

СТАТЬЯ

УДК 551.34:691.223:544.015.4
DOI 10.17513/use.38464

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ УДЕЛЬНОЙ
ТЕПЛОЕМКОСТИ КРУПНОДИСПЕРСНОГО ГРУНТА
В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЛАЖНОСТИ**

**Таппырова Н.И. ORCID ID 0000-0003-4979-7703,
Кравцова О.Н. ORCID ID 0000-0001-9345-421X,
Малышев А.В. ORCID ID 0000-0001-7558-0642,
Протодьяконова Н.А. ORCID ID 0000-0001-5948-579X,
Тимофеев А.М. ORCID ID 0000-0001-6021-5423,
Степанов А.В. ORCID ID 0000-0001-9331-5885**

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»,
Институт физико-технических проблем Севера имени В.П. Ларионова Сибирского отделения Российской академии наук, Якутск, Российская Федерация, e-mail: o.n.kravtsova@iptpn.ysn.ru*

В связи с интенсивным освоением Арктической зоны Российской Федерации при строительстве гражданских и промышленных объектов становится актуальной задача изучения многолетнемерзлых и промерзающих – протаивающих грунтов. С появлением высокоточных приборов и разработкой новых методик появилась возможность уточнения теплофизических характеристик грунтов в широком диапазоне изменения температуры и влажности. Целью данной работы является экспериментальное исследование эффективной удельной теплоемкости в процессе промерзания – протаивания. В качестве исследуемого материала был взят песок мелкий с различной влажностью. Эффективная удельная теплоемкость определена калориметрическим методом, а температура начала замерзания и переохлаждения – криоскопическим методом. Получены значения эффективной удельной теплоемкости в зависимости от температуры и влажности, определены точки начала замерзания, конца оттаивания и температура переохлаждения. Полученные результаты показывают, что при фазовых переходах вода – лед и лед – вода появляются пики значений эффективной удельной теплоемкости. Влажность грунта влияет на максимальное значение этих пиков как при замерзании, так и при оттаивании. Из полученных термограмм видно, что длительность фазового перехода и температура переохлаждения также зависят от влажности грунта.

Ключевые слова: мерзлые грунты, талые грунты, песчаный грунт, эффективная удельная теплоемкость, фазовые переходы, влажность

Благодарности: Работа выполнена с использованием научного оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

**THE RESEARCH ON THE EFFECTIVE SPECIFIC HEAT CAPACITY
OF COARSE-GRAINED SOIL DEPENDING ON MOISTURE CONTENT**

**Tappyrova N.I. ORCID ID 0000-0003-4979-7703,
Kravtsova O.N. ORCID ID 0000-0001-9345-421X,
Malyshev A.V. ORCID ID 0000-0001-7558-0642,
Protodyakonova N.A. ORCID ID 0000-0001-5948-579X,
Timofeev A.M. ORCID ID 0000-0001-6021-5423,
Stepanov A.V. ORCID ID 0000-0001-9331-5885**

Federal State Budgetary Institution of Sciences “Yakutsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, Institute of Physical-Technical Problems of the North named after V.P. Larionov of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation, e-mail: o.n.kravtsova@iptpn.ysn.ru

Due to the intensive development of the Arctic zone of the Russian Federation, the study of permafrost and freeze-thaw soils has become a relevant task during the construction of civil and industrial facilities. The advent of high-precision instruments and the development of new methods have made it possible to refine the thermophysical properties of soils over a wide range of temperature and moisture content. The goal of this study is to experimentally investigate the effective specific heat capacity at different moisture content levels during the freeze-thaw process. Fine-grain sand with varying moisture contents was used as the test material. The effective specific heat capacity was determined calorimetrically, while the freezing onset and supercooling temperatures were cryoscopically determined. The dependences of the effective specific heat capacity on temperature and moisture content were obtained. The freezing onset, thaw end points, and supercooling temperature were determined. The obtained results allow us to conclude that peak values of the effective specific heat capacity are recorded during the water-ice and ice-

water phase transitions. Soil moisture affects the magnitude of these peaks: the higher the soil moisture, the greater the peak values of the effective specific heat capacity during both freezing and thawing. The resulting thermograms show that the duration of the phase transition also depends on the moisture content of the soil.

Keywords: frozen soils, thawed soils, sandy soils, effective specific heat capacity, phase transitions, moisture content

Acknowledgement: *This work was performed using the scientific equipment of the Shared Use Center of the Yakut Scientific Center, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.*

Введение

Освоение арктических районов – строительство промышленных и гражданских объектов, дорог, нефте- и газопроводов, бурение скважин невозможно без изучения многолетнемерзлых и промерзающих – протаивающих грунтов. В настоящее время отсутствуют четкие рекомендации по выполнению тепловых расчетов при замерзании – оттаивании грунтов с учетом фазовых переходов воды [1; 2, с. 3–5]. Для решения этих задач необходимы в первую очередь теплофизические характеристики грунтов (теплопроводность, температуропроводность, удельная теплоемкость). Их значения меняются в зависимости от вида грунта, содержания влаги, засоленности и различных мерзлотных условий. В данное время имеется достаточно большой массив экспериментальных данных по теплопроводности и температуропроводности мерзлых и талых грунтов. Так, в работе [3, с. 32–107] представлены результаты экспериментальных и расчетных методов определения теплофизических свойств мерзлых и талых горных пород Северо-Востока России. А.В. Степанов, А.М. Тимофеев разработали метод определения теплофизических свойств влажных дисперсных материалов [4, с. 5–26]. В работе [5] приведен обзор лабораторных методов определения теплофизических характеристик мерзлых и талых грунтов.

Ранее авторами были проведены исследования теплопроводности мелкодисперсных и крупнодисперсных грунтов, в том числе с крупнообломочными включениями, в талом и мерзлом состояниях. На основании этих исследований была разработана методика расчета теплопроводности с учетом количества незамерзшей воды и засоленности [6; 7].

Удельная теплоемкость также является важной характеристикой теплового состояния грунтов. Эта характеристика становится эффективной величиной, когда присутствует фазовый переход [3, с. 10]. В последнее время с появлением высокоточных приборов и усовершенствованием методик исследования [8] появилась возможность

уточнения изменения этой характеристики в широком диапазоне температур, влажности и других параметров. Ранее авторами были получены экспериментальные данные по удельной теплоемкости грунта при положительных температурах [9].

Цель исследования – экспериментальное изучение влияния влажности на удельную теплоемкость, используемую при численном моделировании тепловых процессов. Для сравнения и достоверности полученных результатов были определены температуры переохлаждения, замерзания и оттаивания.

Материалы и методы исследования

Для исследования влияния влажности на эффективную удельную теплоемкость был выбран грунт, а именно речной песок из карьера в окрестностях г. Якутска.

Для исключения влияния солей песок предварительно отмывался и определялся гранулометрический состав и основные водно-физические характеристики согласно ГОСТ 25100-2020 (таблица) [10].

Модуль крупности определялся согласно ГОСТ 32727-2014 [11] и равен 1,64, степень неоднородности $C_u = 1,44 < 3$. Таким образом, исследуемый материал относится к мелкому, однородному, незасоленному песку без органики.

Для получения определенной влажности предварительно высушенный песок искусственно увлажнялся дистиллированной водой. Для проведения эксперимента подготавливались образцы с тремя значениями влажности W : 10, 15, 20%.

Эффективная удельная теплоемкость определялась калориметрическим методом [12] на дифференциально-сканирующем калориметре Setaram Sensys Evo TG-DSC (рис. 1). Он имеет две измерительные ячейки: одна предназначена для исследуемого образца, в другую, ячейку сравнения, помещается пустой тигель. Экспериментально измеряется временная зависимость разницы температур между ячейкой с образцом и ячейкой сравнения. Для этого ячейки конструированы максимально симметрично (одинаковые тигели, сенсоры, расстояние от нагревателя).

Физические характеристики грунта

Содержание частиц, %										Гигроскопическая влажность, %	Плотность частиц грунта, г/см ³	Наименование грунта по ГОСТ 25100-2020
свыше 10 мм	10–5 мм	5–2,5 мм	2,5–1,25 мм	1,25–0,63 мм	0,63–0,315 мм	0,315–0,16 мм	меньше 0,16 мм	0,16–0,056 мм	меньше 0,056 мм			
A ₁₀	A ₅	A _{2,5}	A _{1,25}	A _{0,63}	A _{0,315}	A _{0,16}	A _{<0,16}	A _{0,05}	A ₀	W _g	ρ _s	
0,0	0,0	0,104	0,06	0,62	65,0	31,1	3,116	–	–	0,1	2,64	Песок мелкий, однородный, незасоленный, без органики

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.



Рис. 1. Дифференциально-сканирующий калориметр Setaram Sensys Evo TG-DSC
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Тигели изготовлены из алюминия емкостью 120 мкл и средним весом 0,2228 г. Этот калориметр имеет 3Д-датчик типа Кальве, который состоит из 120 термодатчиков, который полностью окружает зону измерения. 3Д-датчик обладает высокой чувствительностью измерения, поэтому измерения на этом калориметре имеют высокую точность. Погрешность определения примерно 1 %. Измерения при отрицательных температурах проводились с использованием жидкого азота.

Тигель заполнялся исследуемым песком с определенной влажностью и помещался в ячейку калориметра. Эксперимент проводился по предварительно заданному режиму (рис. 2). Путем экспериментального подбора была выбрана оптимальная скорость замораживания – оттаивания, которая составляет 0,7 К/мин.

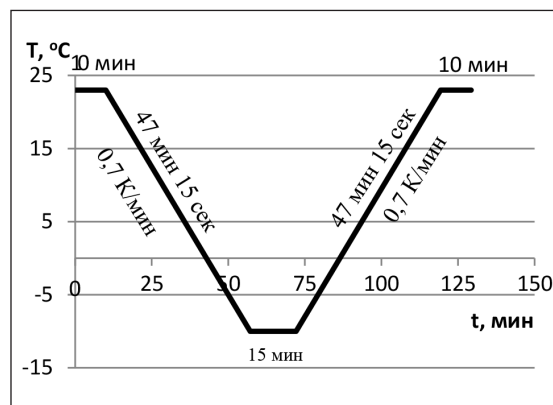


Рис. 2. Температурный режим проведения эксперимента

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Образец песка выдерживался 10 мин при +23 °С для того, чтобы принять температуру ячейки. Затем охлаждался примерно 47 мин от +23 до -10 °С (0,7 К/мин), далее образец выдерживался при -10 °С в течение 15 мин, после этого нагревался в течение 47 мин от -10 до +23 °С и далее выдерживался при температуре +23 °С в течение 10 мин. Весь эксперимент длится 129 мин 15 с.

Эффективная удельная теплоемкость определялась сравнением результатов двух измерений:

- 1) с двумя пустыми тигелями;
- 2) с одним пустым тигелем и с тигелем, заполненным образцом исследуемого материала.

Кроме определения эффективной удельной теплоемкости также определялась точка начала заморзания и конца оттаивания образцов грунта (рис. 4, 6, 8). Методика определения основана на явлении выделе-

ния скрытой теплоты фазового перехода вода – лед при промерзании и при оттаивании грунта лед – вода [13]. Регистрация данных проводится с помощью преобразователя сигналов «Теркон» производства ООО «ТЕРМЭКС» (г. Томск) с возможностью записи показаний во времени. Измерения проводили на образцах песка нарушенного сложения. Для удержания определенного объема сыпучего материала применяли контейнеры, сделанные из ПВХ в форме цилиндра с совмещенной полусферой в основании.

Перед проведением опыта образец доставался из эксикатора и закладывался в контейнер. После чего накрывался сверху крышкой с размещенной по центру термопарой. Термопара размещалась внутри образца в средней области. Подготовленные образцы в контейнерах устанавливались в полиэтиленовый ящик с наполненным сухим песком. Ящик с песком на момент установки образцов выставляется в холодильной камере при заданной отрицательной температуре. Оттаивание производилось в таком же ящике с песком при комнатной температуре.

Для определения температуры начала замерзания по результатам испытания образца грунта строят термограмму замерзания – график изменения температуры в образце во времени при замерзании. Аналогично для определения температуры конца оттаивания строится по замеренным данным – график изменения температуры в образце во времени при оттаивании. Обработка данных проводится согласно ГОСТ Р 71043-2023 [14].

Результаты исследования и их обсуждение

Эффективная удельная теплоемкость рассчитывалась с помощью программного обеспечения, входящего в состав ДСК, исходя из

замеренного теплового потока в каждой временной, температурной и влажностной точке.

На рис. 3–8 приведены результаты исследования. Из рис. 3, 5, 7 видно, что охлаждение грунта можно разделить на три зоны:

1. Талая зона: от температуры $+23^{\circ}\text{C}$ до начала фазового перехода. В этой зоне значения удельной теплоемкости практически не меняются, так как при положительных температурах удельная теплоемкость незасоленных, талых грунтов не зависит от температуры.

2. Зона фазового перехода. Она также захватывает переохлаждение. В этой зоне зафиксирован резкий скачок (пик) значений эффективной удельной теплоемкости, который характеризует фазовый переход вода – лед. Подобные результаты, полученные расчетным способом, приведены в работе [15]. Правая ветвь пика имеет более резкий подъем, чем левая ветвь. При понижении температуры после пика значения эффективной удельной теплоемкости начинают уменьшаться. Высота пиков значений удельной теплоемкости зависит от влажности грунта, чем больше влажность, тем больше значения (47, 65, 101 Дж/(г·К)).

3. Мерзлая зона. Эта зона соответствует полному замерзанию свободной воды. При этом значения эффективной удельной теплоемкости уменьшаются и становятся независимыми от температуры.

При оттаивании грунта наблюдаются такие же три зоны. Отличие составляет только фазовый переход лед – вода (пик), который наблюдается около 0°C . При оттаивании зона фазового перехода смещается в зону положительных температур. Максимальное значение удельной теплоемкости при оттаивании в несколько раз меньше, чем при замерзании. Форма пика при оттаивании более широкая, чем при замерзании.

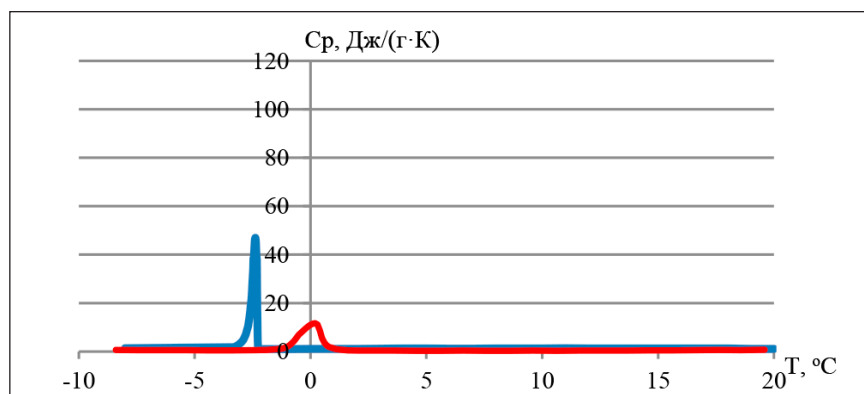


Рис. 3. Зависимость эффективной удельной теплоемкости песка от температуры. $W = 10\%$.

Синяя линия – замерзание, красная линия – оттаивание

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

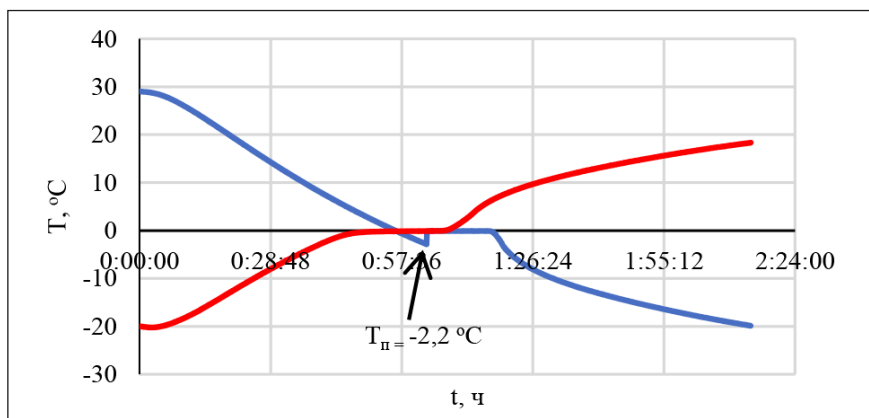


Рис. 4. Термограмма заморзания – оттаивания песка с влажностью $W = 10\%$.
Синяя линия – заморзание, красная линия – оттаивание
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

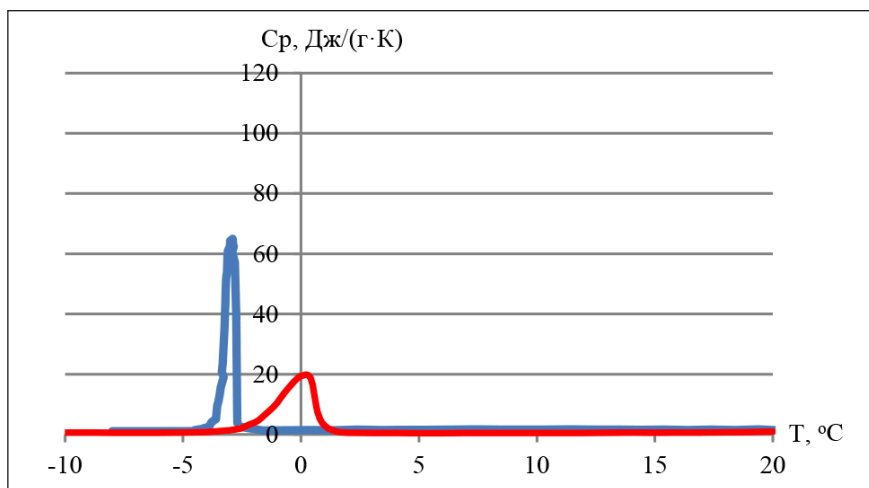


Рис. 5. Зависимость эффективной удельной теплоемкости песка от температуры. $W = 15\%$.
Синяя линия – заморзание, красная линия – оттаивание
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

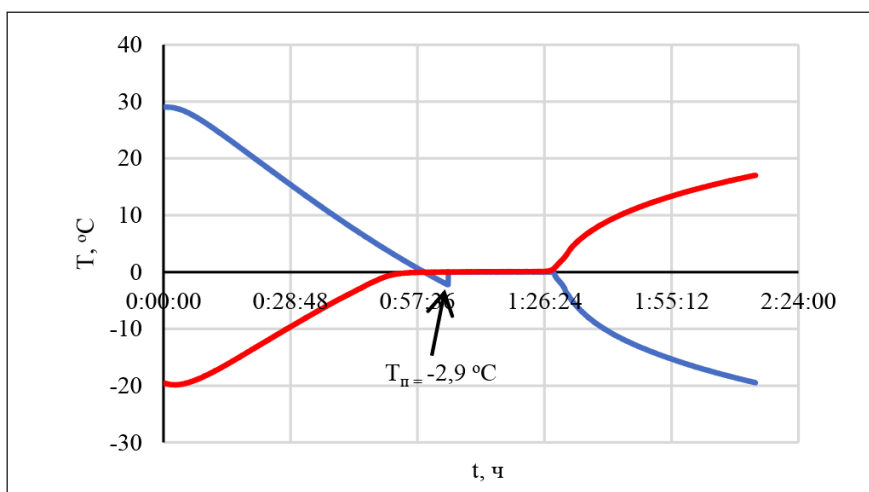


Рис. 6. Термограмма заморзания – оттаивания песка с влажностью $W = 15\%$.
Синяя линия – заморзание, красная линия – оттаивание
Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

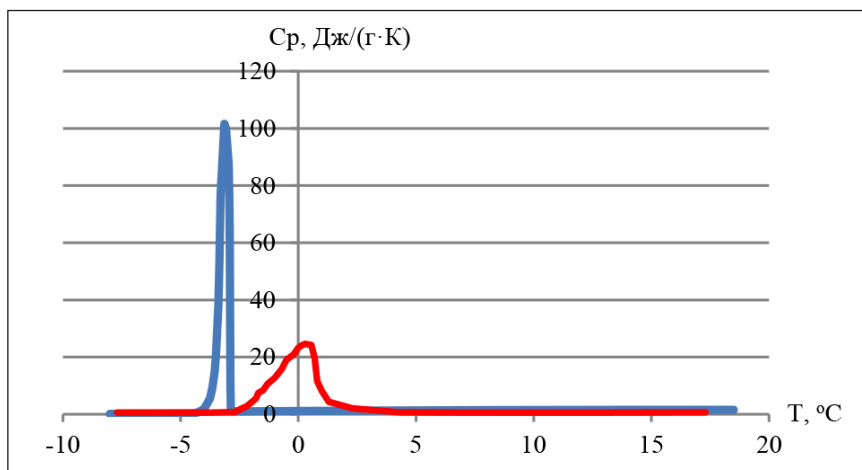


Рис. 7. Зависимость эффективной удельной теплоемкости песка от температуры. $W = 20\%$.

Синяя линия – замерзание, красная линия – оттаивание

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

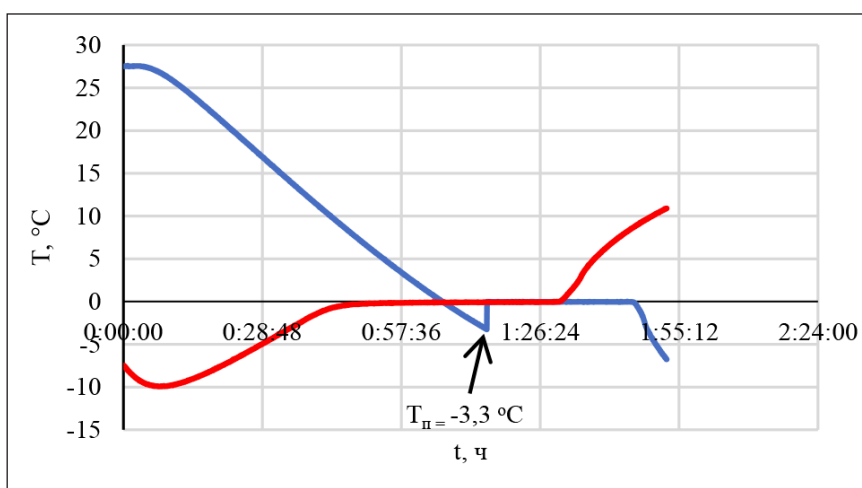


Рис. 8. Термограмма замерзания – оттаивания песка с влажностью $W = 20\%$.

Синяя линия – замерзание, красная линия – оттаивание

Примечание: составлен авторами по результатам данного исследования

Из термограмм (рис. 4, 6, 8) видно, что температура фазового перехода практически не зависит от влажности исследуемого песка и приблизительно равна $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, а длительность фазового перехода зависит от влажности. При повышении влажности увеличивается длительность фазового перехода:

$W = 10\% - t = 14\text{ мин};$

$W = 15\% - t = 24\text{ мин};$

$W = 20\% - t = 30\text{ мин}.$

В то же время температура переохлаждения $T_{\text{п}}$ меняется с изменением влажности. С увеличением влажности песка температура переохлаждения сдвигается в сторону более низких значений. Считается, что оптимальный интервал по влажности для переохлаждения – значения от 10 до 15%.

При влажности выше 20% вода заполняет большинство пор грунта, и температура переохлаждения снижается [15]. На рис. 4, 6, 8 наблюдается подобная картина. При влажности 10% температура переохлаждения равна $-2,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, при $W = 15\% - T = -2,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, а при влажности $W = 20\%$ наблюдается самая низкая температура переохлаждения $T = -3,3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Сравнивая графики замерзания (синяя линия) на рис. 3 и 4 ($W = 10\%$), можно сказать, что температуре переохлаждения воды, равной $-2,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 4), соответствует правая ветвь пика удельной теплоемкости (рис. 3). Левая ветвь пика показывает фазовый переход вода – лед. Такая же картина наблюдается и при $W = 15, 20\%$.

Выводы

Были исследованы песчаные грунты с влажностью 10, 15, 20% при цикле заморозания – оттаивания в диапазоне температур от +23 до -10 °C. Калориметрическим методом были получены данные по эффективной удельной теплоемкости, а термограммы для определения точки начала заморозания – криоскопическим методом. Выявлено следующее:

1. По результатам экспериментальных исследований были зафиксированы пики эффективной удельной теплоемкости, которые возникают при фазовых переходах вода – лед, лед – вода.

2. Значения этих пиков зависят от влажности грунта. Как при заморозании, так и при оттаивании с увеличением влажности значения пиков эффективной удельной теплоемкости возрастают.

3. В незасоленных песках температура фазового перехода не зависит от влажности и приблизительно равна 0 °C, в то же время продолжительность фазового перехода зависит.

4. Влажность песка влияет на температуру переохлаждения.

Для более глубокого понимания механизма влияния влажности и температуры на удельную теплоемкость необходимо провести дополнительные исследования.

Список литературы

1. Мурашко А.А., Бровка Г.П., Агутин К.А. Методы мониторинга температурного режима и негативных геокриологических процессов в природно-территориальном комплексе Белорусской антарктической станции // Общероссийская научно-практическая конференция «Изучение опасных природных процессов и геотехнический мониторинг при инженерных изысканиях» (г. Москва, 22 марта 2024 г.). М.: Геомаркетинг, 2024. С. 69–78. [Электронный ресурс]. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=68556547> (дата обращения: 28.11.2025). EDN: NCHNHW.
2. Пермяков П.П. Математическое моделирование негативных мерзлотных процессов. Новосибирск: Сибирское отделение РАН, 2023. 163 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=55038627> (дата обращения: 01.12.2025). ISBN 978-5-6048598-7-2.
3. Гаврильев Р.И. Теплофизические свойства горных пород и напочвенных покровов криолитозоны. [Электронный ресурс]. Новосибирск: Издательство СО РАН, 1998. 280 с. URL: <https://nlrs.ru/open/111237> (дата обращения: 01.12.2025). ISBN 5-7692-0153-3.
4. Степанов А.В., Тимофеев А.М. Теплофизические свойства дисперсных материалов. Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1994. 124 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25481619> (дата обращения: 15.09.2025). ISBN 5-7623-0848-0.

5. Чеверев В.Г., Сафронов Е.В., Алексеев А.Г., Гречищева Э.С. Лабораторные методы определения теплофизических характеристик мерзлых и талых грунтов: аналитический обзор // Инженерная геология. 2022. Т. 17. № 1. С. 64–72. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49937081> (дата обращения: 03.07.2025). DOI: 10.25296/1993-5056-2022-17-1-64-72. EDN: HYWWWDG.

6. Тимофеев А.М., Степанов А.В., Кравцова О.Н., Протодьяконова Н.А., Таппырова Н.И. Расчет тепломассообменных свойств грунтов с крупнообломочными включениями // Естественные и технические науки. 2021. № 12 (163). С. 204–207. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47927638> (дата обращения: 03.09.2025). DOI: 10.25633/ETN.2021.12.24.

7. Kravtsova O.N., Protodyakonova N.A., Timofeev A.M., Stepanov A.V., Malyshev A.V., Tappyrova N.I. Calculation of thermal conductivity of fine soils taking into account the quantity of unfrozen water // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2023. Vol. 60 (3). P. 223–228. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=62548365> (дата обращения: 03.09.2025). DOI: 10.1007/s11204-023-09885-0.

8. Иванов В.А., Большев К.Н., Шаренкова Н.В., Степанов А.А., Андреев А.С. Разработка и применение измерительных комплексов для автоматизации натурных испытаний и экспериментальных исследований // IX Международная конференция по математическому моделированию, посвященная 75-летию Владимира Николаевича Врагова (г. Якутск, 27 июля – 01 августа 2020 г.). Якутск: Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, 2020. С. 157–158. [Электронный ресурс]. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44805244> (дата обращения: 10.10.2025). EDN: TFJCCP.

9. Тимофеев А.М., Кравцова О.Н., Таппырова Н.И., Иванов В.А., Протодьяконова Н.А. Расчетно-экспериментальный способ определения удельной теплоемкости дисперсного грунта и связанной воды // Вестник Международной академии холода. 2019. № 4. С. 92–97. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41496112> (дата обращения: 07.10.2025). DOI: 10.17586/1606-4313-2019-18-4-92-97.

10. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. М.: Стандартинформ, 2020. 38 с.

11. ГОСТ 32727-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Песок природный дробленый. Определение гранулометрического (зернового) состава и модуля крупности. М.: Стандартинформ, 2020. 4 с.

12. Григорьев Б.В. Развитие калориметрического метода измерения содержания незамерзшей воды в грунте при отрицательной температуре // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2020. Т. 6. № 31 (21). С. 87–99. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42736298> (дата обращения: 07.09.2025). DOI: 10.21684/2411-7978-2020-6-1-87-99.

13. Михайлова А.А., Мотенко Р.Г. Температура начала заморозания затопленных нефтезагрязненных песков // XV Международная научно-практическая конференция «Инновационные идеи молодых исследователей» (г. Уфа, 24 сентября 2024 г.). Уфа: ООО Научно-издательский центр «Вестник науки», 2024. С. 180–185. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=72853430> (дата обращения: 03.09.2025). EDN: ZFWNFW.

14. ГОСТ Р 71043-2023. Грунты. Метод лабораторного определения температуры начала заморозания и температуры конца оттаивания. М.: Российский институт стандартизации, 2023. 16 с.

15. Веселов В.В., Беляков В.А. Теплоизолированный малогабеленный фундамент: работа в сезонно-промерзающих грунтах и практика теплового расчета // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 8. С. 13–18. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17105717> (дата обращения: 03.09.2025).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: НИР FWRS-2024-0032 Исследование тепломассообменных процессов в многокомпонентных дисперсных средах для повышения надежности и безопасности технических систем в условиях глобальных изменений криолитозоны.

Financing: Research and development project FWRS-2024-0032: Study of heat and mass transfer processes in multicomponent dispersed media to improve the reliability and safety of technical systems under conditions of global changes in the cryolithozone.