

На правах рукописи



Григорьев Борис Владимирович

**ЗАМЕРЗАНИЕ ВЛАЖНЫХ ГРУНТОВ В РАВНОВЕСНЫХ И
НЕРАВНОВЕСНЫХ УСЛОВИЯХ**

Специальность 01.04.14 Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Тюмень - 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Тюменский государственный университет»

Научный руководитель

Шабаров Александр Борисович
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты

Шуваев Анатолий Николаевич
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный
архитектурно–строительный университет»,
заведующий кафедрой автомобильные дороги
и аэродромы
(г. Тюмень)

Виноградов Андрей Владимирович
кандидат физико-математических наук,
ФГБУН Институт теплофизики УрО РАН,
старший научный сотрудник
(г. Екатеринбург)

Ведущая организация

ОАО «Институт «Нефтегазпроект» (г.Тюмень)

Защита состоится 4 июля 2013 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.274.10 при ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный университет» по адресу: 625003, г. Тюмень, ул. Перекопская 15а, ауд. 410.

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном центре ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный университет».

Автореферат разослан 3 июня 2013 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.274.10

д. ф.-м. н.



Удовиченко С.Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Продолжающаяся в настоящее время интенсивная добыча и активная разведка энергоресурсов, минерального сырья, строительство автодорог, нефте-газопроводов и других объектов на территории занимаемой вечной мерзлотой или подвергающейся сезонному замерзанию-оттаиванию стимулирует и делает актуальными теплофизические и инженерные исследования криолитозоны. Известно, что присутствие в грунте воды и льда при температуре фазового перехода оказывает решающее влияние на изменение реологических, прочностных и теплофизических характеристик грунта при изменении его агрегатного состояния. Особенностью процесса замерзания грунта является тот факт, что часть грунтовой воды не претерпевает фазового превращения при достижении грунтом отрицательной температуры. При этом образуется, так называемая, незамерзшая вода, количество которой, помимо типа грунта, зависит от величины отрицательной температуры. Таким образом, теплофизические и механические свойства грунтов продолжают изменяться с изменением температуры в отрицательной области и зависят от изменения содержания в них незамерзшей воды. В большинстве случаев при моделировании процессов замерзания в расчет принимаются равновесные кривые зависимости содержания незамерзшей воды, и остаются неучтенными процессы неравновесного замерзания, обусловленные в первую очередь релаксационным процессом кристаллизации связанной воды. Недостаточное внимание уделяется проблеме определения содержания незамерзшей воды при различных направлениях изменения температуры, и этот фактор не учитывается в полной мере при прогнозировании криологических процессов. Необходимость получения обобщенной экспериментальной информации о вышеперечисленных явлениях для моделирования тепломассопереноса в мерзлых грунтах обуславливает актуальность данной работы.

Цель и задачи работы.

Целью работы является получение обобщенной экспериментальной информации о процессах равновесного и неравновесного замерзания различных типов влажных грунтов.

Для достижения целей поставлены и решены следующие задачи:

1. Создать экспериментальную установку и автоматизированную систему измерения необходимую для исследования процессов замерзания-оттаивания разных типов грунтов и предназначенную для определения количества незамерзшей воды калориметрическим методом.
2. Провести экспериментальное исследование процессов замерзания различных типов влажных грунтов в равновесных и неравновесных условиях.

3. Получить экспериментальные данные о параметрах гистерезиса в содержании незамерзшей воды между двумя направлениями изменения температуры грунта - замораживание и нагрев.

4. Разработать методику расчета температуры и влажности грунта с учетом интенсивности отвода тепла.

Научная новизна исследований состоит в следующем:

1. Предложен метод определения содержания незамерзшей воды в грунтах, основанный на использовании разработанной, запатентованной экспериментальной установки. Суть метода заключается в фиксировании и учете количества энергии, выделяющейся из образца при его замораживании.

2. Калориметрическим методом, с использованием созданной экспериментальной установки получены новые экспериментальные данные о процессах замерзания различных типов грунтов при равновесных и неравновесных условиях отвода тепла. Получены экспериментальные данные о параметрах гистерезиса в суглинистых грунтах.

3. Предложено и обосновано аналитическое описание содержания незамерзшей воды с учетом неравновесности системы грунт-лед-вода.

4. Разработана методика расчета температуры и влажности мерзлого грунта, позволяющая прогнозировать содержание незамерзшей воды в грунте при неравновесном процессе замораживания.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методика проведения и результаты экспериментальных исследований замерзания глины, суглинка, песка и торфа в равновесных и неравновесных условиях, в том числе полученные с использованием новой экспериментальной установки.

2. Эмпирические зависимости, определяющие содержание незамерзшей воды от температуры – в равновесных условиях и температуры и времени замораживания – в неравновесных условиях.

3. Экспериментальные данные о содержании незамерзшей воды при различных направлениях изменения температуры влажного суглинка – замораживание и оттаивание в отрицательной области температур.

4. Методика расчета влажности и температуры мерзлого грунта при неравновесном отводе тепла, сравнительный анализ полученных результатов с экспериментальными данными.

Практическая значимость работы.

Разработанная методика расчета процесса неравновесного замораживания, может быть использована при модернизации существующих программных комплексов, предназначенных для прогнозирования криологических процессов и явлений в нефтегазовой и строительной отраслях.

Полученные результаты существенно дополняют имеющиеся немногочисленные опытные данные о неравновесных процессах замерзания четырех наиболее распространенных типов грунтов - глины, суглинка, песка и торфа и дают возможность определить минимальное время, необходимо для достижения равновесного состояния в системе грунт-лед-вода при конкретной отрицательной температуре для выделенного объема грунта.

Созданные экспериментальные установки и соответствующие методы измерений позволяют определять содержание незамерзшей воды в грунтах в равновесных и неравновесных условиях.

Достоверность полученных результатов и выводов обеспечена использованием в экспериментальных исследованиях современных методов измерений и компьютерной техники с соответствующей оценкой погрешности измерений; основана на использовании фундаментальных уравнений теплофизики; обусловлена корректной постановкой задач; подтверждается достаточной обоснованностью принятых допущений и обеспечена количественным совпадением полученных расчетных и опытных данных.

Личный вклад автора состоит в разработке экспериментальных установок, в проведении экспериментальных исследований, анализе и интерпретации полученных экспериментальных данных, в разработке методики расчета, проведении и обобщении результатов численных расчетов. В опубликованных совместно с соавторами научных статьях, вклад соавторов равноценен.

Апробация работы. Результаты исследований докладывались и обсуждались на российских и международных межотраслевых научных семинарах и конференциях:

- Школа – семинар “Теплофизика, гидродинамика, теплотехника” под руководством Заслуженного деятеля науки РФ, д.т.н, профессора А.Б. Шабарова (Тюмень, 2011);
- Международная научно-практическая конференция по инженерному мерзлотоведению, посвященная 20-летию ООО НПО "Фундаментстройаркос"- (Тюмень, 2011);
- Научный семинар кафедры механики многофазных систем ТюмГУ (Тюмень, 2012);
- Научная конференция для студентов, аспирантов и молодых ученых «ИМЕНИТ-2012» (Тюмень, 2012);
- Международная научно - практическая конференция молодых ученых и специалистов нефтегазовой отрасли. ОАО «АК«Транснефть» (Тюмень, 2012);
- Международная научно - практическая конференция «Валихановские чтения-17» КГУ им. Ш. Уалиханова (Кокшетау, Казахстан, 2013).

- Школа – семинар “Теплофизика, гидродинамика, теплотехника” под руководством Заслуженного деятеля науки РФ, д.т.н, профессора А.Б. Шабарова (Тюмень, 2013);

Публикации. Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 11 работах, в том числе в 5 статьях, входящих в перечень ВАК. Их список приведен в конце автореферата, также получено решение о выдаче патента РФ на полезную модель.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка цитируемой литературы и приложения. Материал изложен на 135 страницах, включает 56 рисунков, 20 таблиц. Список цитируемой литературы составлен из 110 источников.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, формулируются цели и задачи исследования, пути их решения, изложена научная новизна, практическая значимость работы, приведены основные результаты и положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена обзору сведений о возникновении и развитии понятия - «незамерзшая вода», формированию представлений о явлениях и особенностях сопровождающих замерзание влажного грунта, основных закономерностях фазовых переходов вода-лед в пористых средах сформулированных ведущими теплофизиками и геокриологами разных стран. Настоящий уровень развития и теплофизики и геокриологии был бы невозможен без участия ряда исследователей, в разное время привнесших существенный вклад в формирование накопленного к настоящему времени объема теоретических основ и экспериментальных сведений о мерзлых грунтах: G.J. Vooucos, H.A. Цытович, М.И. Сумгин, З.А. Нерсесова, П. И. Мельников, Б. А. Савельев, Peter J. Williams, Michael W. Smith, Э.Д. Ершов, Duwayne M. Anderson, Allen R. Tice, А.А. Ананян, С.Е. Гречищев, Л.В. Чистотинов, Р.И. Гаврильев, Ю.С. Даниэлян, Б.Г. Аксенов, Я.Б. Горелик, В.С. Колунин, А.Н. Шуваев, Р. Hoekstra, и многих других.

Активное изучение криолитозоны началось в начале прошлого века, в 1920г. G.J. Vooucos, на основе своих исследований, показал что некоторое количество воды в грунте остается незамерзшим вплоть до температуры -78°C . Экспериментальные методы первой половины 20-го века, направленные на количественное определение незамерзшей воды в грунтах, а это, в первую очередь, dilatометрический, криоскопический и др., не отличались высокой точностью. Они могли дать скорее качественную оценку явления, но не количественное значение незамерзшей воды в грунте при конкретной отрицательной температуре. Ключевым фактором в решении этой проблемы было внедрение в 1953-57гг калориметрического метода З.А. Нерсесовой. Благодаря этому методу были получены зависимости содержания незамерзшей воды от отрицательной температуры для различных видов

грунтов. В последующем, благодаря многочисленным исследованиям Р.И. Гаврильева, П. И. Мельникова, О. Johansen, Peter J. Williams, и др., был установлен характер влияния содержания незамерзшей воды на теплофизические свойства грунтов. Необходимо отметить, что в работах С.Е. Гречищева, Л.В. Чистотинова, Ю.С. Даниэляна и др., затрагивается тема неравновесного замерзания, то есть замерзания при котором система лед-вода в грунте при рассматриваемой температуре не находится в состоянии устойчивого термодинамического равновесия. Отмечается, что для достижения равновесия требуется определенное время, характерное для каждого типа грунта. Проведенный анализ показал, что в существующих литературных источниках не полностью раскрывается процесс замерзания грунтов в неравновесных условиях, также недостаточное внимание уделяется явлению гистерезиса, что делает необходимым исследовать эти важные проблемы в настоящей работе.

Во **второй главе** приводится описание конструкции экспериментальной установки, в основе которой лежит калориметрический метод, позволяющей проводить исследования замерзания-оттаивания грунтов в равновесных и неравновесных условиях. Принципиальная схема установки представлена на рис. 1.

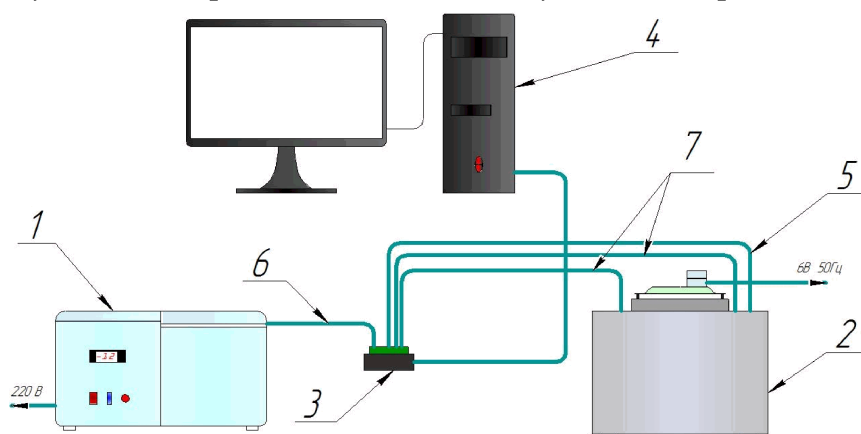


Рис.1. Экспериментальная установка

Установка включает в себя следующие элементы: криостат 1; калориметр 2; платиновые термометры сопротивления 5, 6, 7; аналогово-цифровой преобразователь 3; компьютер 4; бьюксы для грунта; три стакана различного диаметра; весы электронные.

Криостат необходим для замораживания образца грунта до заданной отрицательной температуры в диапазоне от 0 – -20°C . Криостат имеет возможности визуального наблюдения температуры термостатирующей жидкости, изменения температурного дифференциала, слива термостатирующей жидкости а также подключения внешнего контура охлаждения. Калориметр служит для определения теплового эффекта при оттаивании образцов мерзлого грунта. Датчиками температуры выступают два термометра сопротивления (ТСП Pt100), закрепленные на внутренней стенке калориметрического стакана. Три стакана разного диаметра

необходимы для изменения времени замораживания образца до одной и той же температуры.

Базовым уравнением в калориметрических исследованиях является уравнение теплового баланса, которое в данном случае имеет вид:

$$m_{\text{л}} = \frac{K(\vartheta_0 - \vartheta_n^{\text{л}}) - (t_{\text{Г}} - t_{\text{Х}}) \cdot (c_{\text{Г}} m_{\text{Г}} + c_{\text{В}} m_{\text{Висх}} + c_{\text{Б}} m_{\text{Б}})}{L_{\phi} + t_{\text{Х}} \cdot (c_{\text{В}} - c_{\text{Л}})} \quad (1)$$

Где K [Дж/К] - тепловое значение калориметра, $c_{\text{Г}}$, $c_{\text{В}}$, $c_{\text{Л}}$, $c_{\text{Б}}$ [Дж/кгК] - соответственно теплоемкость сухого грунта, воды, льда и материала бюкса; $m_{\text{Г}}$, $m_{\text{Висх}}$, $m_{\text{Л}}$, $m_{\text{Б}}$ [кг] - масса грунта, воды исходная, льда и бюкса; L_{ϕ} [Дж/кг] - теплота фазового перехода; $t_{\text{Г}}$ - температура образца в последний отсчет главного периода калориметрического эксперимента; $(t_{\text{Г}} - t_{\text{Х}})$, $(\vartheta_0 - \vartheta_n^{\text{л}})$ - изменение температуры образца и калориметрической жидкости в ходе эксперимента.

Масса льда, которая содержалась в образце при отрицательной температуре $t_{\text{Х}}$ рассчитывается на основании данных калориметрического опыта по формуле 1. Исходя из полученной в ходе дополнительного эксперимента величины $m_{\text{Висх}}$, находится искомое значение незамерзшей воды $m_{\text{Н}}$ при температуре $t_{\text{Х}}$:

$$m_{\text{Н}} = m_{\text{Висх}} - m_{\text{Л}} \quad (2)$$

Поправка на теплообмен с окружающей средой вычисляется по формуле Реньо-Пфаундлера-Усова:

$$\Delta(\Delta\vartheta) = n\nu_0 + \frac{\nu_n - \nu_0}{\Theta_n - \Theta_0} \cdot \left(\frac{\vartheta_n - \vartheta_0}{2} + \sum_1^{n-1} \vartheta - n\Theta_0 \right) \quad (3)$$

Где n - число отсчетов в главном периоде опыта; ν_0 - средний «ход» температуры за один отсчет в начальном периоде; ν_n - тоже, в конечном периоде; Θ_0 - средняя температура начального периода; Θ_n - то же, для конечного периода; ϑ_0 - последний отсчет начального периода; ϑ_n - последний отсчет главного периода (температура равновесия); $\sum_1^{n-1} \vartheta$ - сумма температур калориметра всех отсчетов главного периода, за исключением последнего отсчета (ϑ_n).

Величина температуры последнего отсчета главного периода с учетом поправки на теплообмен равна: $\vartheta_n^{\text{л}} = \vartheta_n + \Delta(\Delta\vartheta)$.

Далее описывается новый метод определения незамерзшей воды, в основе которого лежит запатентованная экспериментальная установка. Суть метода заключается в фиксировании и учете количества энергии, выделившейся из образца при его замораживании до заданной температуры. В качестве прибора учета плотности теплового потока между грунтом и окружающей средой выступает датчик теплового потока (ДТП), располагающийся на внешней стороне цилиндрической бюксы.

Общий вид экспериментальной установки представлен на рис.2.

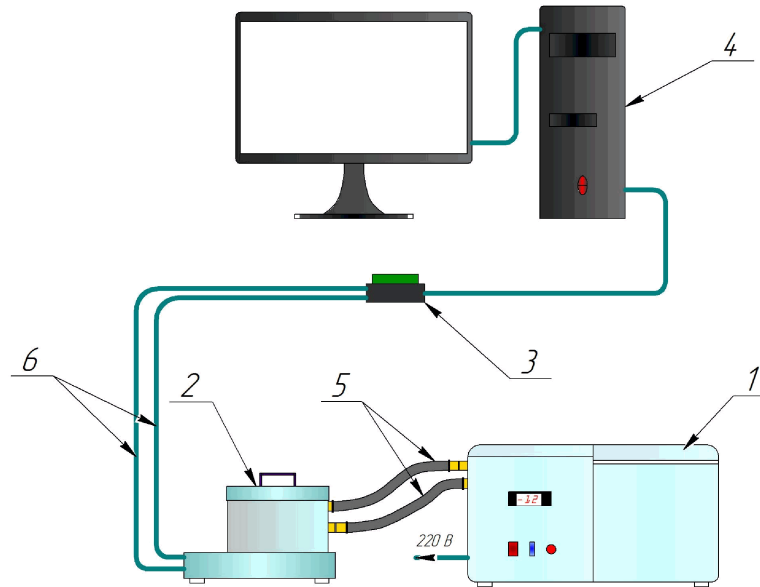


Рис.2. Экспериментальная установка с внешним контуром охлаждения.

Где 1- криостат; 2 - циркуляционный блок; 3 - аналого-цифровой преобразователь; 4 - ПК; 5 - трубопроводы; 6 - провода от термометров сопротивления и датчика теплового потока.

Циркуляционный блок подключается к криостату для подвода и отвода теплоносителя. В рабочей камере циркуляционного блока происходит замораживание образца. Аналого-цифровой преобразователь служит для обработки и преобразования сигналов от датчика теплового потока и термометров сопротивления и вывода данных на ПК. Теплоизолированные трубопроводы и запорные элементы, необходимы для соединения криостата и циркуляционного блока в единый контур.

Величина поверхностной плотности теплового потока $q, [\text{Вт}/\text{м}^2]$ определяется по формуле:

$$q = K \cdot E \quad (4)$$

Где K – коэффициент преобразования, $[\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{мВ})]$; E – термоэлектрический сигнал датчика, $[\text{мВ}]$.

Уравнение теплового баланса в этом случае выглядит следующим образом:

$$m_{\text{л}} = \frac{\sum_{\tau_1}^{\tau_2} (q_i \cdot \Delta\tau_i) - (t_3 - t_X) \cdot (c_{\text{Г}} m_{\text{Г}} + c_{\text{В}} m_{\text{Вуч}} + c_{\text{В}} m_{\text{Б}} + c_{\text{П}} m_{\text{П}})}{(L_{\phi} + t_X (c_{\text{В}} - c_{\text{Л}}))} \quad (5)$$

где $q_i [\text{Вт}]$ - тепловой поток за интервал времени $\Delta\tau_i$ [сек]; ; $c_{\text{П}}$ [Дж/кг·К] теплоемкость материала ДТП; $m_{\text{П}}$ [кг] - масса ДТП находящегося в контрольном объеме; τ_1 – время соответствующее началу кристаллизации поровой воды, τ_2 – время соответствующее окончанию эксперимента, когда температура образца становится равной температуре рабочей камеры, а плотность теплового потока равной нулю. Рассматриваемый интервал температур: от момента начала кристаллизации соответствующего температуре начала замерзания грунта t_3 , до конечной отрицательной температуры t_X . Масса незамерзшей воды, содержащейся в грунте при

температуре t_x , находится по формуле 2.

В третьей главе представлены экспериментальные данные о зависимости содержания незамерзшей воды от температуры для четырех типов грунтов, полученные при равновесных и неравновесных условиях отвода тепла.

Интенсивность теплообмена регулировалась тремя стаканами разного диаметра необходимыми для изменения времени замораживания. При разных диаметрах стаканов a , следовательно, при разных термических сопротивлениях, и разной тепловой мощности отводимой от грунта получен ряд кривых зависимостей содержания незамерзшей воды от температуры. Минимальное время замораживания достигается проведением эксперимента без стакана, используя только бокс. На примере образца – глина, ряд кривых зависимости влажности от температуры при равновесном и неравновесном замораживании выглядит следующим образом - рис.3.

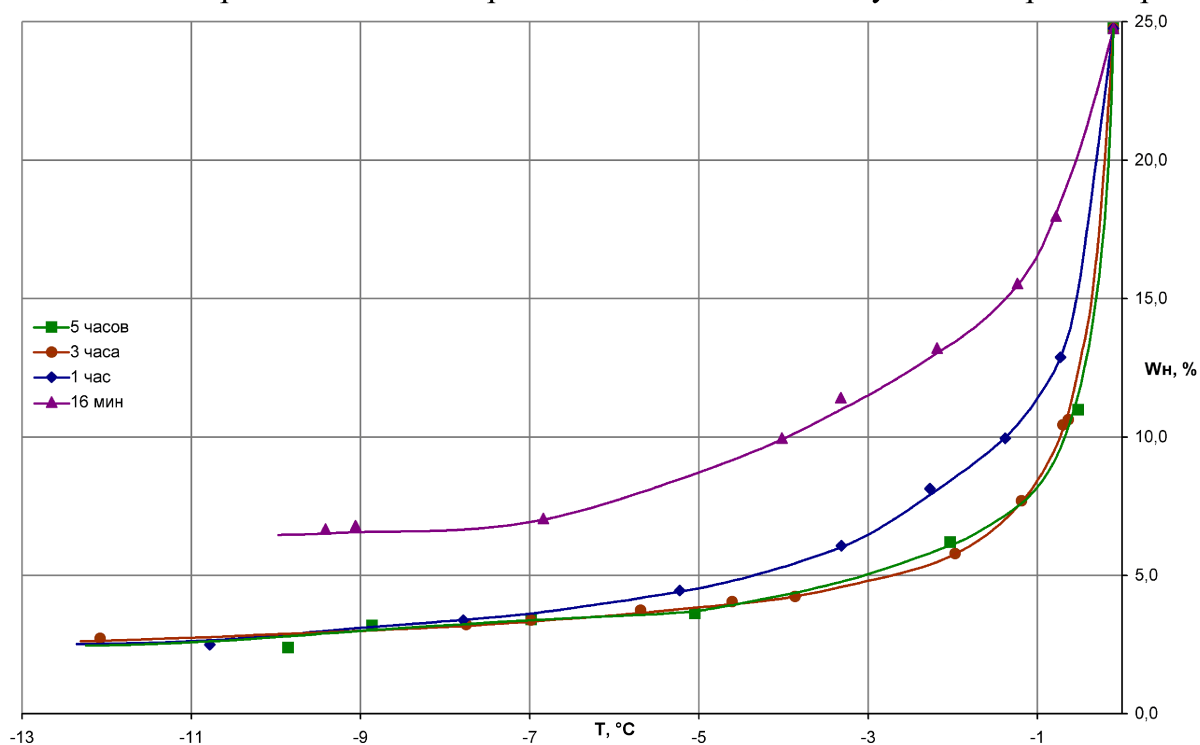


Рис.3. Кривые зависимости незамерзшей воды от температуры при различном времени замораживания.

По представленным кривым можно судить о времени, необходимом для наступления фазового равновесия. Отличие между кривыми на рис.3, соответствующими 5 ч и 3 ч практически отсутствует, поэтому можно полагать, что в этих случаях происходит равновесный процесс замораживания воды в порах грунта. Кривые 1 ч и 16 мин соответствуют неравновесным условиям замораживания грунта. При этом влажность мерзлого грунта зависит не только от вида и температуры грунта, но и от интенсивности теплопереноса от грунта в окружающую среду.

В качестве параметра неравновесности, удобного для обработки экспериментальных данных используется отношение времени изменения температуры на заданную величину в неравновесных и равновесных условиях:

$$\bar{\tau} = \frac{\tau}{\tau_0} \quad (6)$$

Где τ , τ_0 – время изменения температуры грунта на Δt , °С в неравновесных и равновесных условиях.

Экспериментальные данные, соответствующие кривым 1 ч и 16 мин на рис.3 позволяют получить эмпирическую зависимость влажности мерзлого грунта в неравновесных условиях: $W(t, \tau) = W_{ост} + (W_{исх} - W_{ост}) \cdot \bar{W}(t)^{n(\bar{\tau})}$ (7)

Где $\bar{W}(t) = \frac{W_0(t) - W_{ост}}{W_{исх} - W_{ост}}$; $W_0(t)$ - зависимость влажности мерзлого грунта от температуры в равновесных условиях; $n(\bar{\tau}) = c_1 + c_2 \ln(\bar{\tau})$. Для песка $n(\bar{\tau}) = c_1 \cdot \bar{\tau} + c_2$. Коэффициенты c_1 и c_2 представлены в таблице 1.

Таблица.1.

Эмпирические коэффициенты

	Глина	Песок	Торф
c_1	1,00	0,88	1,02
c_2	0,26	0,12	0,29

Максимальная погрешность определения относительной влажности глины по зависимости (7) в рассмотренных условиях не превышает $\pm 3\%$.

Для целей математического моделирования процессов замерзания грунта предложена аппроксимационная формула, описывающая зависимость содержания незамерзшей воды от температуры в равновесных условиях:

$$W(T) = e^{\frac{t'}{10} f(t')} \cdot (W_{исх} - W_{ост}) + W_{ост} \quad (8)$$

Где $W_{ост}$ - влажность грунта при $t = t_{ост}$ °С; $t' = t - t_3$; $W(t)$ - искомое значение влажности при температуре t , °С; функция $f(t')$ различна для каждого типа грунта, в случае грунта - глина, данная функция имеет вид:

$$f(t') = d_1 \cdot t'^3 + d_2 \cdot t'^2 + d_3 \cdot t' + d_4 \quad (9)$$

Коэффициенты из уравнения 9 представлены в табл.2.

Таблица.2

Эмпирические коэффициенты уравнения 9 для исследуемых грунтов.

	Глина	Суглинок	Песок	Торф
d_1	0,022	0,010	0,095	0,030
d_2	0,555	0,309	2,144	0,731
d_3	4,629	3,019	14,567	5,748
d_4	17,708	13,578	38,647	19,926

Сравнение экспериментальной и аппроксимационной кривых на примере образца – глина, представлено на рис.4.

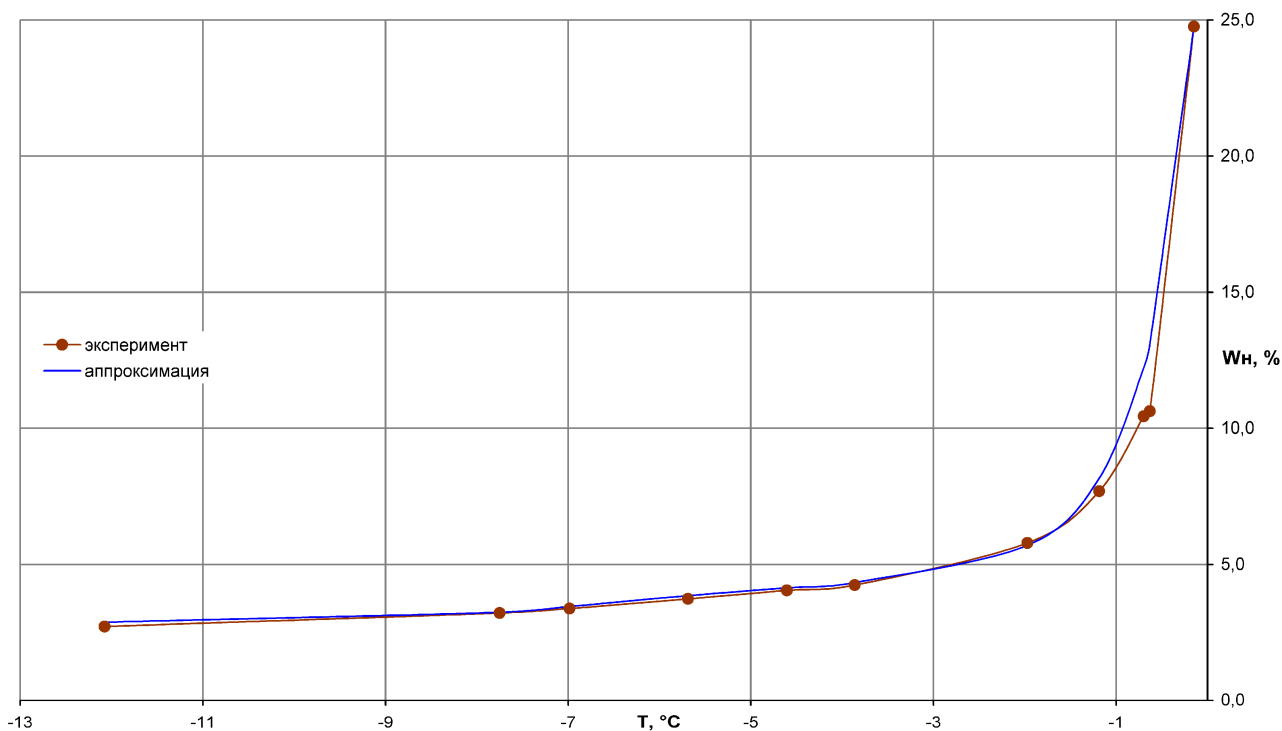


Рис.4. Экспериментальная и аппроксимационная зависимости содержания незамерзшей воды от температуры.

Для полноты сведений об исследуемых грунтах и объективной оценки вклада таких факторов как соленость грунта и гранулометрический состав в результат определения незамерзшей воды, было проведено определение солености поровой воды, насыщающей грунт и гранулометрического состава.

Для определения гранулометрического состава применялся комплексный метод, включающий ситовой и седиментационно-оптический методы. Для определения доли частиц с размерами из диапазона 10-0,1мм использовался ситовой метод. Определение микроагрегатного состава грунтов с размерами частиц из диапазона 0,1-0,005мм проводилось седиментационно-оптическим методом дисперсного анализа. Результаты представлены в табл.3.

Таблица 3.

Гранулометрический состав исследуемых грунтов

d, мм	Массовая доля фракций, %								
	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,2	0,2-0,14	0,14-0,10	0,1-0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	>0,005
Песок	-	3	7	37	27	18	6	2	-
Глина	-	-	1	3	5	8	12	17	54
Суглинок	-	-	-	3	7	13	30	24	23
Торф	3	4	3	2	1	7	15	38	27

Где d - размер частиц, мм.

Соленость грунта определяется в первую очередь соленостью поровой воды насыщающей грунт. Для получения данных количественного содержания солей, растворенных в поровой воде, был выделен ряд ионов, входящих в состав большинства водорастворимых солей. Определение массового содержания ионов проводилось на жидкостном ионном хроматографе. Результаты представлены в

таблице 4. Последний столбец отражает суммарную минерализацию поровой воды исследуемых в настоящей работе грунтов.

Таблица 4.

Ионный состав и суммарная минерализация поровой воды

	Хлорид (Cl), г/л	Сульфат (SO ₄), г/л	Гидрокарбонат (HCO ₃), г/л	Натрий (Na), г/л	Калий (K), г/л	Магний (Mg), г/л	Кальций (Ca), г/л	Σ. Минерализация, г/л
Песок	0,114	0,025	0,318	0,095	0,044	0,018	0,074	0,687
Глина	0,391	0,441	1,712	0,285	0,102	0,097	0,529	3,558
Суглинок	0,335	0,351	0,201	0,200	0,072	0,037	0,150	1,346
Торф	0,365	3,242	0,174	0,053	0,011	0,098	1,123	5,065

Важной особенностью, сопровождающей процессы замерзания-оттаивания грунта является гистерезис, который выражается в том, что при понижении отрицательной температуры образца кривая изменения содержания незамерзшей воды отличается от таковой в случае повышения температуры в отрицательной области.

Для исследования данного явления, на примере суглинка, были проведены две серии экспериментов: В первой серии экспериментов – для получения кривой оттаивания, образец каждый раз замораживался в криостате в течение 3,5-4 часов до одной и той же температуры -12,5°С. При любой температуре ниже указанной, можно полагать, что вся незамерзшая вода – прочносвязанная. Особенностью калориметрического опыта в данном случае является то, что калориметрическая жидкость (этиловый спирт) имеет отрицательную температуру. По окончании начального периода калориметрического эксперимента замороженный образец опускается в калориметр, в результате чего происходит повышение температуры образца с одновременным понижением температуры калориметрической жидкости до некоторого одинакового значения. Для получения ряда экспериментальных точек варьировалась температура калориметрической жидкости с предварительным учетом понижения температуры в главном периоде калориметрического эксперимента.

Вторая серия экспериментов – для получения кривой замораживания, проведена по стандартной методике, аналогичной получению экспериментальной кривой на рис.4.

Результаты проведенных исследований даны на рис.5.

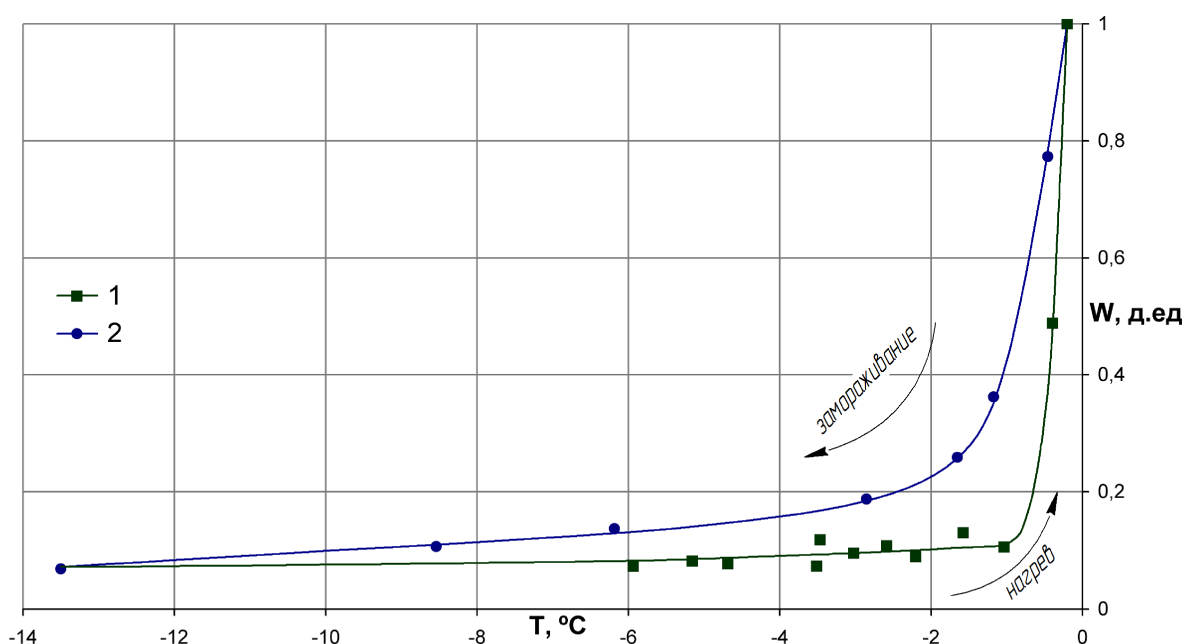


Рис.5. Гистерезис в содержании незамерзшей воды между двумя направлениями изменения температуры: 1–нагрев, 2–замораживание.

Рис.5 подтверждает наличие гистерезиса в содержании незамерзшей воды между двумя разными направлениями изменения температуры грунта – замораживании и оттаивании. При этом наблюдается частичное таяние льда в мерзлом грунте при повышении температуры в отрицательной области.

Для расчета изменения температуры и влажности при отводе тепла от контрольного объема грунта в неравновесных условиях предложена методика, основанная на трех основных уравнениях:

1. Уравнение теплового баланса (5), где: $Q = \sum_{\tau_1}^{\tau_2} (q_i \cdot \Delta \tau_i)$ [Дж];
2. Аппроксимационная зависимость изменения доли незамерзшей воды от интенсивности отвода тепла от контрольного объема и от температуры грунта в области неравновесных фазовых переходов:

$$W_{H3} = c_1 \cdot \frac{q + c_2}{t} + c_3, \text{ где } T[^\circ\text{C}]. \quad (10)$$

Для образца – глина: $c_1=-0,145$; $c_2=1,05$; $c_3=0,124$ если q [Вт]

В области равновесных фазовых переходов аппроксимационная кривая зависимости влажности от температуры, описывается формулой (8) с условием $t' = t$, $t_3 = 0^\circ\text{C}$.

В качестве исходных данных задается t_1 , W_1 и $q(\tau)$, а также расчетный шаг по времени – Δt .

В практических расчетах тепловые потоки, отводимые от контрольного объема при замораживании грунта, определяются законом теплопроводности, а также конвективными потоками при миграции влаги. Применительно к расчету $t(\tau)$ и $W(\tau)$ с

учетом полученных экспериментальных данных величина $q(\tau)$ определялась по показаниям датчика теплового потока.

Расчет изменения величин $t(\tau)$ и $W(\tau)$ производится в следующей последовательности:

- Примем $q_n \geq q_R$ - неравновесные условия замораживания; где q_R - максимальное значение теплового потока, соответствующее равновесным условиям при данной температуре, $q_R = -0.000273 \cdot t + 0.000230$. Относительная влажность грунта в т.В (рис.6) определяется по формуле 10 при $q=q_1$ и $t=t_1$. Влажность за счет незамерзшей воды в конце условного изотермического процесса от т.В ($q=q_1$) до т.С ($q=q_2$) определяется по формуле 10 при $q=q_2$ и $t=t_1$. Время изотермического перехода системы из состояния т.В в состояние т.С находится из уравнения

$$Q|_{t=const} \rightarrow \frac{Q_\phi \cdot \Delta W_H \cdot m_{\text{Вух}}}{\tau_{t=const}} = q_2 \quad \text{т.к.} \quad \text{член} \quad \Sigma c \cdot m \cdot \Delta t = 0, \quad \text{где}$$

$\Sigma c \cdot m = c_\Gamma m_\Gamma + c_B m_{\text{Вух}} + c_B m_B + c_P m_P$ из уравнения 5. Время перехода системы из состояния т.С в состояние т.Д при интенсивности отвода тепла $q=q_2$ равно: $\Delta \tau = \tau - \tau_{t=const}$. Температура системы t_2 в т.Д определяется из совместного решения системы уравнений 11, каждое из которых выражено из уравнений 5 и 10 в виде разностей влажности в т.В и т.Д:

$$\begin{cases} \Delta m_H = \frac{q_2 \cdot \Delta \tau - (t_1 - t_2) \cdot \Sigma c m}{Q_\phi - |t_{cp}| \cdot (c_B - c_L)} \\ \Delta m_H = 145 \cdot (q_2 + 0.00105) \cdot \frac{(t_1 - t_2)}{(t_1 \cdot t_2)} \cdot m_{\text{Вух}} \end{cases} \quad (11)$$

Система уравнений сводится к квадратному уравнению вида $at_2^2 + bt_2 + c = 0$,

решением которого является выражение $t_2 = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4c \cdot \Sigma c \cdot m}}{2\Sigma c \cdot m}$. В системе

уравнений присутствует величина t_{cp} : $t_{cp} = (t_1 + t_2)/2$ которая в первом приближении, при решении системы принимается $t_{cp} = t_1$. Когда t_2 найдена, находим t_{cp} и снова решаем систему уравнений.

Влажность мерзлого грунта за счет незамерзшей воды W_{H2} , выраженная в долях единицы в т.Д при $t=t_2$ находится по формуле 10. Вышеописанный процесс повторяется с шагом τ для последующих точек Е, F и тд.

- Когда на i -том шаге $q_n \leq q_R$ - равновесные условия замораживания, тогда: $W_{H3} = f(t)$ - не зависит от q и определяется уравнением 8. Система уравнений 11 с учетом функции 8 переходит в систему уравнений 12:

$$\begin{cases} \Delta m_H = \frac{q_2 \cdot \Delta \tau - (t_1 - t_2) \cdot \sum cm}{Q_{\phi} - |t_{cp}| \cdot (c_B - c_{II})} \\ \Delta m_H = (1 - W_{осм}) \cdot m_{Висх} \cdot \left(e^{\frac{t_1}{10} f(t_1)} - e^{\frac{t_2}{10} f(t_2)} \right) \end{cases} \quad (12)$$

Влажность за счет незамерзшей воды при температуре t_2 находится из уравнения 8.

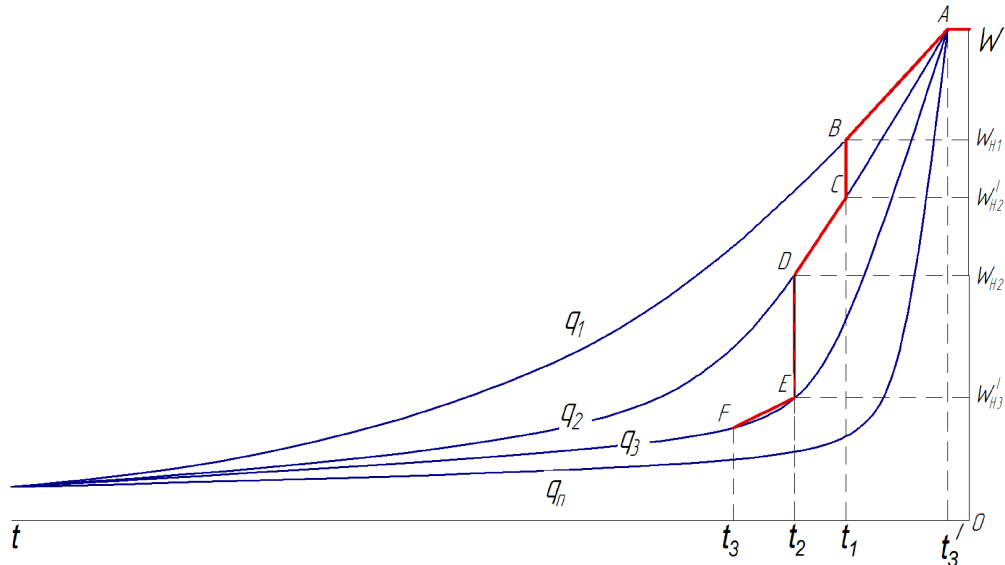


Рис.6. Поясняющий график к схеме расчета температуры и влажности.

На рис.7 представлено сравнение реальной кривой изменения содержания незамерзшей воды от времени замораживания, с рассчитанной зависимостью. Интервал времени τ составляет 200 - 300 сек. Температура, при которой процесс замораживания перешел от неравновесного к равновесному $\approx -3^\circ\text{C}$, время, соответствующее этому моменту ≈ 18050 сек, после которого t_2 находится из системы уравнений 12, а величина W_{H2} по уравнению 8 при $t = t_2$. На рис.8 представлен итоговый график сравнения реальных значений изменения температуры с течением времени эксперимента с рассчитанными по системам уравнений 11-12 данными.

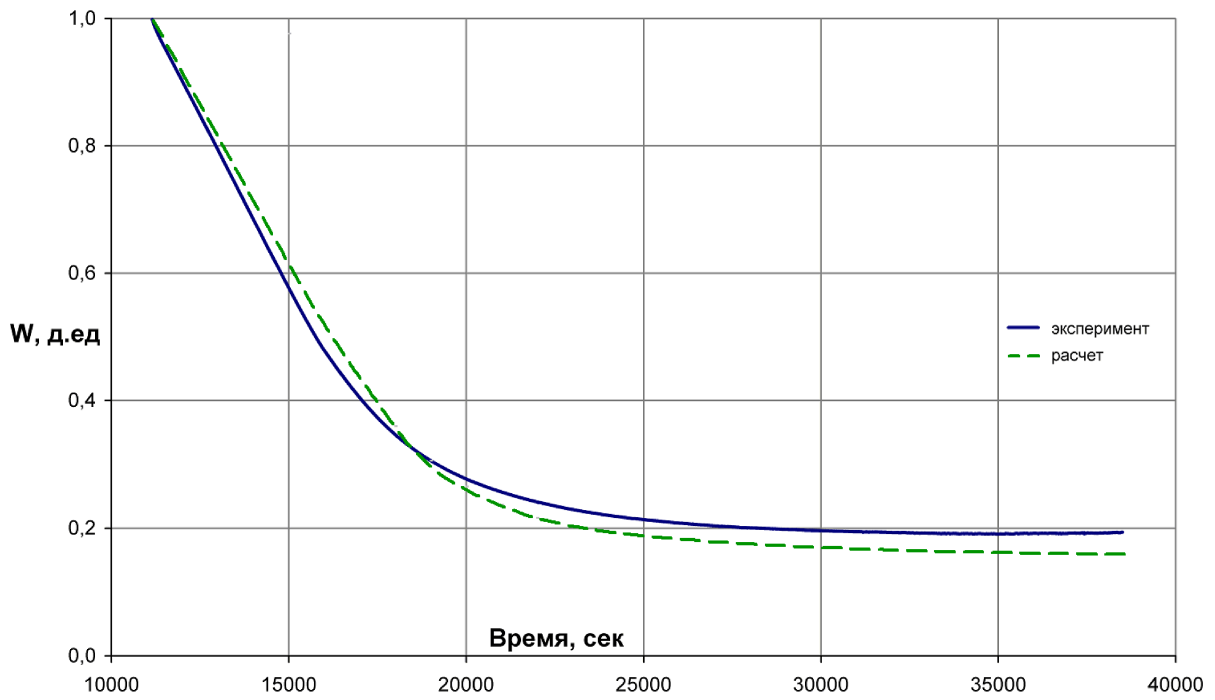


Рис.7. Сравнение экспериментальных и расчетных данных по изменению влажности от времени

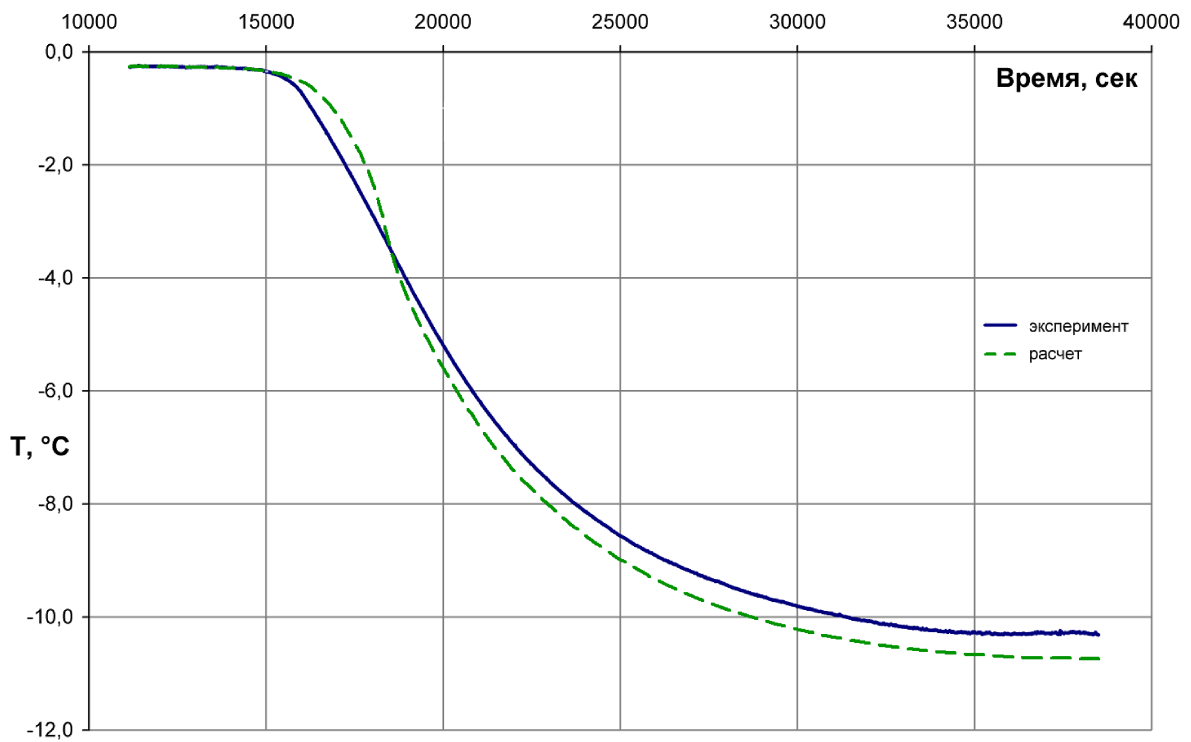


Рис.8. Сравнение экспериментальных и расчетных данных по изменению температуры от времени

Сравнения расчетной и экспериментальной зависимостей влажности (рис.7) и температуры (рис.8) от времени подтверждают удовлетворительную точность расчетной методики.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Создана и использована в экспериментальных исследованиях установка, позволяющая изучать калориметрическим методом процессы замерзания – оттаивания влажных грунтов в равновесных и неравновесных условиях.
2. Получены и обобщены новые экспериментальные данные о неравновесном процессе замерзания четырех типов грунтов при различной интенсивности параметров теплопереноса.
3. Экспериментально обоснована эмпирическая зависимость позволяющая определять содержание незамерзшей воды с учетом неравновесности системы грунт-лед-вода для глинистого, торфяного и песчаного грунта при различных температурах.
4. Для глинистых грунтов найдены параметры гистерезиса между двумя направлениями определения незамерзшей воды. Расчеты по кривой замораживания в случае роста температуры в отрицательной области приводят к погрешности, в области $0 - -3^{\circ}\text{C}$, достигающей 40%. Для песчаных грунтов гистерезис не наблюдается.
5. Разработана и экспериментально подтверждена расчетная модель описания процесса замерзания грунта в неравновесных условиях, позволяющая получить данные об изменении температуры и влажности грунта в контрольном объеме в зависимости от интенсивности отвода тепла.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых журналах рекомендованных ВАК РФ

1. Григорьев Б.В. Теплопроводность горных пород Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна / Б. В. Григорьев, Н. Ф. Чистякова, А. Б. Шабаров // Вестник Тюменского государственного университета. – 2010. – №6. – С.19-27.
2. Григорьев Б.В. Экспериментальное исследование промерзания-оттаивания грунтов в неравновесных условиях / Б. В. Григорьев, А. Б. Шабаров // Вестник Тюменского государственного университета. – 2012. – №4. – С.53-60.
3. Григорьев Б.В. Экспериментальное исследование теплопереноса в мерзлом грунте вблизи подземного трубопровода / Б. В. Григорьев, П. Ю. Михайлов, А. Б. Шабаров // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И.Вернадского. – 2013. – №1(45). – С.42-47.
4. Григорьев Б.В. Гистерезис при промерзании – оттаивании влажного суглинка / Б. В. Григорьев // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2013. – №5(76). – С.61 – 65.
5. Григорьев Б.В. Особенности процессов замерзания торфяных грунтов Тюменской области / Б. В. Григорьев, А. Б. Шабаров, Н.Ф. Чистякова // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2013. – №3. – С.95 – 100.

Публикации в других изданиях

1. Григорьев Б.В. Экспериментальное определение теплопроводности строительных материалов, горных пород и грунтов / Б. В. Григорьев, П. Ю. Михайлов, А. Б. Шабаров // Сборник статей Международной научно-практической конференции «Разработка и внедрение ресурсо - и энергосберегающих технологий и устройств». – Пенза: Приволжский Дом знаний, 2010. – С. 117 – 121.
2. Григорьев Б.В. Калориметрический метод и экспериментальная установка для определения количества незамерзшей воды в мерзлых грунтах / Б.В. Григорьев, А.Б. Шабаров // Сборник научных трудов по материалам Международной заочной научно-практической конференции «Наука сегодня : теоретические аспекты и практика применения». – Ч. 9. – Тамбов : Бизнес-Наука-Общество, 2011. – С. 24 – 26.
3. Григорьев Б.В. Калориметрический метод определения содержания незамерзшей воды в мерзлых грунтах / А. Б. Шабаров, Б. В. Григорьев, А. А. Вакулин // Материалы международной научно-практической конференции по инженерному мерзлотоведению, посвященной 20-летию ООО НПО "Фундаментстройаркос". – Тюмень: Сити-Пресс, 2011. – С. 436 – 437.
4. Григорьев Б.В. Экспериментальное исследование промерзания грунтов в равновесных и неравновесных условиях / Б. В. Григорьев, А. Б. Шабаров // Материалы научной конференции для студентов аспирантов и молодых ученых «ИМЕНИТ-2012». – Тюмень : Сити-Пресс, 2012. – С. 36 – 37.
5. Григорьев Б.В. Экспериментальные исследования полей температуры и остаточной влажности вблизи трубопровода / Б. В. Григорьев, П. Ю. Михайлов, И. А. Суровцев // Сборник трудов участников международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов нефтегазовой отрасли. ОАО «АК«Транснефть». – Тюмень : ТГНГУ, 2012. – С. 44 – 48.
6. Григорьев Б.В. Исследование гистерезиса содержания незамерзшей воды в суглинистом грунте при его замораживании и оттаивании / Б.В. Григорьев // Материалы Международной научно - практической конференции «Валихановские чтения-17». – Т. 8. – Кокшетау : КГУ им. Ш. Уалиханова, 2013. – С. 179 – 182.

Патент на полезную модель

Установка для определения незамерзшей воды в мерзлых грунтах : заявка № 2012149324 / Б.В. Григорьев, А.Б. Шабаров ; реш. 2013.15.17.