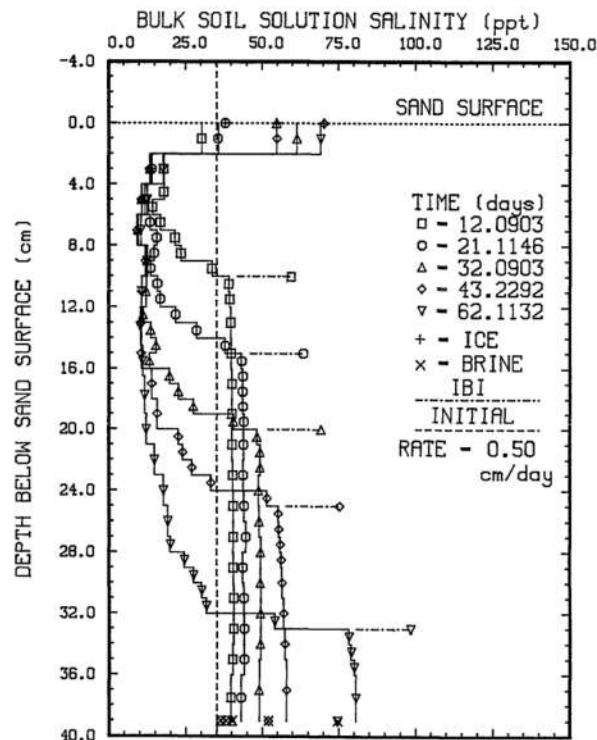


Рис. 1.1. Изменение концентрации порового раствора по глубине.

Скорость промерзания грунта – 0,5 см/день

Для всех экспериментов наблюдалось отжатие соли NaCl от фронта промерзания и миграция ионов соли NaCl в верхнюю мерзлую часть грунта (Рисунок 1.1).

Увеличение концентрации порового раствора в верхней мерзлой части грунта Г. Бейкер объясняет выталкиванием незамерзшего порового раствора вверх, вызванным давлением замерзания.

Для всех экспериментов значительного перераспределения порового раствора по глубине при промерзании грунта не наблюдалось (Рисунок 1.2).

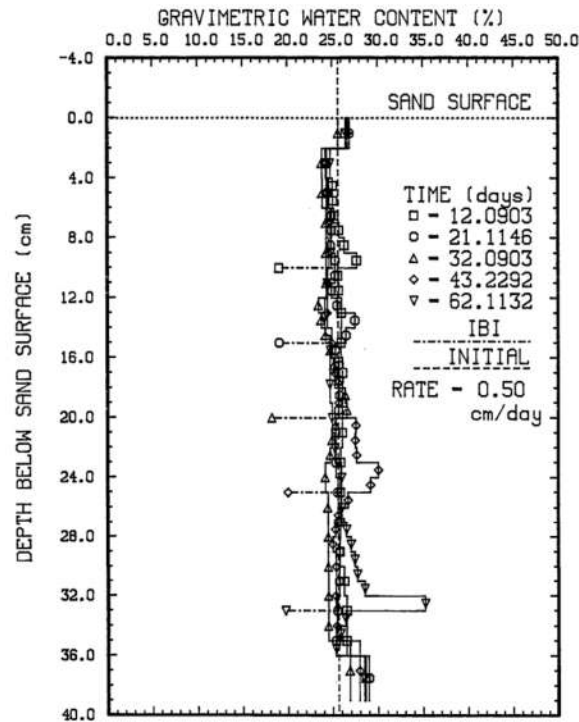


Рис. 1.2. Изменение влажности грунта по глубине.

Скорость промерзания грунта – 0,5 см/день

В работе Е.М. Чувилина, Э.Д. Ершова и Н.С. Налетовой «Массообмен и структурообразование в промерзающем засоленном грунте» приводится результат эксперимента по однократному частичному замораживанию образца песчаного грунта, насыщенного водным раствором хлорида натрия [3].

Основные характеристики эксперимента:

- грунт помещался в закрытую измерительную ячейку, высотой 15 см;
- в исследовании использовался песчаный грунт, конкретный гранулометрический состав исследуемого грунта не приводится;
- грунт полностью влагонасыщался водным раствором хлорида натрия; точная концентрация раствора не приводится, указан лишь диапазон – от 0,1 до 1,5 Н;
- замораживание грунта происходило сверху вниз;
- на верхнем торце измерительной ячейки поддерживалась температура минус 12 °С, на нижнем торце поддерживалась температура 8 °С;
- глубина промерзания грунта составляла 10 см.

Результат эксперимента приведен на рисунке 1.3.

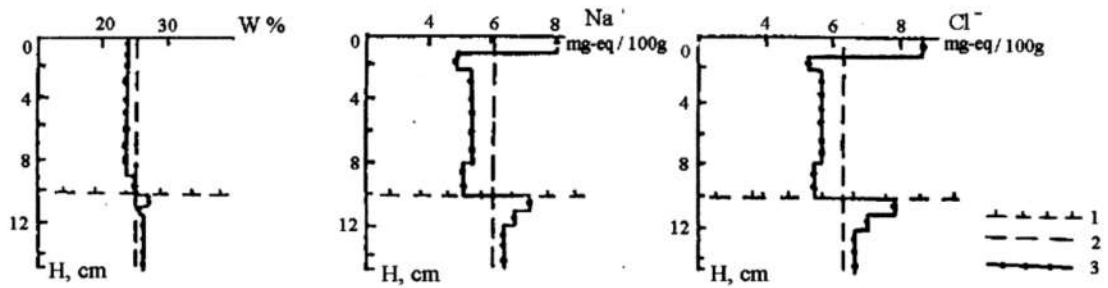


Рис. 1.3. Влажность грунта и концентрация порового раствора в зависимости от глубины

Из рисунка 1.3 видно, что:

- происходило отжатие порового раствора от фронта промерзания;
- концентрации порового раствора в верхней мерзлой и нижней талой частях грунта увеличивалась.

Увеличение концентрации порового раствора в верхней мерзлой части грунта авторы не объясняют.

В статье А.М. Тимофеева, О.Н. Кравцовой и Н.А. Протодьяконовой «Экспериментальное исследование перераспределения соли при промерзании засоленных грунтов и водных растворов» приводится результат эксперимента по однократному полному замораживанию образца песчаного грунта, насыщенного водным раствором хлорида натрия [25].

Основные характеристики эксперимента:

- грунт помещался в закрытую измерительную ячейку, высотой 10,5 см;
- в качестве грунта использовался песок мелкий;
- грунт полностью влагонасыщался водным раствором хлорида натрия с концентрацией 7,5 г/л;
- замораживание грунта происходило сверху вниз;
- грунт промерзал полностью.

Результат эксперимента приведен на рисунке 1.4.

| Система закрытая, $C_0=0,75\%$ |       |              |       |
|--------------------------------|-------|--------------|-------|
| l, см                          | W, %  | $C_{ps}$ , % | Z, %  |
| 8                              | 19,33 | 0,76         | 0,146 |
| 6                              | 20,26 | 0,676        | 0,137 |
| 4                              | 19,14 | 0,96         | 0,183 |
| 2                              | 22,32 | 0,740        | 0,166 |

Рис. 1.4. Влажность грунта и концентрация порового раствора в зависимости от глубины

Результаты, приведенные на рисунке 1.4, достаточно сложно интерпретировать – наблюдалось «хаотичное» перераспределение влаги и ионов соли NaCl.

Как видно из представленного выше обзора, исследования носили очень ограниченный характер: количество экспериментов было незначительным, а в двух публикациях не приведена исчерпывающая информация об условиях проведения экспериментов.

## ГЛАВА 2. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### 2.1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для исследования миграции ионов соли NaCl при направленном многократном промерзании грунта, была спроектирована и изготовлена экспериментальная установка, структурная схема которой изображена на рисунке 2.1. Следует отметить, что предложенная экспериментальная установка подходит для исследования миграции (при направленном многократном частичном промерзании-протаивании грунта) ионов любых солей.

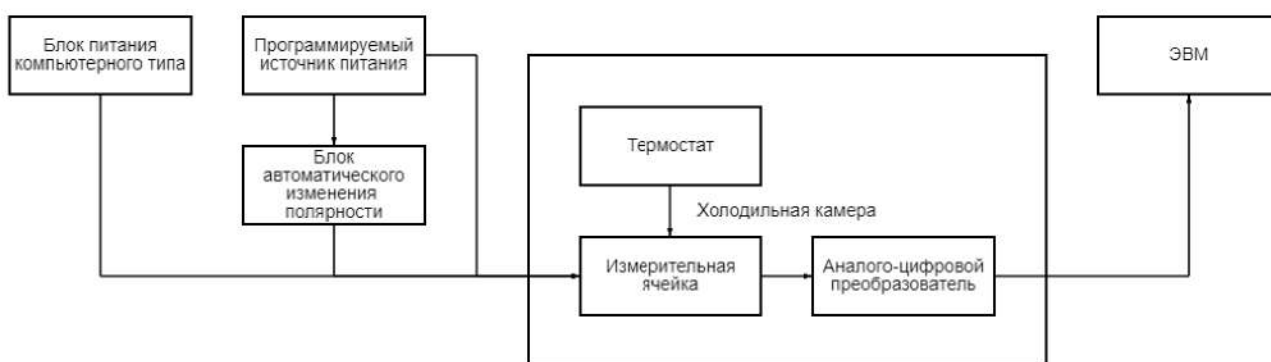


Рис. 2.1. Структурная схема экспериментальной установки

#### 2.1.1. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ЯЧЕЙКА

Принципиально, измерительная ячейка (Рисунок 2.2) состоит из:

- рабочей камеры, в которой происходит частичное замораживание-оттаивание засоленного влажного грунта и измерение его температуры;
- внешних элементов, позволяющих теплоизолировать рабочую камеру и поддерживать в ней необходимый вертикальный градиент температуры.

Рабочая камера изготовлена из толстостенного полипропиленового цилиндра, ограниченного с торцов алюминиевыми дисками. Внутренний диаметр цилиндра 45,8 мм. Высота рабочей области измерительной ячейки 111,2 мм. Рабочий объем измерительной ячейки составляет 183,2 см<sup>3</sup>.

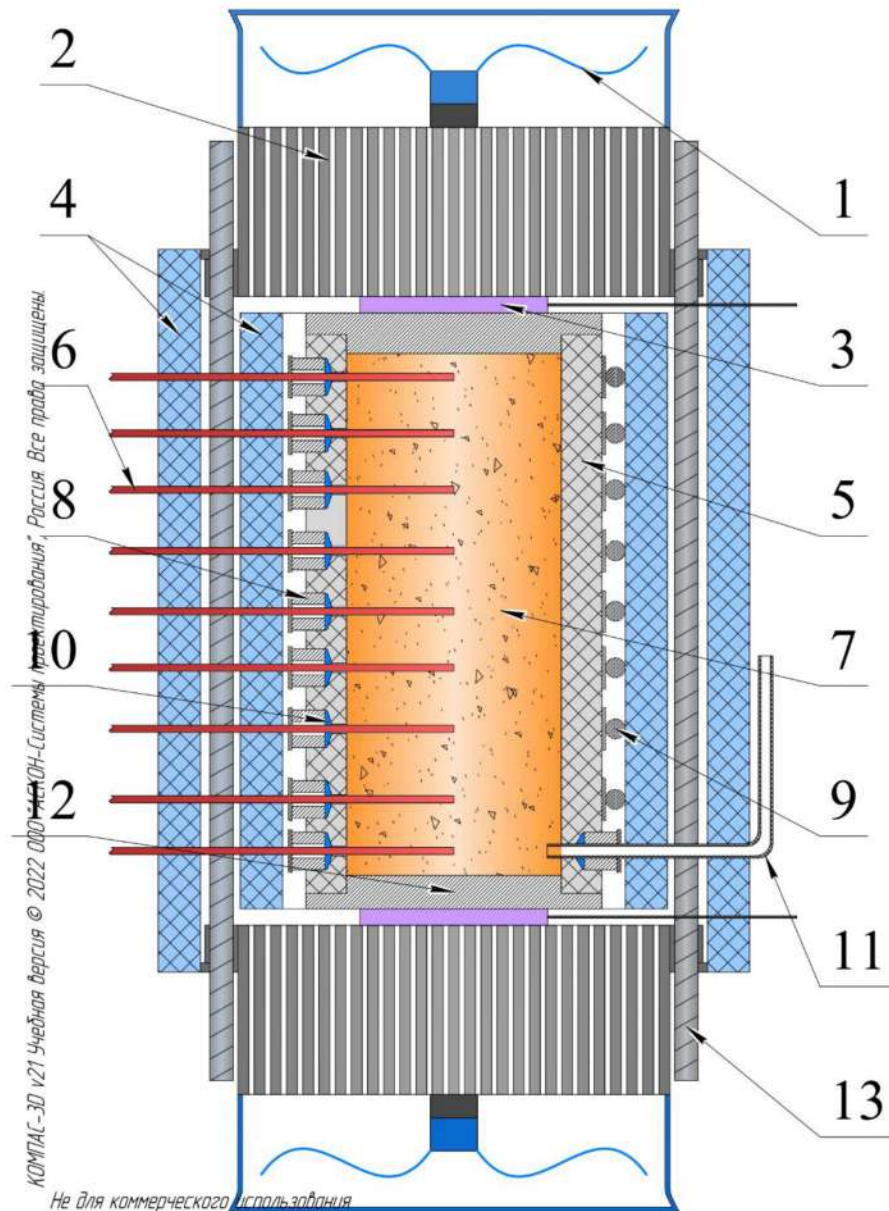


Рис. 2.2. Конструкция измерительной ячейки:

- 1 – вентиляторы; 2 – радиаторы;
- 3 – элементы Пельтье; 4 – теплоизоляция;
- 5 – корпус рабочей камеры; 6 – термопары Т-типа;
- 7 – рабочая область измерительной ячейки, заполняемая исследуемым грунтом;
- 8 – прижимающие элементы; 9 – хомуты;
- 10 – резиновые уплотнительные кольца; 11 – компенсационная трубка;
- 12 – торцевые алюминиевые диски; 13 – резьбовые штанги

При проектировании измерительной ячейки, была учтена необходимость в плановой или экстренной замене термопар (компенсационной трубки),

например, при их поломке. Более того, уплотнение исследуемого грунта (см. Параграф 2.2.2), как и пробоотбор (см. Параграф 2.2.5), значительно проще и удобнее проводить при отсутствии термопар (компенсационной трубки) в рабочей области измерительной ячейки.

Термопары и компенсационная трубка вводятся в рабочую область камеры через предусмотренные в корпусе отверстия (Рисунок 2.4). Фиксация термопар и компенсационной трубки осуществляется посредством их обжима (Рисунок 2.3).

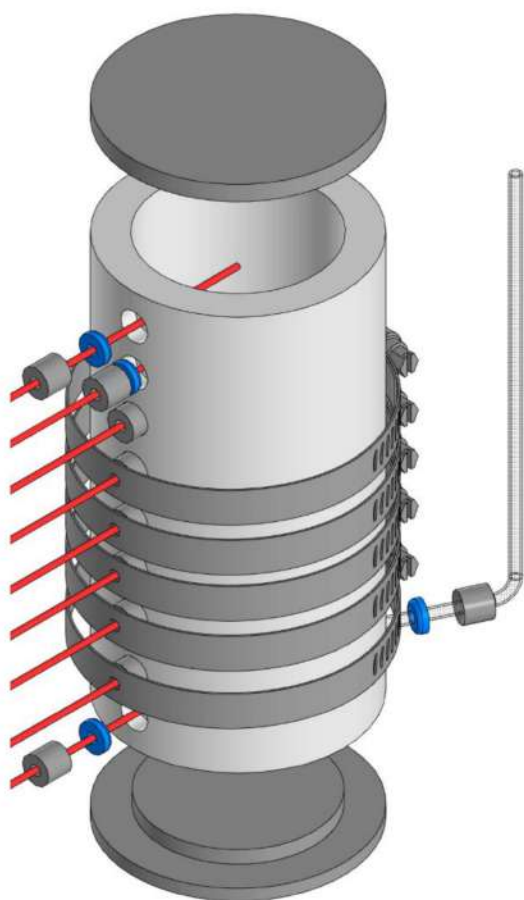


Рис. 2.3. 3D-модель рабочей камеры измерительной ячейки



Рис. 2.4. Толстостенный полипропиленовый цилиндр и торцевые алюминиевые диски

Рассмотрим порядок фиксации термопары (компенсационной трубки):

- на термопару (компенсационную трубку) последовательно надеваются: хомут с отверстием для термопары (компенсационной трубки); прижимающий элемент – толстостенный алюминиевый цилиндр; резиновое уплотнительное кольцо (Рисунок 2.5);

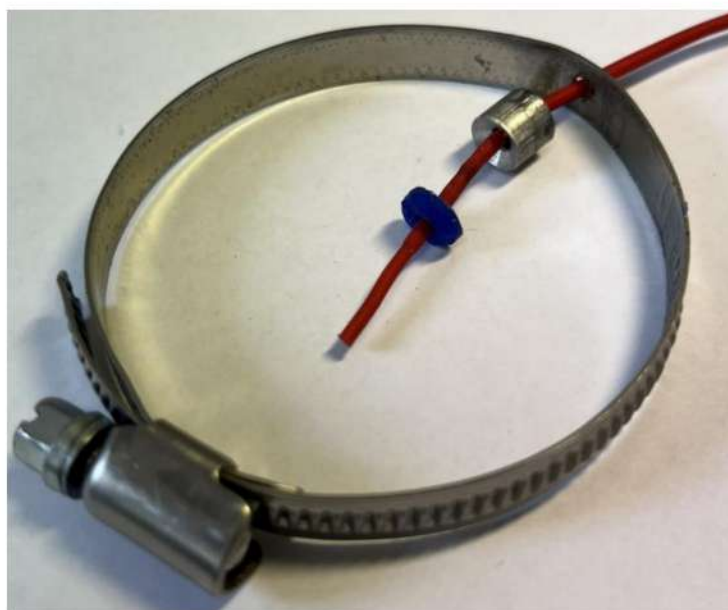


Рис. 2.5. Фиксация термопары посредством ее обжима

- в отверстие переменного диаметра, просверленное в корпусе рабочей камеры, последовательно вставляются термопара, резиновое уплотнительное кольцо, прижимающий элемент (Рисунок 2.6);
- хомут затягивается; при этом, резиновое уплотнительное кольцо смыкается и обжимает термопару, надежно ее фиксируя.

Предложенный способ фиксации температурных датчиков и компенсационной трубки:

- упрощает конструкцию рабочей камеры;
- позволяет производить замену термопар или компенсационной трубки в случае необходимости;
- обеспечивает высокую степень герметичности;
- облегчает процессы уплотнения грунта и пробоотбора.



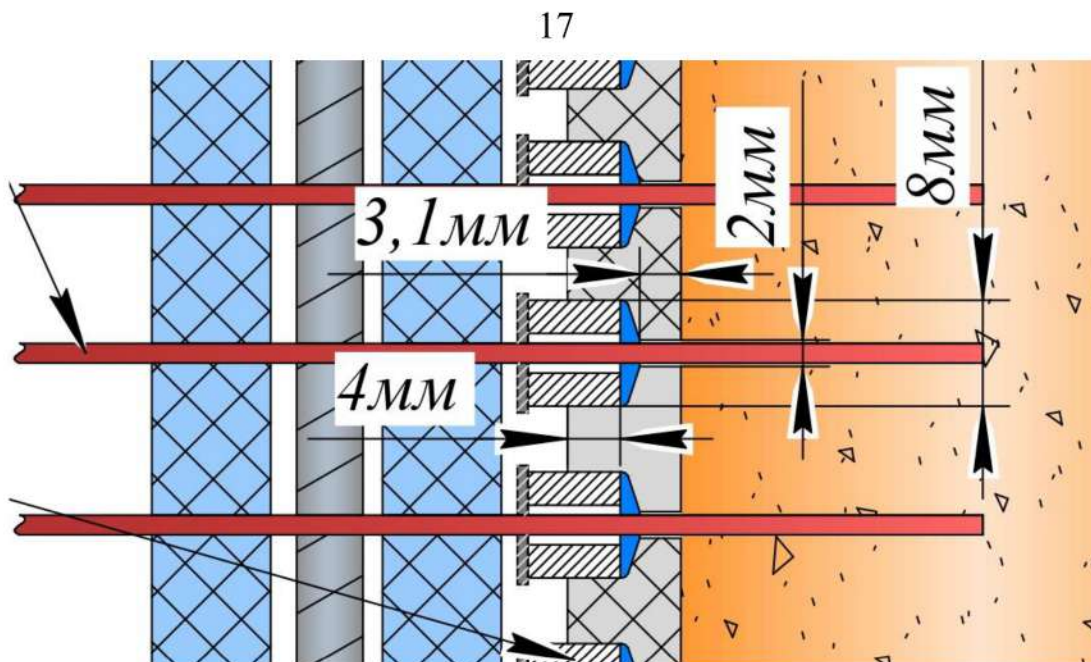


Рис. 2.6. Отверстия переменного диаметра,  
просверленные в корпусе рабочей камеры

В конструкции рабочей камеры предусмотрено отверстие, предназначенное для установки компенсационной трубки (Рисунок 2.3). Компенсационная трубка призвана уменьшить давление, возникающее в нижней части рабочей области измерительной ячейки вследствие «поршневого эффекта» (при промерзании влажного грунта сверху вниз избыточная вода отжимается в нижележащие слои [20]).

Следует отметить, что торцевые диски, термодары, компенсационная трубка, прижимающие элементы и уплотнительные кольца были изготовлены в мастерских Физико-технического института самим исследователем с соблюдением всех требований техники безопасности.

Для создания и дальнейшего поддержания вертикального градиента температуры в рабочей области измерительной ячейки используются элементы Пельтье TEC1-12712 12V 5A (40×40 мм) (Рисунок 2.7). Передача тепла исследуемому грунту происходит через торцевые диски, именно поэтому торцевые пластины были изготовлены из алюминия, характеризующегося высокой теплопроводностью ( $\lambda_{T=293K}^{\text{Алюминий}} = 236 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$ ). В тоже время, использование алюминия при изготовлении торцевых дисков привело к

снижению их срока службы, в связи с недостаточно высокой коррозионной стойкостью данного металла.

Элементы Пельтье подключаются к программируемому источнику питания (см. Параграф 2.1.4), что позволяет регулировать скорость движения фронта промерзания (протаивания).

После проведения первых экспериментов стало понятно, что элементы Пельтье эффективно справляются с поставленной задачей и обеспечивают необходимый вертикальный градиент температуры в рабочей области измерительной ячейки.

Отвод тепла с неиспользуемых нагревающихся (охлаждающихся) сторон элементов Пельтье осуществляется с помощью системы радиатор-вентилятор (Рисунок 2.8). Вентиляторы подключаются к стандартному блоку питания компьютерного типа. Скорость вращения вентиляторов во время эксперимента не регулируется и составляет тысяча двести оборотов в минуту.



Рис. 2.7. Элементы Пельтье  
TEC1-12712 12V 5A (40×40 мм)



Рис. 2.8. Система  
радиатор-вентилятор в сборе

Экспериментальная установка, а следовательно, и измерительная ячейка спроектированы для исследования миграции ионов соли NaCl при циклическом частичном промерзании-протаивании грунта сверху вниз. То есть с некоторой периодичностью во всей рабочей области измерительной ячейки необходимо создать стабильный и равномерный вертикальный градиент температуры. Таким

образом, для получения корректных результатов необходимо значительно снизить горизонтальный температурный градиент, что может быть достигнуто путем уменьшения теплопотерь через боковую поверхность рабочей камеры.

Фактически, снижение теплопотерь через боковую поверхность рабочей камеры обеспечивается тремя теплоизоляционными элементами:

- стенкой рабочей камеры толщиной 8,6 мм, изготовленной из полипропилена ( $\lambda_{T=293K}^{\text{Полипропилен}} = 0,24 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$ );
- первым слоем теплоизоляции (Рисунок 2.2) толщиной 9 мм, изготовленным из вспененного полиэтилена ( $\lambda_{T=293K}^{\text{Вспененный полиэтилен}} = 0,038 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$ );
- вторым слоем теплоизоляции (Рисунок 2.2) с характеристиками, аналогичными первому слою.

Благодаря использованию целых трех теплоизоляционных «слоев» удается эффективно уменьшить теплопотери через боковую поверхность рабочей камеры, что закономерно приводит к значительному снижению горизонтального температурного градиента в рабочей области измерительной ячейки.

Фиксация всех элементов измерительной ячейки обеспечивается соединением верхнего и нижнего радиаторов с помощью резьбовых штанг и гаек (Рисунок 2.2).

### 2.1.2. ТЕРМОПАРЫ

Для измерения температуры исследуемого грунта были изготовлены девять дифференциальных термопар Т-типа (медь-константан).

В связи с агрессивностью среды (засоленный грунт), температуру которой предстояло измерять, горячие спаи термопар были закрыты герметизирующей оболочкой, что привело к значительному увеличению их срока службы. Однако, герметизация горячих спаев температурных датчиков привела также и к увеличению погрешности измерения температуры.

Дифференциальные термопары подключаются к аналого-цифровому преобразователю. Горячие спаи термопар вводятся в рабочий объем

измерительной ячейки. Холодные спаи термопар помещаются в сосуд Дьюара, в котором поддерживается температура  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  (см. Параграф 2.1.5).

Сигнал, поступающий на ЭВМ с аналого-цифрового преобразователя в милливольтках, необходимо отображать в градусах Цельсия. Для этого термопары были откалиброваны с помощью поверенного калибратора температур КТ – 4.

Для каждой дифференциальной термопары Т-типа были получены значения напряжений в зависимости от температур их горячих спаев при температуре холодных спаев  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . По полученным данным были построены калибровочные кривые (Рисунок 2.9, Рисунок 2.10).

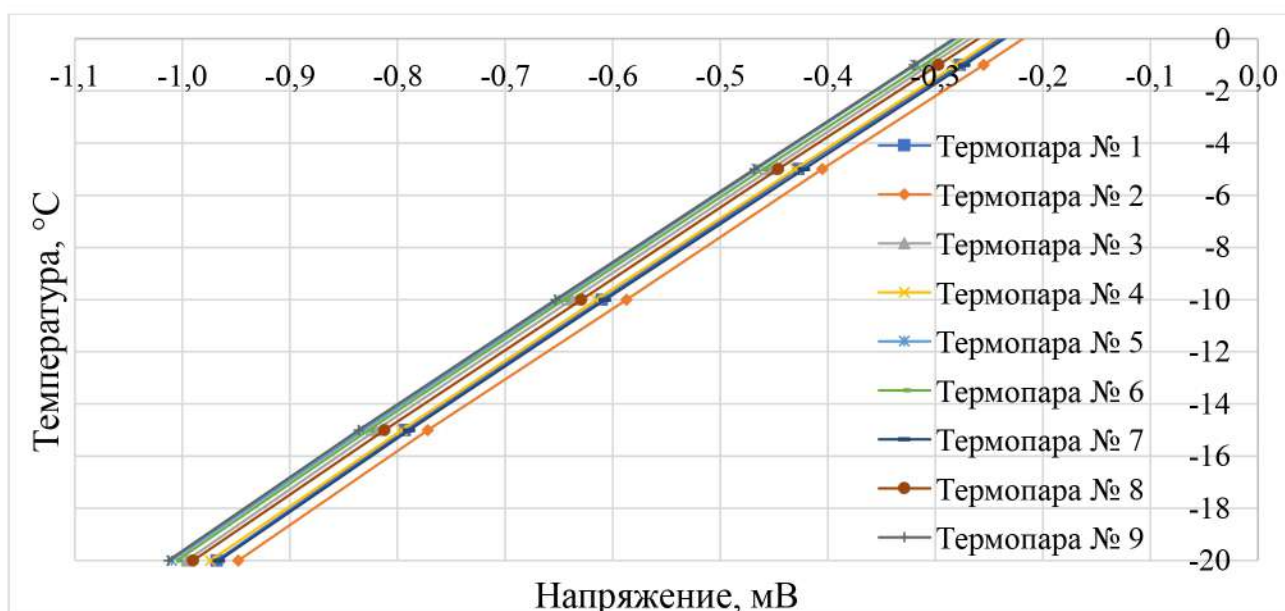


Рис. 2.9. Калибровочные кривые для девяти дифференциальных термопар в диапазоне температур от минус 20 до  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$

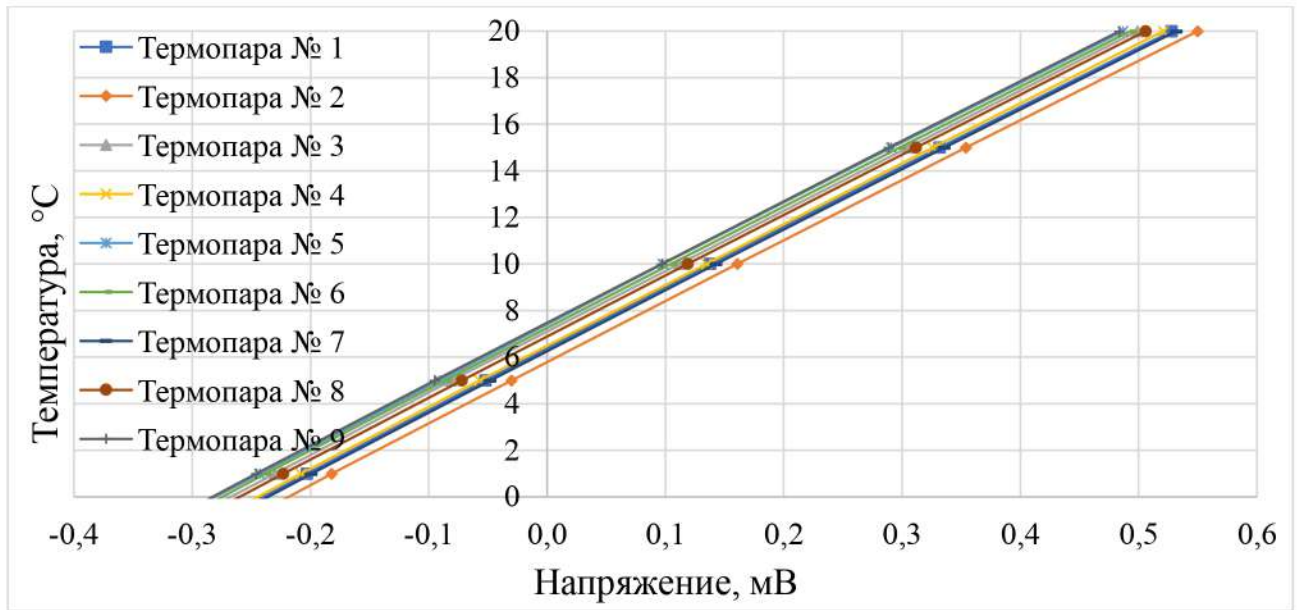


Рис. 2.10. Калибровочные кривые для девяти дифференциальных термопар в диапазоне температур от 0 до 20 °С

Затем была получена зависимость температуры (в интервале от минус 20 до 20 °С) от напряжения для девяти дифференциальных термопар Т-типа (Таблица 2.1).

Таблица 2.1

Зависимость температуры (от минус 20 до 20 °С)  
от напряжения для девяти дифференциальных термопар

| № термопары | Уравнение преобразования напряжения (мВ) в температуру (°С) |
|-------------|---|
| 1           | $T = 26,708 \cdot U + 6,2282$                               |
| 2           | $T = 26,683 \cdot U + 5,6407$                               |
| 3           | $T = 26,715 \cdot U + 6,9645$                               |
| 4           | $T = 26,736 \cdot U + 6,3604$                               |
| 5           | $T = 26,713 \cdot U + 7,3033$                               |
| 6           | $T = 26,683 \cdot U + 7,1404$                               |
| 7           | $T = 26,682 \cdot U + 6,1182$                               |
| 8           | $T = 26,718 \cdot U + 6,7651$                               |
| 9           | $T = 26,695 \cdot U + 7,3704$                               |

### 2.1.3. АНАЛОГО-ЦИФРОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

Для обработки аналоговых сигналов, поступающих с термопар, и их преобразования в цифровой сигнал в представленной работе используется аналого-цифровой преобразователь ZET 220 (Рисунок 2.11).



Рис. 2.11. Аналого-цифровой преобразователь ZET 220 с девятью подключенными дифференциальными термопарами

Вывод данных, поступающих с аналого-цифрового преобразователя ZET 220, на экран ЭВМ осуществляется с помощью программного комплекса «ZETLAB».

В программе «ZFormula» задаются уравнения преобразования напряжения в температуру (Таблица 2.1, Рисунок 2.12) с целью моделирования выходных сигналов, поступающих с аналого-цифрового преобразователя. В программе «Многоканальный осциллограф» графически отображаются моделированные сигналы в координатах температура-время (Рисунок 2.12).

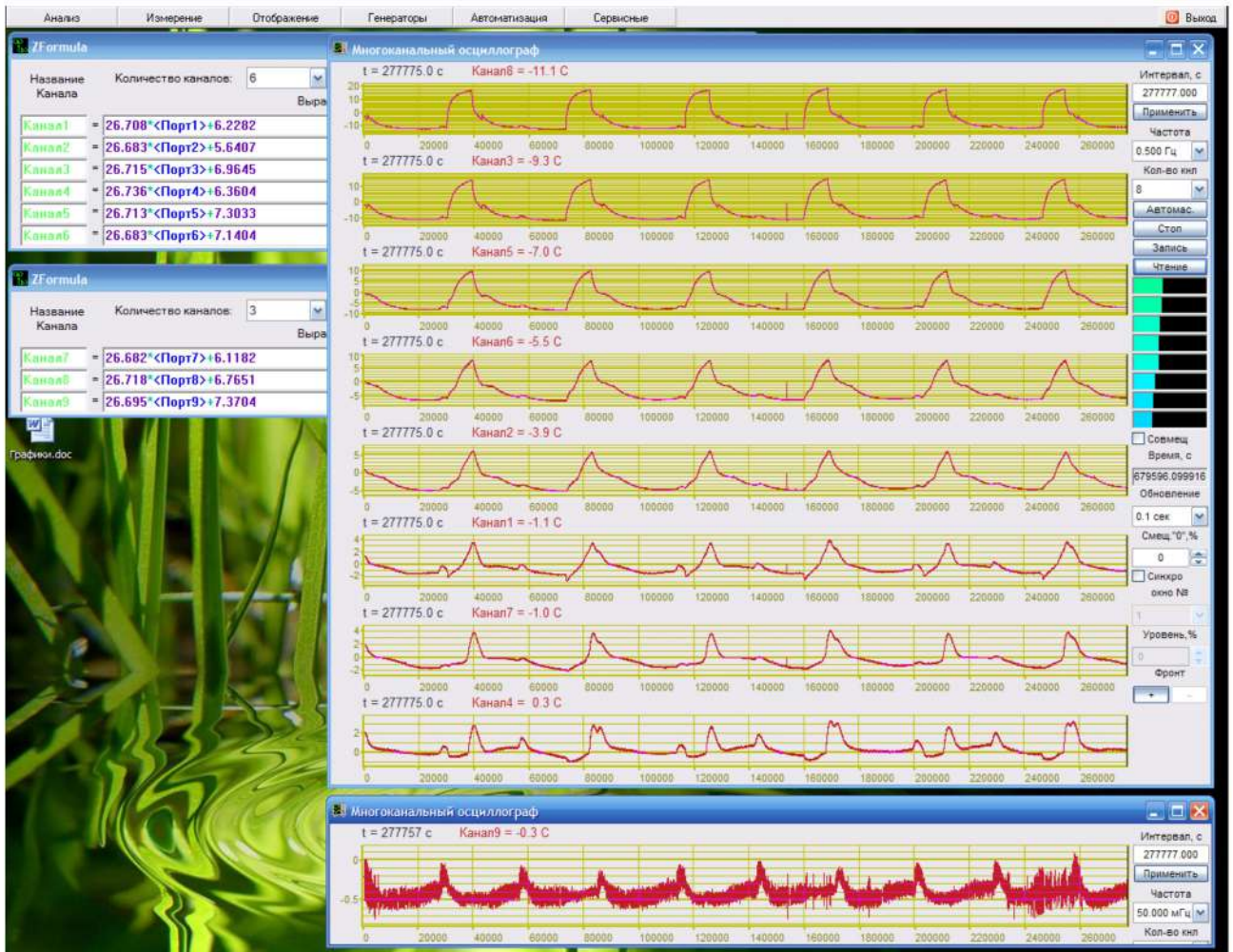


Рис. 2.12. Программный комплекс «ZETLAB»

Таким образом, программа «Многоканальный осциллограф» позволяет в реальном времени осуществлять контроль температуры исследуемого грунта и работоспособности термопар. Например, на рисунке 2.12 видно, что температурный датчик – канал 9, расположенный в нижней части рабочей камеры, вышел из строя (напомним, что исследуемый грунт, расположенный в нижней части рабочей камеры, на протяжении всего эксперимента поддерживается в талом состоянии при температуре около  $1^{\circ}\text{C}$ ).

#### 2.1.4. ПРОГРАММИРУЕМЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ

Для подачи постоянного напряжения на элементы Пельтье в представленной работе используется программируемый источник питания RIGOL DP 832 (Рисунок 2.13).



Рис. 2.13. Программируемый источник питания RIGOL DP832

Для получения корректных результатов по итогам эксперимента по исследованию миграции ионов соли NaCl при направленном многократном промерзании грунта должны выполняться следующие условия (см. Глава 3):

- 1) движение фронта промерзания (протаивания) должно осуществляться сверху вниз;
- 2) исследуемый грунт, расположенный в нижней части (высотой 25 мм) рабочей камеры, на протяжении всего эксперимента должен поддерживаться в талом состоянии.

Для создания и дальнейшего поддержания вертикального градиента температуры в рабочей области измерительной ячейки используются элементы Пельтье TEC1-12712 12V 5A, прикрепленные к верхнему и нижнему торцевым дискам измерительной ячейки (Рисунок 2.2).

Для выполнения второго условия достаточно прикрепить элемент Пельтье к нижнему торцевому диску горячей стороной и подать необходимое напряжение. В ходе эксперимента на нижний элемент Пельтье подается постоянное напряжение 0,2 В.



Для выполнения первого условия необходимо периодически изменять полярность питания элемента Пельтье, прикрепленного к верхнему торцевому диску, для создания или фронта промерзания, или фронта протаивания.

В представленной экспериментальной установке смена полярности питания элемента Пельтье проводится автоматически. Для этого был спроектирован и изготовлен «Блок автоматического изменения полярности» (Рисунок 2.14), состоящий из двух модулей реле, управляемых платой Arduino Nano.

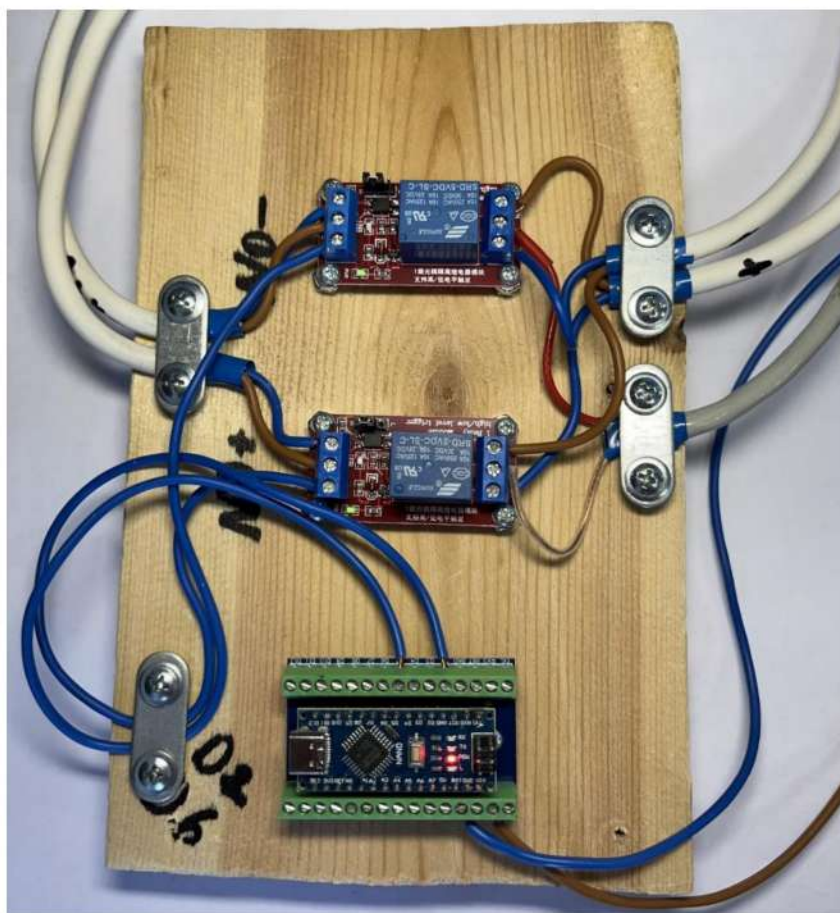


Рис. 2.14. «Блок автоматического изменения полярности»

Схема подключения реле к программируемому источнику питания и элементу Пельтье приведена на рисунке 2.15 (реле является основным элементом релейного модуля). Работоспособность как релейных модулей, так и платы Arduino Nano обеспечивается путем подачи постоянного напряжения с программируемого источника питания RIGOL DP 832.

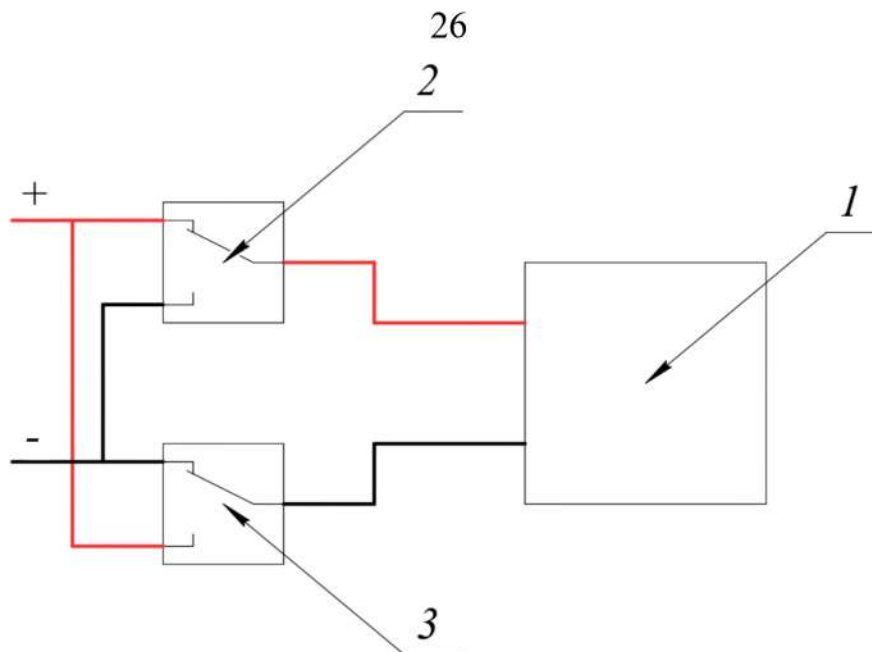


Рис. 2.15. Схема подключения релейных модулей к источнику питания:

1 – элемент Пельтье; 2 – реле № 1; 3 – реле № 2

Таким образом, в ходе проведенных экспериментов в течение 9 000 с (2,5 ч) рабочая сторона (сторона, контактирующая с верхним торцевым диском) элемента Пельтье нагревалась, затем в течение 34 200 с (9,5 ч) рабочая сторона элемента Пельтье охлаждалась (Рисунок 2.16).

```

RELAY.ino
1  int Relay_1 = 2;
2  int Relay_2 = 5;
3  void setup() {
4    // initialize digital pins as an output.
5    pinMode(Relay_1, OUTPUT);
6    pinMode(Relay_2, OUTPUT);
7  }
8  void loop() {
9    // в сумме должно быть 43200 секунд (12 часов)
10   digitalWrite(Relay_1, LOW);    // нагрев
11   digitalWrite(Relay_2, LOW);    // нагрев
12   delay(9000000);                // wait for a 9000 секунд
13   // 43200 - 9000 = 34200 секунд
14   digitalWrite(Relay_1, HIGH);   // охлаждение
15   digitalWrite(Relay_2, HIGH);   // охлаждение
16   delay(34200000);               // wait for a 34200 секунд
17 }

```

Рис. 2.16. Листинг программы, предназначенной для управления релейными модулями с помощью Arduino Nano

В процессе протаивания исследуемого грунта (нагрев рабочей стороны) на верхний элемент Пельтье подавалось напряжение 1,5 В. В процессе промерзания исследуемого грунта (охлаждение рабочей стороны) заранее запрограммированный источник питания RIGOL DP 832 ступенчато повышал (в диапазоне от 0,4 до 5 В) подаваемое на верхний элемент Пельтье напряжение.

Отдельно следует отметить, что ЭВМ, программируемый источник питания RIGOL DP 832, блок питания компьютерного типа подключаются к источнику бесперебойного питания IPPON Back Power Pro 500. В случае отключения электроэнергии, источник бесперебойного питания IPPON Back Power Pro 500 способен поддерживать работу экспериментальной установки в течение пяти минут.

#### 2.1.5. СИСТЕМА ПОДДЕРЖАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ХОЛОДНЫХ СПАЕВ ТЕРМОПАР

Для калибровки термопар и последующего измерения с их помощью температуры исследуемого грунта необходимо продолжительный период времени (до пятнадцати суток) поддерживать температуру холодных спаев дифференциальных термопар постоянной.

В представленной экспериментальной установке для поддержания температуры холодных спаев термопар используется сосуд Дьюара (Рисунок 2.17), заполненный водо-ледяной смесью. Сосуд Дьюара помещается в рабочую камеру термостата (Рисунок 2.17), в которой поддерживается температура, близкая к 0 °С. Таким образом, температура холодных спаев, погруженных в водо-ледяную смесь, девяти дифференциальных термопар остается постоянной на протяжении всего эксперимента и составляет 0 °С.

Следует отметить, что используемый в данной работе термостат не является заводским изделием.

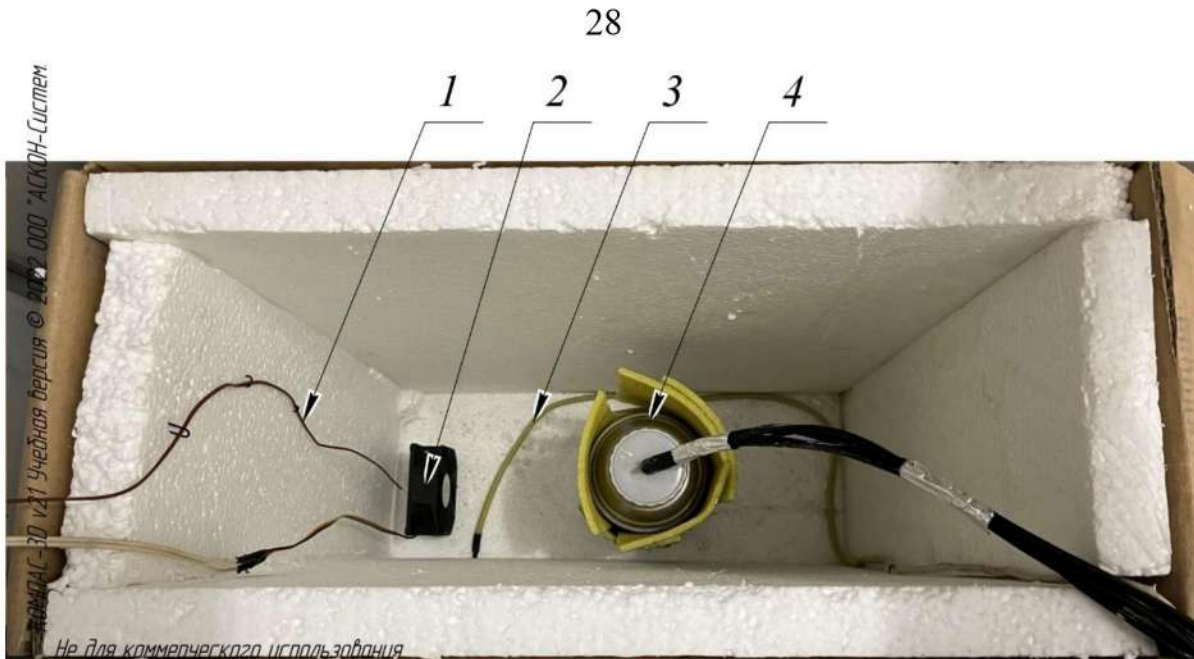


Рис. 2.17. Рабочая камера термостата: 1 – термопара; 2 – вентилятор;  
3 – кабельный электронагреватель; 4 – сосуд Дьюара

Поддержание требуемой температуры в рабочей камере термостата осуществляется с помощью терморегулятора Ursamar RK44 (Рисунок 2.18).

Рабочая камера термостата и терморегулятор на время эксперимента помещаются в холодильную установку (см. Параграф 2.1.6).



Рис. 2.18. Терморегулятор Ursamar RK44

К терморегулятору подключаются термопара и кабельный электронагреватель (Рисунок 2.17). При понижении температуры в рабочей камере до значений ниже минус  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (эмпирически было определено, что показатель «10» терморегулятора Ursamar RK44 соответствует  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), терморегулятор подает питание на кабельный электронагреватель. Вентилятор выравнивает температуру в рабочей камере термостата. При достижении температуры  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  в рабочей камере кабельный электронагреватель выключается.

Снижение теплотерь через стенки рабочей камеры термостата обеспечивается слоем теплоизоляции (Рисунок 2.17) толщиной 50 мм, изготовленным из полистирольного пенопласта ( $\lambda_{T=293\text{K}}^{\text{Полистирольный пенопласт}} = 0,039 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$ ).

Вентилятор подключается к стандартному блоку питания компьютерного типа. Скорость вращения вентилятора во время работы термостата не регулируется и составляет восемьсот оборотов в минуту.

В ходе работы выяснилось, что предложенный способ позволяет поддерживать температуру холодных спаев дифференциальных термопар постоянной и равной  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение двадцати двух суток.

### 2.1.6. ХОЛОДИЛЬНАЯ КАМЕРА

На время проведения эксперимента в холодильную камеру помещаются:

- измерительная ячейка: для уменьшения теплотерь через боковую поверхность рабочей камеры и ускорения процесса промерзания грунта;
- термостат (терморегулятор, рабочая камера): для поддержания постоянной нулевой температуры ( $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) холодных спаев дифференциальных термопар;
- аналого-цифровой преобразователь: в связи с необходимостью подключения термопар.

В холодильной камере (2250×1600×2000 мм) поддерживается температура минус 1,5 °С.

Для снижения влияния колебаний температуры воздуха в холодильной камере (колебания не превышают 3 °С.) на процесс промерзания (протаивания) грунта измерительная ячейка помещается в фанерный короб (Рисунок 2.19) и накрывается теплоизолирующей крышкой.



Рис. 2.19. Измерительная ячейка в фанерном коробе

Аналого-цифровой преобразователь ZET 220 и терморегулятор Ursamar RK44 помещаются в отдельно стоящий изолированный короб для предотвращения образования конденсата на стенках приборов и исключения механического воздействия на приборы.

## 2.2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

## 2.2.1. ПОДГОТОВКА ГРУНТА И ПРИГОТОВЛЕНИЕ

## ВОДНОГО РАСТВОРА ХЛОРИДА НАТРИЯ

С неизвестного карьера был отобран песчаный грунт неопределенного гранулометрического состава. Путем промывки водой (трижды водопроводной, трижды дистиллированной) из грунта были удалены соли. Затем грунт высушивался в течение ста часов.

Гранулометрический состав промытого и высушенного грунта определялся согласно ГОСТ 12536-2014. Весь объем грунта просеивался через сита с диаметрами отверстий: 0,5 мм; 0,25 мм; 0,20 мм; 0,14 мм; 0,1 мм.

Гранулометрический состав грунта приведен в таблице 2.2.

Таблица 2.2

Гранулометрический состав грунта

| Показатель              | Фракция грунта, мм |             |             |             |            |
|-------------------------|--------------------|-------------|-------------|-------------|------------|
|                         | 0,50 – 0,25        | 0,25 – 0,20 | 0,20 – 0,14 | 0,14 – 0,10 | Менее 0,10 |
| Масса фракции грунта, г | 112,6 ± 0,1        | 719,5 ± 0,1 | 578,3 ± 0,1 | 673,5 ± 0,1 | 68,7 ± 0,1 |
| Содержание фракции, %   | 5,23               | 33,42       | 26,87       | 31,29       | 3,19       |

Для влагонасыщения грунта был приготовлен водный раствор хлорида натрия с массовой концентрацией 10 г/л. Для приготовления раствора использовался натрий хлористый, хч (химически чистый).

Для водного раствора хлорида натрия с массовой концентрацией 10 г/л была получена кривая охлаждения (Рисунок 2.20) и определена температура кристаллизации:  $t_{пл} = - 2,1^{\circ}\text{C}$ .

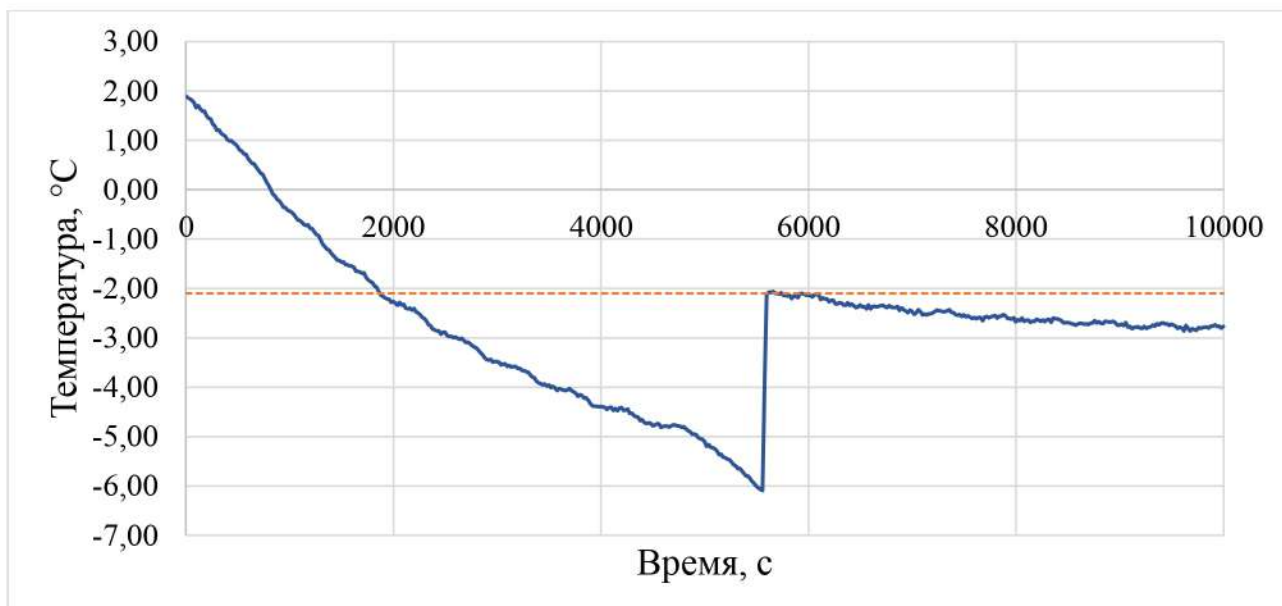


Рис. 2.20. Кривая охлаждения водного раствора хлорида натрия с массовой концентрацией 10 г/л

### 2.2.2. УПЛОТНЕНИЕ ГРУНТА

Алгоритм уплотнения грунта в рабочей камере измерительной ячейки представлен ниже:

1. Отверстия в корпусе рабочей камеры (к корпусу уже прикреплен нижний торцевой диск (см. Параграф 2.2.3)) затыкаются лабораторными резиновыми пробками (Рисунок 2.21).

2. Корпус рабочей камеры с внутренней стороны смазывается силиконовой смазкой. Силиконовая смазка предотвращает примерзание грунта к внутренней стенке рабочей камеры в процессе движения фронта промерзания, что приводит к снижению вертикального градиента давления в рабочей области измерительной ячейки.

3. Грунт поэтапно (уровень грунта достигает:  $\frac{1}{4}$  высоты;  $\frac{1}{2}$  высоты;  $\frac{3}{4}$  высоты; рабочая область камеры полностью заполнена) уплотняется вибрационным способом. Между этапами уплотнения в рабочую область измерительной ячейки приливается водный раствор хлорида натрия до полного влагонасыщения исследуемого грунта. Эмпирически было определено, что в рабочую область помещается около 303 г увлажненного грунта.





Рис. 2.21. Уплотненный грунт  
в рабочей камере измерительной ячейки

Следует отметить, что во всех проведенных экспериментах использовался грунт, гранулометрический состав которого приведен в таблице 2.3.

Таблица 2.3

Гранулометрический состав используемого грунта

| Показатель                 | Фракция грунта, мм |             |             |
|----------------------------|--------------------|-------------|-------------|
|                            | 0,25 – 0,20        | 0,20 – 0,14 | 0,14 – 0,10 |
| Масса фракции<br>грунта, г | 101,0 ± 0,1        | 101,0 ± 0,1 | 101,0 ± 0,1 |

Согласно ГОСТ 25100-2020 используемый грунт – песок мелкий.

Таким образом, в представленной работе проводилось исследование миграции ионов соли NaCl при направленном многократном промерзании песчаного грунта.

### 2.2.3. СБОРКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Алгоритм сборки экспериментальной установки приведен ниже:

- С помощью кислотного силиконового герметика к корпусу рабочей камеры измерительной ячейки прикрепляется нижний торцевой диск. Следующий этап эксперимента (уплотнение грунта) проводится через 24 ч (после полной полимеризации герметика).
- После уплотнения исследуемого грунта, с помощью кислотного силиконового герметика к корпусу рабочей камеры измерительной ячейки прикрепляется верхний торцевой диск. Следующий этап сборки (установка температурных датчиков и компенсационной трубки) проводится через 1 ч (после частичной полимеризации герметика).

Использование герметика при установке как верхнего, так и нижнего торцевых дисков является основным конструктивным недостатком измерительной ячейки, который приводит к значительному увеличению продолжительности эксперимента (до двух суток). В тоже время, предложенный способ фиксации торцевых дисков обеспечивает необходимую степень герметизации.

- Устанавливаются температурные датчики и компенсационная трубка. Термопары пронумерованы (Рисунок 2.22) и устанавливаются в заранее определенном порядке, одинаковом для каждого эксперимента. Горячие спаи термопар вводятся в рабочую область измерительной ячейки на глубину 22,9 мм. Компенсационная трубка вводится в рабочую область измерительной ячейки на глубину 3 мм. Алгоритм фиксации температурных датчиков и компенсационной трубки приведен в параграфе 2.1.1.

- С помощью клейкой ленты закрепляется первый слой теплоизоляции.
- Элементы Пельтье прикрепляются к верхнему и нижнему торцевым дискам. На контактирующие поверхности предварительно тонким слоем наносится теплопроводящая паста КПТ-8.

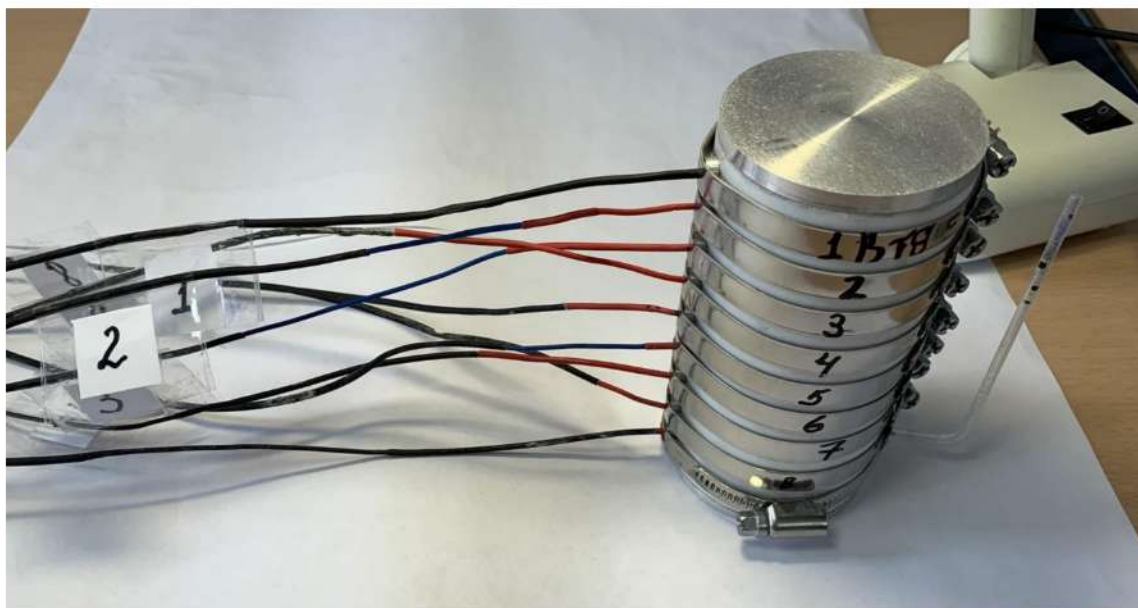


Рис. 2.22. Рабочая камера измерительной ячейки в сборе

- Радиаторы (система радиатор-вентилятор (см. Параграф 2.1.1)) прикрепляются к элементам Пельтье. На контактирующие поверхности предварительно тонким слоем наносится теплопроводящая паста КПТ-8.
- Верхний и нижний радиаторы соединяются с помощью резьбовых штанг и гаек.
- С помощью клейкой ленты закрепляется второй слой теплоизоляции. Следует отметить, что на рисунке 2.23 изображена первая версия собранной измерительной ячейки. В следующих версиях второй слой теплоизоляции оказывался выше.
- Собранная измерительная ячейка помещается в фанерный короб, предварительно установленный в холодильной камере (в холодильной камере поддерживается температура минус 1,5 °С). К компенсационной трубке с помощью силиконового переходника присоединяется стеклянная мерная пипетка (Рисунок 2.19). Элементы Пельтье подключаются к программируемому источнику питания RIGOL DP 832, вентиляторы подключаются к блоку питания компьютерного типа. Фанерный короб накрывается теплоизолирующей крышкой.

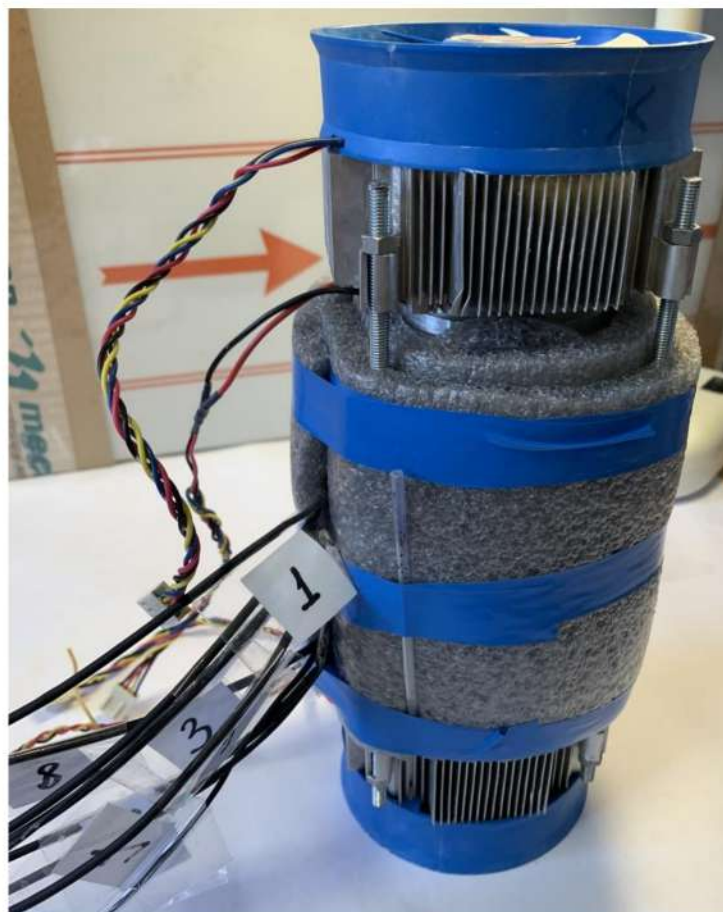


Рис. 2.23. Измерительная ячейка в сборе

- Аналого-цифровой преобразователь ZET 220 помещается в изолированный короб, предварительно установленный в холодильной камере, и подключается к ЭВМ. Следует отметить, что после калибровки термопары от аналого-цифрового преобразователя не отключаются.
- Сосуд Дьюара, заполненный водо-ледяной смесью, помещается в термостат, предварительно установленный в холодильной камере.
- Холодные спаи термопар, закрытые герметизирующей оболочкой, погружаются в водо-ледяную смесь (см. Параграф 2.1.5).

#### 2.2.4. МНОГОКРАТНОЕ ЧАСТИЧНОЕ ЗАМОРАЖИВАНИЕ- ОТТАИВАНИЕ ИССЛЕДУЕМОГО ГРУНТА

На ЭВМ запускаются программный комплекс «ZETLAB», программы «ZFormula» и «Многоканальный осциллограф». В программе «ZFormula»

задаются уравнения преобразования напряжения в температуру с целью моделирования выходных сигналов, поступающих с аналого-цифрового преобразователя (см. Параграф 2.1.3). В программе «Многоканальный осциллограф» настраиваются необходимые параметры для корректного графического отображения моделированных сигналов в координатах температура-время.

Проводится серия циклов по частичному замораживанию-оттаиванию засоленного влажного грунта.

В ходе одного цикла источник питания RIGOL DP 832 в соответствии с заранее заданной программой (см. Параграф 2.1.4):

- в течение 43 200 с (12 ч) подает на нижний элемент Пельтье напряжение 0,2 В, поддерживая тем самым грунт, расположенный в нижней части, высотой 25 мм, рабочей камеры измерительной ячейки, в талом состоянии;
- в течение 9 000 с (2,5 ч) подает на верхний элемент Пельтье напряжение 1,5 В (протаивание грунта). Затем в течение 34 200 с (9,5 ч) ступенчато повышает, в диапазоне от 0,4 до 5 В, подаваемое на верхний элемент Пельтье напряжение (промерзание грунта).

## 2.2.5. ИЗВЛЕЧЕНИЕ ОБРАЗЦОВ ГРУНТА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИХ ВЛАЖНОСТИ

После серии циклов по частичному замораживанию-оттаиванию исследуемого грунта измерительная ячейка вынимается из холодильной камеры и разбирается до состояния, аналогичного приведенному на рисунке 2.22. Затем аккуратно открепляется верхний торцевой диск.

Последовательно извлекаются четыре образца грунта высотой  $(27,8 \pm 3,0)$  мм. Следует отметить, что грунт отбирается после этапа частичного замораживания. Поровый раствор в стеклянной мерной пипетке (при наличии) приливается к нижнему образцу. Отобранные образцы грунта

помещаются в герметичные контейнеры (Рисунок 2.24), что препятствует возможной потере влаги до высушивания.

Образцы грунта, помещенные в тонкостенные алюминиевые контейнеры (Рисунок 2.25), высушиваются до постоянной массы согласно ГОСТ 5180-2015 не позднее чем через 24 ч после пробоотбора.



Рис. 2.24. Образцы грунта  
в герметичных контейнерах



Рис. 2.25. Тонкостенный  
алюминиевый контейнер

Влажность грунта  $w$ , %, вычисляется по формуле [15]:

$$w = 100 \cdot \frac{m_1 - m_0}{m_0 - m}, \quad (2.1)$$

где  $m_1$  – масса влажного грунта с контейнером, г;

$m_0$  – масса высушенного грунта с контейнером, г;

$m$  – масса пустого контейнера, г.

#### 2.2.6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРИДА НАТРИЯ В ПОРОВОМ РАСТВОРЕ

Из каждого образца грунта готовится водная вытяжка согласно ГОСТ 26423-85. Для этого к обезвоженному образцу грунта, помещенному в коническую колбу, приливается дистиллированная вода в соотношении один к

трет. Грунт с водой перемешиваются в течение 3 мин. Затем полученная суспензия отстаивается в течение 8 мин. Фильтрация водной вытяжки не проводится.

В Лаборатории экологических исследований ТюмГУ с помощью кондуктометра, измеряющего электрическую проводимость, определяется общая минерализация водных вытяжек в пересчете на NaCl. Между измерениями датчик кондуктометра тщательно промывается дистиллированной водой.

Концентрация ионов NaCl в поровом растворе грунта  $C_{п.р.}^{NaCl}$ , мг/л, вычисляется по формуле:

$$C_{п.р.}^{NaCl} = \frac{C_{в.в.} \cdot 3}{w}, \quad (2.2)$$

где  $C_{в.в.}$  – концентрация NaCl в водной вытяжке, мг/л;

$w$  – влажность грунта, д. ед.

Масса соли NaCl в грунте  $m^{NaCl}$ , г, вычисляется по формуле:

$$m^{NaCl} = C_{п.р.}^{NaCl} \cdot V_{п.р.}, \quad (2.3)$$

где  $C_{п.р.}^{NaCl}$  – концентрация ионов NaCl в поровом растворе, г/л;

$V_{п.р.}$  – объем порового раствора, л.

Объем порового раствора грунта  $V_{п.р.}$ , л, вычисляется по формуле:

$$V_{п.р.} = \frac{m_{п.р.}}{\rho_{п.р.}(C_{п.р.}^{NaCl})}, \quad (2.4)$$

где  $m_{п.р.}$  – масса порового раствора, г;

$\rho_{п.р.}(C_{п.р.}^{NaCl})$  – плотность порового раствора при концентрации  $C_{п.р.}^{NaCl}$ , г/л.

## ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Было проведено пять экспериментов, в каждом из которых происходило десятикратное частичное замораживание-оттаивание грунта, а также один, шестой, эксперимент с тридцатикратным частичным замораживанием-оттаиванием грунта.

Для каждого из экспериментов выполнялись следующие условия:

- В качестве грунта использовался песок мелкий. Гранулометрический состав используемого грунта приведен в таблице 2.3.
- Грунт полностью влагонасыщался водным раствором хлорида натрия с массовой концентрацией 10 г/л.
- Глубина промерзания грунта не превышала 8,5 см.

Для отслеживания нижней границы фронта промерзания была определена температура начала замерзания исследуемого грунта при концентрации порового раствора 10 г/л и влажности 20 % (Рисунок 3.1):

$$t_{н.з.} = -1,7 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

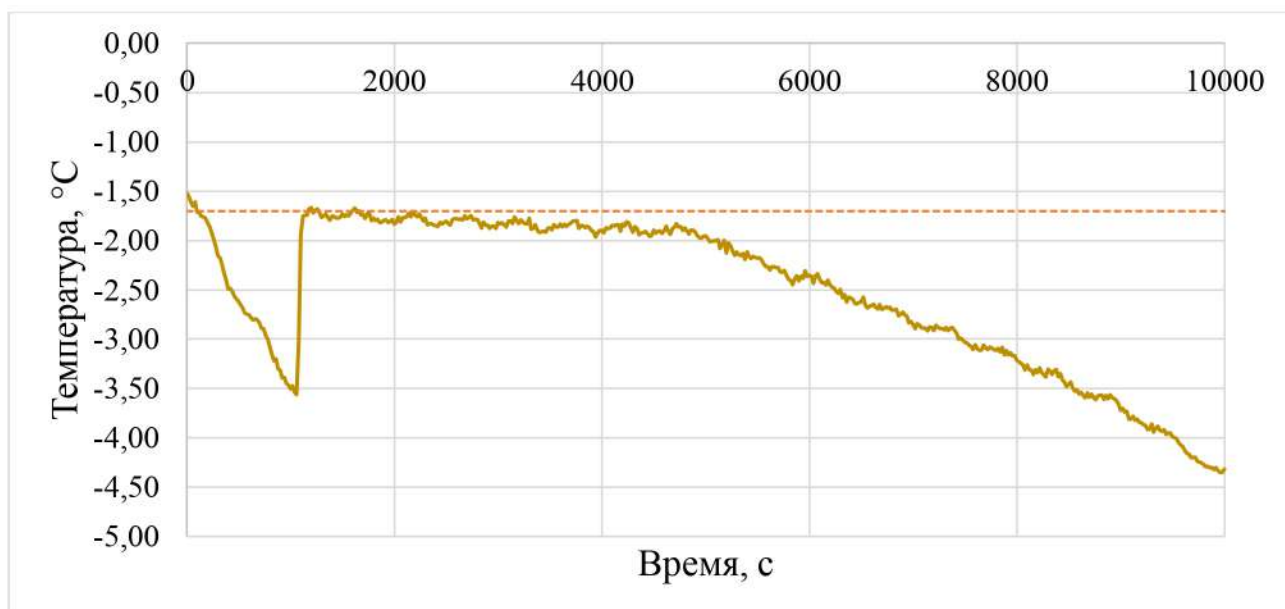


Рис. 3.1. Кривая охлаждения исследуемого грунта, насыщенного водным раствором NaCl (концентрация порового раствора – 10 г/л, влажность – 20 %, температура охлаждения – минус 5 °C)



- Частичное замораживание и оттаивание грунта происходило сверху вниз. Во время промерзания грунта на верхнем торце измерительной ячейки температура не опускалась ниже минус 12 °С. Во время оттаивания грунта температура на верхнем торце измерительной ячейки не превышала 5 °С.

- Нижняя часть грунта, высотой 2,5 см, всегда поддерживалась в талом состоянии при температуре около 1 °С.

- Образцы грунта извлекались после этапа частичного замораживания. Указанные условия экспериментов совпадают с условиями осеннего ежедневного промерзания и оттаивания сезонно-талого слоя, загрязненного легкорастворимой солью NaCl.

Ниже приведены результаты экспериментов.

### 3.1. РЕЗУЛЬТАТЫ ПЕРВОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

В первом эксперименте, после уплотнения и влагонасыщения грунта, влажность грунта по глубине измерительной ячейки была распределена равномерно и составляла  $(21,7 \pm 0,7) \%$ .

Из таблицы 3.1 видно, что при промерзании исследуемого грунта происходило отжатие части порового раствора из мерзлой зоны.

Таблица 3.1

Эксперимент № 1. Влажность образцов грунта

| Номер образца | Глубина отбора, мм | Масса влажного грунта $m_{вл}$ , г | Масса сухого грунта $m_{сух}$ , г | Влажность $w$ , % |
|---------------|--------------------|------------------------------------|-----------------------------------|-------------------|
| 1             | 0 – 27,7           | $91,30 \pm 0,06$                   | $76,61 \pm 0,06$                  | $19,18 \pm 0,17$  |
| 2             | 27,8 – 55,5        | $80,38 \pm 0,06$                   | $66,54 \pm 0,06$                  | $20,80 \pm 0,20$  |
| 3             | 55,6 – 83,3        | $78,25 \pm 0,06$                   | $64,23 \pm 0,06$                  | $21,83 \pm 0,21$  |
| 4             | 83,4 – 111,2       | $92,87 \pm 0,06$                   | $74,35 \pm 0,06$                  | $24,91 \pm 0,18$  |

В свою очередь, ионы соли NaCl мигрировали из талой зоны грунта в мерзлую. Одновременно с этим наблюдалась и миграция ионов соли из нижней части мерзлой зоны в верхнюю. В результате концентрация порового раствора

оказалась наиболее высокой в интервале от 27,8 до 55,5 мм. Об этом свидетельствуют данные, представленные в таблице 3.2.

Таблица 3.2

Эксперимент № 1. Концентрация порового раствора и засоленность образцов грунта

| Номер образца | Глубина отбора, мм | Масса соли NaCl до эксперимента $m_{до}^{NaCl}$ , г | Концентрация NaCl в водной вытяжке $C_{в.в.}^{NaCl}$ , мг/л | Концентрация NaCl в поровом растворе $C_{п.р.}^{NaCl}$ , г/л | Масса соли NaCl после эксперимента $m_{после}^{NaCl}$ , г |
|---------------|--------------------|---|---|--|---|
| 1             | 0 – 27,7           | 0,165 ± 0,005                                       | 926,7 ± 20  | 14,50 ± 0,44   | 0,211 ± 0,008   |
| 2             | 27,8 – 55,5        | 0,144 ± 0,005                                       | 1104 ± 40   | 15,92 ± 0,73   | 0,218 ± 0,012   |
| 3             | 55,6 – 83,3        | 0,139 ± 0,005                                       | 491,2 ± 20  | 6,75 ± 0,34  | 0,094 ± 0,006   |
| 4             | 83,4 – 111,2       | 0,160 ± 0,005                                       | 635,4 ± 20  | 7,65 ± 0,30  | 0,141 ± 0,006   |

### 3.2. РЕЗУЛЬТАТЫ ВТОРОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Во втором эксперименте, после уплотнения и влагонасыщения грунта, влажность грунта по глубине измерительной ячейки была распределена равномерно и составляла  $(18,9 \pm 0,7)$  %.

Наблюдалось отжатие порового раствора из верхней части грунта, лежащей в интервале от 0 до 27,7 мм, в нижележащие слои. Кроме того, отмечалось отжатие части порового раствора из мерзлой зоны (Таблица 3.3).

Таблица 3.3

Эксперимент № 2. Влажность образцов грунта

| Номер образца | Глубина отбора, мм | Масса влажного грунта $m_{вл}$ , г | Масса сухого грунта $m_{сух}$ , г | Влажность $w$ , % |
|---------------|--------------------|------------------------------------|-----------------------------------|-------------------|
| 1             | 0 – 27,7           | 87,10 ± 0,06                       | 75,69 ± 0,06                      | 15,07 ± 0,17      |
| 2             | 27,8 – 55,5        | 88,11 ± 0,06                       | 74,00 ± 0,06                      | 19,07 ± 0,18      |
| 3             | 55,6 – 83,3        | 79,39 ± 0,06                       | 66,13 ± 0,06                      | 20,05 ± 0,20      |
| 4             | 83,4 – 111,2       | 95,44 ± 0,06                       | 78,75 ± 0,06                      | 21,19 ± 0,17      |

Из таблицы 3.4 видно, что ионы соли NaCl мигрировали из нижней половины грунта в верхнюю, в том числе из талой зоны в мерзлую. В результате концентрация порового раствора оказалась наиболее высокой в низкотемпературной области вблизи верхнего торца измерительной ячейки.

Таблица 3.4

Эксперимент № 2. Концентрация порового раствора и засоленность образцов грунта

| Номер образца | Глубина отбора, мм | Масса соли NaCl до эксперимента $m_{до}^{NaCl}$ , г | Концентрация NaCl в водной вытяжке $C_{в.в.}^{NaCl}$ , мг/л | Концентрация NaCl в поровом растворе $C_{п.р.}^{NaCl}$ , г/л | Масса соли NaCl после эксперимента $m_{после}^{NaCl}$ , г |
|---------------|--------------------|---|---|--|---|
| 1             | 0 – 27,7           | 0,142 ± 0,005                                       | 937,7 ± 20  | 18,66 ± 0,61   | 0,211 ± 0,009   |
| 2             | 27,8 – 55,5        | 0,139 ± 0,005                                       | 935,5 ± 20  | 14,72 ± 0,45   | 0,206 ± 0,008   |
| 3             | 55,6 – 83,3        | 0,124 ± 0,005                                       | 560,6 ± 20  | 8,39 ± 0,38  | 0,111 ± 0,006   |
| 4             | 83,4 – 111,2       | 0,148 ± 0,005                                       | 357,3 ± 20  | 5,06 ± 0,32  | 0,084 ± 0,006   |

### 3.3. РЕЗУЛЬТАТЫ ТРЕТЬЕГО ЭКСПЕРИМЕНТА

В третьем эксперименте, после уплотнения и влагонасыщения грунта, влажность грунта по глубине измерительной ячейки была распределена равномерно и составляла  $(20,5 \pm 0,7) \%$ .

Из таблицы 3.5 видно, что поровый раствор отжимался от фронта промерзания, что привело к уменьшению влагосодержания во всей мерзлой части грунта.

Таблица 3.5

Эксперимент № 3. Влажность образцов грунта

| Номер образца | Глубина отбора, мм | Масса влажного грунта $m_{вл}$ , г | Масса сухого грунта $m_{сух}$ , г | Влажность $w$ , % |
|---------------|--------------------|------------------------------------|-----------------------------------|-------------------|
| 1             | 0 – 27,7           | 80,50 ± 0,06                       | 68,83 ± 0,06                      | 17,81 ± 0,19      |
| 2             | 27,8 – 55,5        | 86,59 ± 0,06                       | 72,07 ± 0,06                      | 20,15 ± 0,18      |

| Номер образца | Глубина отбора, мм | Масса влажного грунта $m_{вл}$ , г | Масса сухого грунта $m_{сух}$ , г | Влажность $w$ , % |
|---------------|--------------------|------------------------------------|-----------------------------------|-------------------|
| 3             | 55,6 – 83,3        | 89,83 ± 0,06                       | 74,67 ± 0,06                      | 20,30 ± 0,18      |
| 4             | 83,4 – 111,2       | 94,96 ± 0,06                       | 76,89 ± 0,06                      | 23,50 ± 0,17      |

В третьем эксперименте не наблюдалось опреснения порового раствора в интервале от 55,6 до 83,3 мм в отличие от первого и второго экспериментов. Однако сохранялась миграция ионов соли NaCl из талой зоны грунта в мерзлую. При этом, концентрация порового раствора оказалась наиболее высокой в интервале от 27,8 до 55,5 мм (Таблица 3.6).

Таблица 3.6

Эксперимент № 3. Концентрация порового раствора и засоленность образцов грунта

| Номер образца | Глубина отбора, мм | Масса соли NaCl до эксперимента $m_{до}^{NaCl}$ , г | Концентрация NaCl в водной вытяжке $C_{в.в.}^{NaCl}$ , мг/л | Концентрация NaCl в поровом растворе $C_{п.р.}^{NaCl}$ , г/л | Масса соли NaCl после эксперимента $m_{после}^{NaCl}$ , г |
|---------------|--------------------|---|---|--|---|
| 1             | 0 – 27,7           | 0,140 ± 0,005                                       | 844,7 ± 20  | 14,23 ± 0,49   | 0,172 ± 0,008   |
| 2             | 27,8 – 55,5        | 0,147 ± 0,005                                       | 1105 ± 40   | 16,45 ± 0,75   | 0,237 ± 0,013   |
| 3             | 55,6 – 83,3        | 0,152 ± 0,005                                       | 746,4 ± 20  | 11,03 ± 0,39   | 0,166 ± 0,007   |
| 4             | 83,4 – 111,2       | 0,157 ± 0,005                                       | 348,6 ± 20  | 4,45 ± 0,29  | 0,080 ± 0,006   |

### 3.4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧЕТВЕРТОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

В четвертом эксперименте, после уплотнения и влагонасыщения грунта, влажность грунта по глубине измерительной ячейки была распределена равномерно и составляла (19,6 ± 0,7) %.

Наблюдалось отжатие части порового раствора из мерзлой зоны (Таблица 3.7).

Эксперимент № 4. Влажность образцов грунта

| Номер образца | Глубина отбора, мм | Масса влажного грунта $m_{вл}$ , г | Масса сухого грунта $m_{сух}$ , г | Влажность $w$ , % |
|---------------|--------------------|------------------------------------|-----------------------------------|-------------------|
| 1             | 0 – 27,7           | 74,20 ± 0,06                       | 62,87 ± 0,06                      | 18,02 ± 0,21      |
| 2             | 27,8 – 55,5        | 82,63 ± 0,06                       | 69,10 ± 0,06                      | 19,58 ± 0,19      |
| 3             | 55,6 – 83,3        | 96,61 ± 0,06                       | 80,68 ± 0,06                      | 19,74 ± 0,16      |
| 4             | 83,4 – 111,2       | 101,41 ± 0,06                      | 83,97 ± 0,06                      | 20,77 ± 0,16      |

Как видно из таблицы 3.8, наблюдалась незначительная миграция ионов соли NaCl из талой части грунта в мерзлую. В тоже время отмечалась резкая интенсификация процесса миграции ионов соли из нижней части мерзлой зоны в верхнюю. В результате поровый раствор оказался наиболее концентрированным в интервале от 27,8 до 55,5 мм и наименее концентрированным в интервале от 55,6 до 83,3 мм.

Таблица 3.8

Эксперимент № 4. Концентрация порового раствора и засоленность образцов грунта

| Номер образца | Глубина отбора, мм | Масса соли NaCl до эксперимента $m_{до}^{NaCl}$ , г | Концентрация NaCl в водной вытяжке $C_{в.в.}^{NaCl}$ , мг/л | Концентрация NaCl в поровом растворе $C_{п.р.}^{NaCl}$ , г/л | Масса соли NaCl после эксперимента $m_{после}^{NaCl}$ , г |
|---------------|--------------------|---|---|--|---|
| 1             | 0 – 27,7           | 0,123 ± 0,005                                       | 1066 ± 40   | 17,75 ± 0,87   | 0,199 ± 0,012   |
| 2             | 27,8 – 55,5        | 0,135 ± 0,005                                       | 1061 ± 40   | 16,26 ± 0,77   | 0,218 ± 0,012   |
| 3             | 55,6 – 83,3        | 0,158 ± 0,005                                       | 272,6 ± 20  | 4,14 ± 0,34  | 0,066 ± 0,006   |
| 4             | 83,4 – 111,2       | 0,164 ± 0,005                                       | 537,7 ± 20  | 7,77 ± 0,35  | 0,135 ± 0,007   |

### 3.5. РЕЗУЛЬТАТЫ ПЯТОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

В пятом эксперименте, после уплотнения и влагонасыщения грунта, влажность грунта по глубине измерительной ячейки была распределена равномерно и составляла  $(19,4 \pm 0,7)$  %.

Из таблицы 3.9 видно, что часть порового раствора мигрировала из верхней половины грунта в нижнюю. При этом значительное уменьшение влагосодержания грунта отмечалось в интервале от 0 до 27,7 мм.

Таблица 3.9

## Эксперимент № 5. Влажность образцов грунта

| Номер образца | Глубина отбора, мм | Масса влажного грунта $m_{вл}$ , г | Масса сухого грунта $m_{сух}$ , г | Влажность $w$ , % |
|---------------|--------------------|------------------------------------|-----------------------------------|-------------------|
| 1             | 0 – 27,7           | $80,75 \pm 0,06$                   | $69,21 \pm 0,06$                  | $16,67 \pm 0,19$  |
| 2             | 27,8 – 55,5        | $87,29 \pm 0,06$                   | $73,40 \pm 0,06$                  | $18,92 \pm 0,18$  |
| 3             | 55,6 – 83,3        | $85,68 \pm 0,06$                   | $71,28 \pm 0,06$                  | $20,20 \pm 0,19$  |
| 4             | 83,4 – 111,2       | $102,42 \pm 0,06$                  | $84,48 \pm 0,06$                  | $21,24 \pm 0,16$  |

В пятом эксперименте миграция ионов соли NaCl происходила во многом аналогично миграции во втором эксперименте. Однако, наблюдалось большее опреснение порового раствора в интервале от 55,6 до 83,3 мм. Концентрация порового раствора оказалась наиболее высокой в верхней мерзлой части грунта (Таблица 3.10).

Таблица 3.10

## Эксперимент №5. Концентрация порового раствора и засоленность образцов грунта

| Номер образца | Глубина отбора, мм | Масса соли NaCl до эксперимента $m_{до}^{NaCl}$ , г | Концентрация NaCl в водной вытяжке $C_{в.в.}^{NaCl}$ , мг/л | Концентрация NaCl в поровом растворе $C_{п.р.}^{NaCl}$ , г/л | Масса соли NaCl после эксперимента $m_{после}^{NaCl}$ , г |
|---------------|--------------------|---|---|--|---|
| 1             | 0 – 27,7           | $0,133 \pm 0,005$                                   | $919,6 \pm 20$  | $16,55 \pm 0,55$   | $0,189 \pm 0,008$   |
| 2             | 27,8 – 55,5        | $0,141 \pm 0,005$                                   | $799,3 \pm 20$  | $12,67 \pm 0,44$   | $0,175 \pm 0,008$   |
| 3             | 55,6 – 83,3        | $0,137 \pm 0,005$                                   | $544,3 \pm 20$  | $8,08 \pm 0,37$  | $0,116 \pm 0,006$   |
| 4             | 83,4 – 111,2       | $0,163 \pm 0,005$                                   | $449,7 \pm 20$  | $6,35 \pm 0,33$  | $0,114 \pm 0,007$   |

## 3.6. РЕЗУЛЬТАТЫ ШЕСТОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

В шестом эксперименте, после уплотнения и влагонасыщения грунта, влажность грунта по глубине измерительной ячейки была распределена равномерно и составляла  $(21,3 \pm 0,7) \%$ .

Наблюдалась миграция порового раствора из верхней половины грунта, лежащей в интервале от 0 до 55,5 мм, в нижележащие слои. Из таблицы 3.11 также видно, что происходило отжатие части порового раствора из мерзлой зоны в талую.

Таблица 3.11

Эксперимент № 6. Влажность образцов грунта

| Номер образца | Глубина отбора, мм | Масса влажного грунта $m_{вл}$ , г | Масса сухого грунта $m_{сух}$ , г | Влажность $w$ , % |
|---------------|--------------------|------------------------------------|-----------------------------------|-------------------|
| 1             | 0 – 27,7           | $85,14 \pm 0,06$                   | $71,21 \pm 0,06$                  | $19,56 \pm 0,18$  |
| 2             | 27,8 – 55,5        | $86,71 \pm 0,06$                   | $72,24 \pm 0,06$                  | $20,03 \pm 0,18$  |
| 3             | 55,6 – 83,3        | $97,02 \pm 0,06$                   | $79,63 \pm 0,06$                  | $21,84 \pm 0,17$  |
| 4             | 83,4 – 111,2       | $86,51 \pm 0,06$                   | $69,82 \pm 0,06$                  | $23,90 \pm 0,19$  |

В шестом эксперименте отмечалось значительное опреснение порового раствора в нижней половине исследуемого грунта, лежащей в интервале от 55,6 до 111,2 мм. При этом, аналогично результатам второго и пятого экспериментов, поровый раствор оказался наиболее концентрированным в верхней части мерзлого грунта, лежащей в интервале от 0 до 27,7 мм (Таблица 3.12).

Эксперимент № 6. Концентрация порового раствора и  
засоленность образцов грунта

| Номер образца | Глубина отбора, мм | Масса соли NaCl до эксперимента<br>$m_{до}^{NaCl}$ , г | Концентрация NaCl в водной вытяжке<br>$C_{в.в.}^{NaCl}$ , мг/л | Концентрация NaCl в поровом растворе<br>$C_{п.р.}^{NaCl}$ , г/л | Масса соли NaCl после эксперимента<br>$m_{после}^{NaCl}$ , г |
|---------------|--------------------|--|--|---|--|
| 1             | 0 – 27,7           | 0,151 ± 0,005  | 1422 ± 40  | 21,81 ± 0,82  | 0,300 ± 0,014  |
| 2             | 27,8 – 55,5        | 0,153 ± 0,005  | 995,8 ± 20   | 14,91 ± 0,44  | 0,214 ± 0,008  |
| 3             | 55,6 – 83,3        | 0,169 ± 0,005  | 266,9 ± 20   | 3,67 ± 0,30   | 0,064 ± 0,006  |
| 4             | 83,4 – 111,2       | 0,148 ± 0,005  | 311,4 ± 20   | 3,91 ± 0,28   | 0,065 ± 0,005  |

Отдельно следует отметить, что при тридцатикратном частичном замерзании-оттаивании грунта интенсивность миграции ионов соли NaCl в верхнюю мерзлую часть грунта и опреснения порового раствора в нижней половине грунта оказались более выраженными, чем при десятикратном частичном замерзании-оттаивании грунта.

Для того чтобы установить является ли закономерным более интенсивные миграция и опреснение при более многократном замерзании и оттаивании, необходимо в перспективе продолжение серии экспериментов по тридцатикратному частичному замерзанию-оттаиванию грунта.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе решены следующие задачи:

1. Спроектирована и собрана экспериментальная установка, позволяющая исследовать миграцию ионов солей при направленном многократном промерзании грунта.
2. Разработана методика проведения эксперимента.
3. Проведено шесть экспериментов, в каждом из которых происходило многократное частичное замораживание-оттаивание песчаного грунта, насыщенного водным раствором NaCl.

Получены экспериментальные данные, демонстрирующие следующие физические процессы:

- при промерзании песчаного полностью влагонасыщенного грунта происходит частичное отжатие вниз поровой воды из мерзлой зоны;
- наблюдается заметная миграция ионов соли NaCl вверх в промерзающую зону.

Указанные процессы регулярно наблюдались в каждом из экспериментов.

Очевидно, что существует нелинейная зависимость между отжатием вниз поровой воды и миграцией ионов NaCl вверх в мерзлую часть грунта.

Однако для проведения дальнейшего анализа требуется накопление базы экспериментальных данных, которое может быть достигнуто путем проведения новых серий экспериментов с другими параметрами.

Предложенная экспериментальная установка может быть использована для анализа процессов засоления грунтов разного состава при решении конкретных инженерных задач в ходе создания промышленных, инфраструктурных и строительных объектов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Baker G. Salt redistribution during freezing of saline sand columns with applications to subsea permafrost: dr. philos. sci. dis. Fairbanks, 1987. 232 p.
2. Bing H., He P., Zhang Y. Cyclic freeze-thaw as a mechanism for water and salt migration in soil. *Environmental Earth Sciences*. 2015. Vol. 74. No. 1. Pp. 675-681.
3. Chuvilin E.M., Ershov E.D., Naletova N.S. Mass transfer and structure formation in freezing saline soils // *Proceedings of the Seventh International Conference on Permafrost*. 1998. Pp. 173–179.
4. Qiu G., Chamberlain E., Iskandar I. Ion and moisture migration and frost heave in freezing morin clay // *Journal of Glaciology and Geocryology*. 1986. Vol. 8. No. 1. Pp. 1-13.
5. Status of the World's Soil Resources. Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils / L. Montanarella [et al.]. Rome: FAO and ITPS, 2015. 607 p.
6. The discussion on the transferring direction of solute during freezing / G. Qiu [et al.] // *Proceedings of the Third National Conference on Geocryology*. 1989. Pp. 211–217.
7. Анисимова Н.П., Павлова Н.А. Гидрогеохимические исследования криолитозоны Центральной Якутии. Новосибирск: Гео, 2014. 189 с.
8. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Г.В. Алексеев [и др.]. Москва: Росгидромет, 2014. 1008 с.
9. Геокриологический словарь / Г.И. Дубиков [и др.]. Москва: ГЕОС, 2003. 140 с.
10. Гляциологический словарь / В.М. Котляков [и др.]. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1984. 526 с.
11. ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава: дата введения 2015-07-01. Москва: Стандартинформ, 2019. 19 с.

12. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация: дата введения 2021-01-01. Москва: Стандартинформ, 2020. 37 с.

13. ГОСТ 26423-85. Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, рН и плотного остатка водной вытяжки: дата введения 1986-01-01. Москва: Стандартинформ, 2011. 4 с.

14. ГОСТ 30416-2020. Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения: дата введения 2021-09-01. Москва: Российский институт стандартизации, 2021. 14 с.

15. ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик: дата введения 2016-04-01. Москва: Стандартинформ, 2019. 19 с.

16. ГОСТ 59540-2021. Грунты. Методы лабораторного определения степени засоленности: дата введения 2021-09-01. Москва: Стандартинформ, 2021. 23 с.

17. Григорьев Б.В. Замерзание влажных грунтов в равновесных и неравновесных условиях: специальность 01.04.14 Теплофизика и теоретическая теплотехника: дис. канд. техн. наук. Тюмень, 2013. 135 с.

18. Григорьев Б.В. Экспериментальное изучение миграции ионов растворенной соли NaCl при вертикально направленном замерзании грунта // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. № 7. С. 124-130.

19. Грунтоведение / В.Т. Трофимов [и др.]. Москва: Издательство Московского университета, 2005. 1024 с.

20. Ершов Э.Д. Общая геокриология. Москва: Издательство Московского университета, 2002. 682 с.

21. Налетова Н.С. Массоперенос и криогенное структуро- и текстурообразование в промерзающих засоленных породах: специальность 04.00.07 Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение: дис. канд. геол.-минерал. наук. Москва, 1996. 23 с.

22. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2021 году. Государственный доклад. Москва: Минприроды России, 2022. 684 с.

23. Рабинович В.А., Хавин З.Я. Краткий химический справочник. Ленинград: Химия, 1978. 392 с.

24. СП 25.13330.2020. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах: дата введения 2021-07-01. Москва: Стандартинформ, 2020. 136 с.

25. Тимофеев А.М., Кравцова О.Н., Протодьяконова Н.А. Экспериментальное исследование перераспределения соли при промерзании засоленных грунтов и водных растворов // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 7. С. 88-90.

26. Фоминых Д.Е. Техногенное засоление почв как геоэкологический фактор при разработке нефтяных месторождений Среднего Приобья: специальность 25.00.36 Геоэкология (науки о земле): дис. канд. геол.-минерал. наук. Томск, 2013. 22 с.

27. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. Учебное пособие. Москва: Высшая школа, 1973. 448 с.

28. Экспериментальные исследования процессов массопереноса в промерзающих засоленных породах / Э.Д. Ершов [и др.] // Инженерная геология. 1992. № 4. С. 27-35.