

А.Ж. Жусупбеков¹, А.С. Монтаева², С.А. Монтаев³

^{1,2}Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, г. Нур-Султан, Республика Казахстан, ²Западно-Казахстанский аграрно-технический университет им. Жангир хана, г. Уральск, Республика Казахстан

ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАВИСИМОСТИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЕЗОННОПРОМЕРЗАЮЩЕГО ГРУНТА ПОД ОСНОВАНИЯ ФУНДАМЕНТОВ ОТ ИХ ВЛАЖНОСТИ, ПЛОТНОСТИ И ГЛУБИНЫ КОТЛОВАНА

Аннотация. *В результате анализа современного состояния устройства основания и фундаментов в условиях сезоннопромерзающих грунтов изучение теплофизических свойств имеет важное практическое значение для строительства многих подземных сооружений.*

Проведение исследований в этом направлении особенно актуально при локальном оттаивании грунта с использованием тепловых методов и различных химических реагентов. В статье представлены результаты научно-экспериментальных исследований по установлению закономерностей изменения физических характеристик грунта и коэффициента теплопроводности грунта от доминирующих факторов по следующим системам: глубина отбора грунта – влажность грунта; глубина отбора грунта – плотность грунта; влажность грунта – коэффициент теплопроводности грунта.

Ключевые слова: *коэффициент теплопроводности, плотность грунта, глубина отбора грунта, влажность грунта, теплоемкость грунта, теплофизические свойства грунта, локальное оттаивание грунта.*

Введение. Около 60% территории Казахстана приходится на районы сезонного промерзания и оттаивания грунтов. Сезонное промерзание является одним из основных факторов, определяющих конструкцию и глубину заложения подземных сооружений.

Кроме того, сезоннопромерзающие грунты с содержанием глинистых частиц или в водонасыщенном состоянии при промерзании подвержены морозному пучению, которое способно вызывать значительные деформации и разрушение объектов.

Изучение процессов промерзания оттаивания включает в себя исследование теплофизики грунтов.

Теплофизические свойства грунтов имеют немаловажное практическое значение в области проектирования, строительства и эксплуатации, фундаментов зданий и сооружений, а также энергетических фундаментов, систем теплообменников.

Для расчета температурного режима грунтов обычно используются такие теплофизические характеристики как теплоемкость и теплопроводность грунтов [1, 2].

При изучении теплового режима грунтовых массивов и особенностей процесса теплообмена в грунтах необходимо знание теплофизики грунтов.

Теплофизические свойства являются базовыми для определения и прогнозирования глубины и скорости промерзания и оттаивания грунтовых оснований.

Теплофизические свойства сезоннопромерзающих грунтов имеют немаловажное значение в ситуациях проектирования, строительства и эксплуатации различных объектов, когда в грунтовом массиве происходит передача тепла.

Например, тепловые процессы в грунтах учитываются при проектировании автомобильных и железных дорог [3], аэродромов, подземных инженерных сетей, в частности теплопроводов [4], силовых кабелей, мелкозаглубленных фундаментов малоэтажных зданий, в вопросах применения геотермальных систем, использующих энергию грунтового основания для отопления, кондиционирования и электроснабжения зданий [5].

Для решения всех этих задач требуются знание и тщательный анализ теплофизических свойств.

К основным теплофизическим характеристикам грунтов относятся коэффициент теплопроводности и объемная теплоемкость.

Процесс теплопередачи в грунте является сложным и осуществляется в первую очередь за счет кондуктивной теплопроводности, а также переноса влаги и излучения.

Следует особо отметить, что действительные значения теплофизических свойств грунтов могут существенно отличаться от опытных и расчетных показаний.

Поэтому возникает объективная необходимость изучения тепловых характеристик грунтов, в лабораторных условиях для каждого объекта строительства.

При проведении инженерно-геологических изысканий и проектировании сооружений в условиях распространения сезонномерзлых и вечномерзлых грунтов прямое определение теплофизических характеристик является обязательным требованием нормативных документов.

В работе [6] были изучены вопросы влияния точности определения теплофизических свойств на результаты исследования процессов промерзания оттаивания грунтового массива.

В результате было отмечено, что изменение коэффициента теплопроводности на 30% привело к изменению глубины сезонного промерзания грунта на 16%, а уменьшение значений удельной теплоемкости на 30% – к росту глубины промерзания на 5%.

В работах ученых [7-9] рассматривались проблемы изучения теплофизики грунтов в лабораторных условиях, приборы и оборудование для определения теплофизических характеристик грунтов.

Однако исследования проводились применительно к территории распространения вечномерзлых грунтов, что вызывает необходимость продолжения изучения теплофизики грунтов, подверженных сезонному промерзанию и оттаиванию.

По мнению авторов, изучение теплофизики грунтовых оснований, подверженных сезонному промерзанию и используемых для возведения на них мелкозаглубленных фундаментов, вызывает наибольший интерес, так как сезонное промерзание грунтов неизменно связано с возникновением сил морозного пучения, которые способны вызвать недопустимые деформации конструкций зданий и привести к их разрушению.

Исследование теплофизических свойств мерзлых и талых грунтов, используемых в качестве оснований зданий и сооружений, является важной задачей при изучении процессов теплопереноса в системе фундамент-грунт, определяющих условия строительства и эксплуатации инженерных сооружений.

Основная проблема заключается в измерении параметров теплофизических свойств дисперсных грунтов с заданной точностью.

В настоящее время при инженерно-геологических изысканиях теплофизические характеристики грунта определяют, как правило, по таблице СНиПа 2.02.04-88 (основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах), при этом не может быть обеспечена достаточная надежность и точность определяемых параметров, так как отсутствует информация по методам определения, региональной привязке, не учитываются генетические особенности грунта, возраст грунта, условия залегания.

В связи с этим актуальной задачей является повышение уровня экспериментальных теплофизических исследований грунтов лабораторными методами с возможностью определения на этих же образцах и других показателей состава, состояния и физических свойств [10, 11].

Цель исследования – установление закономерности изменения теплофизических свойств грунта под основания фундаментов в зависимости от глубины котлована, плотности и влажности грунта. Для достижения поставленной цели потребовалась решить следующие задачи:

- построение диаграмм зависимости от трех исследуемых факторов;
- установление основных закономерности изменения исследуемых свойств от трех факторов.
- установление доминирующих факторов, влияющие на изменения теплофизических свойств грунта.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования выбран грунты под основания фундаментов жилого дома № 23 в районе жилого комплекса «Арнау Сити». Исследованию подвергались грунты, отобранные из шурфа Т-1.

Общая глубина отбора составляет 3 м. Пробы для исследования отбирались через каждые 0,5.

После отбора пробы образцов в лабораторных условиях определялись природная влажность (%) и плотность грунта ($\text{кг}/\text{м}^3$) согласно ГОСТ 5180-2015 «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик».

Коэффициент теплопроводности грунта определялись с помощью специального прибора «Измеритель теплопроводности ИТП-МГ-4 «ЗОНД».



Рис. 1 – Фрагмент определения коэффициента теплопроводности грунта с помощью прибора «Измеритель теплопроводности ИТП-МГ-4 «ЗОНД»

Результаты и обсуждения

Теплопроводность различного вида грунтов является определяемой величиной с помощью различных приборов и оборудования, то иначе обстоит дело с удельной теплоемкостью грунтов [12, 13].

Удельная теплоемкость является аддитивной величиной [14] и при экспериментальных исследованиях теплоемкости грунта основной вклад вносит удельная теплоемкость грунта. Определение теплоемкости грунта – достаточно трудная задача, т.к. необходим специальный прибор с высокой чувствительностью.

Поэтому для определения объемной теплоемкости исследуемого грунта воспользовались данными СНиП 2.02.04-88 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Часть 3.

Согласно данному СНиП объемную теплоемкость (C_{th}) грунта принимали $2,04 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \times ^\circ \text{C})10^{-6}$.

Результаты проведенных научно-экспериментальных работ по определению физических характеристик и коэффициента теплопроводности грунта представлены в таблице 1.

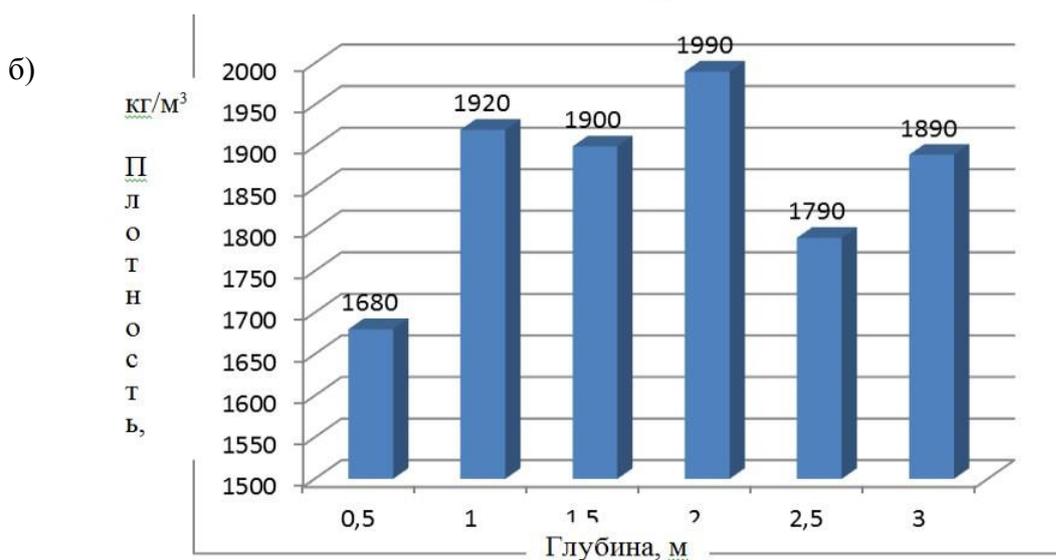
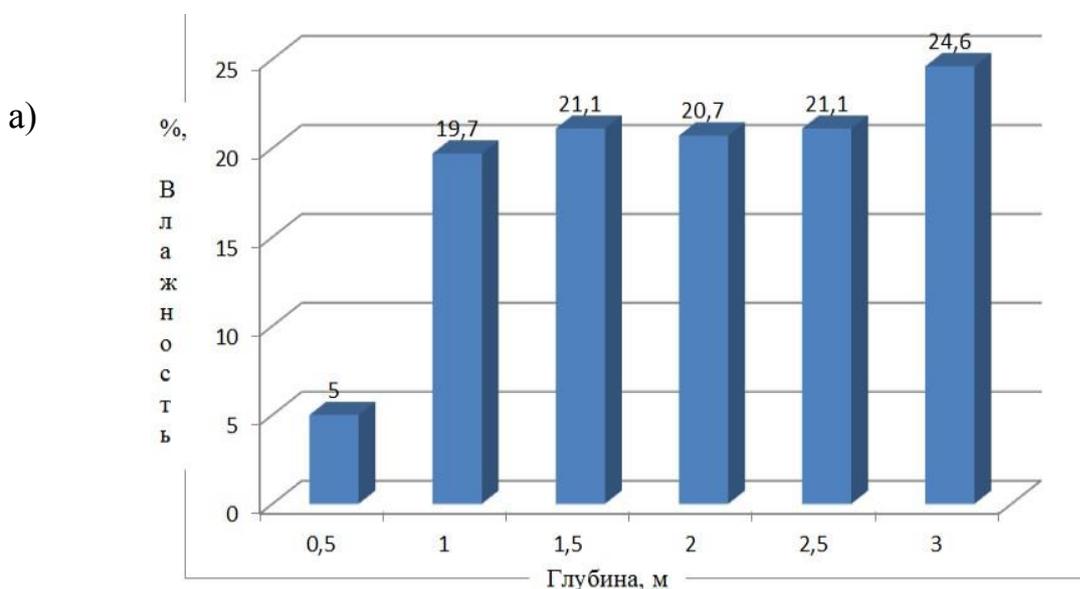
Таблица 1 – Результаты научно-экспериментальных исследований грунта

№ п/п	Номер шурфа	Глубина, м	Влажность природная, W.%	Плотность грунта, кг/м ³	Коэффициент теплопроводности - λ , Вт/(м×К)
1	Т-1	0,5	5,0	1680	0,543 Вт/(м×К)
2		1,0	19,7	1920	1,311 Вт/(м×К)

3		1,5	21,1	1900	1,440 Вт/(м×К)
4		2,0	20,7	1990	1,548 Вт/(м×К)
5		2,5	21,1	1790	1,224 Вт/(м×К)
6		3,0	24,6	1890	1,711 Вт/(м×К)

По результатам полученных научно-экспериментальных данных (табл.1) с целью установления закономерности изменения физических характеристик грунта и коэффициента теплопроводности грунта от доминирующих факторов были построены диаграммы (рис. 1) по следующим системам:

- глубина отбора грунта – влажность грунта;
- глубина отбора грунта – плотность грунта;
- влажность грунта – коэффициент теплопроводности грунта.



в)

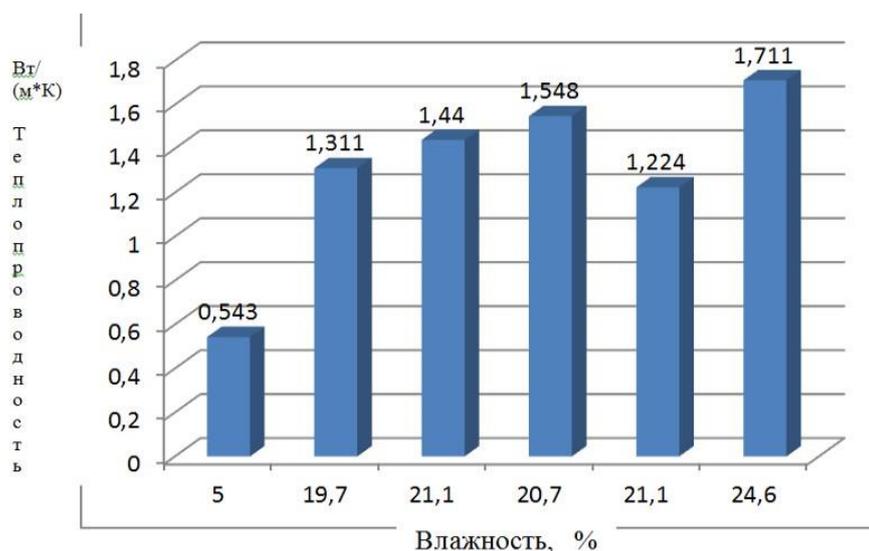


Рис. 2 – Диаграммы зависимости изменения физических характеристик грунта и коэффициента теплопроводности грунта от доминирующих факторов по системам: а) глубина отбора грунта – влажность грунта; б) глубина отбора грунта – плотность грунта; в) влажность грунта – коэффициент теплопроводности грунта.

Анализ диаграммы по системе глубина отбора грунта – влажность грунта показывает, что с увеличением глубины отбора грунта наблюдается повышение природной влажности грунта. Минимальное значение природной влажности наблюдается при глубине 0,5 м и составляет всего 5%.

С увлечением глубины отбора грунта до 1м наблюдается резкое повышение природной влажности грунта до 19,7%. Дальнейшее увеличение глубины отбора грунта до 2,5 м природная влажность грунта изменяется в незначительной степени.

Эти изменения составляет в пределах от 19,7 до 21,1%. Этот промежуток глубины отбора можно назвать отрезком стабильной природной влажности грунта. При глубине отбора грунта 3 м наблюдается значительной рост природной влажности грунта до 24,6%. Увеличение природной влажности грунта при глубине 3 м, вероятно, связан с уровнем грунтовых вод, находящихся близко к данной глубине. Следует отметить, что в области глубины отбора 0,5-2,5 м уровень грунтовых вод не оказывает значительного влияния на показатели природной влажности грунта.

Анализ диаграммы по системе глубина отбора грунта – плотность грунта показывает, что изменения плотности грунта в зависимости от глубины отбора грунта носит нелинейный характер. Максимальная плотность грунта наблюдается при глубине отбора 2,0м (1990 кг/м^3). Самая минимальная плотность грунта отмечается на глубине отбора 0,5м (1680 кг/м^3). Наиболее стабильные значения плотности грунта отмечается в интервале глубин отбора 1,0 – 2,0 м. Показатели плотности грунта на данных глубинах составляет $1920\text{--}1990 \text{ кг/м}^3$. Среднее значения плотности грунта отмечается при глубине отбора 2,5м. При максимальной глубине отбора (3м) плотность грунта составляет

1890 кг/м³. Таким образом, плотность грунта в зависимости от глубины отбора колеблется в пределах от 1680 кг/м³ до 1990 кг/м³.

Нелинейный характер изменения плотности грунта в зависимости от глубины отбора вероятно связано с изменениями вида грунта. Так как изменения вида грунта по глубине тесно связаны с изменениями их химико-минералогического, гранулометрического и фазового состава, что неизбежно приводит к изменению не только плотности грунта, но и других физических характеристик в целом.

Поэтому знание физических характеристик грунта по всей глубине отбора очень важно при устройстве оснований и фундаментов в условиях сезонномерзлого грунта.

Анализ диаграммы по системе влажность грунта – коэффициент теплопроводности показывает, что с увеличением влажности грунта наблюдается стабильное повышение показателей коэффициента теплопроводности. Самый низкий коэффициент теплопроводности отмечается при влажности грунта 5,0% и составляет 0,543 Вт/(м×К). Самое высокое значение коэффициента теплопроводности зафиксировано при влажности грунта 24,6% (1,711 Вт/(м×К)).

В интервале влажности грунта от 19,7% до 20,7% показатели коэффициента теплопроводности отмечается значительный их рост от 1,311 Вт/(м×К) до 1,548 Вт/(м×К). Однако, несмотря на повышение влажности грунта до 21,1%, наблюдается значительное снижение показателей коэффициента теплопроводности (1,224 Вт/(м×К)).

Такое изменение коэффициента теплопроводности грунта противоречит общим закономерностям строительного материаловедения сущность, которой заключается в прямой зависимости теплопроводных свойств материалов от их влажности, т.е. чем больше влажность материала, тем больше их коэффициент теплопроводности.

Этот факт еще раз доказывает о сложности тепломассопереносных процессов, происходящих при оттаивании и промерзании грунтов под основания и фундаментов зданий и сооружений.

Заключение

1. В результате анализа современного состояния устройства основания и фундаментов в условиях сезоннопромерзающих грунтов изучение теплофизических свойств имеет важное практическое значение для строительства многих подземных сооружений. Проведение исследований в этом направлении особенно актуально при локальном оттаивании грунта с использованием тепловых методов и различных химических реагентов;

2. На примере грунта под строительства жилого комплекса г. Нур-Султана установлены основные закономерности изменения их физических и теплофизических характеристик в зависимости от глубины отбора и естественной влажности;

3. Полученные научно-экспериментальные данные являются основными исходными данными для разработки технологических параметров устройства свайных фундаментов в зимних условиях с использованием методов локального оттаивания грунтов.

Литература:

1. Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Овчаренко Ф.Д. и др. Вода в дисперсных системах. – М.: Химия, 1989. – 288 с.
2. Etzler F. M., Connors J. J. Temperature dependence of the heat capacity of water in small pores // *IPST techn. pap. ser.* – 1990. – No. 348. – P. 28.
3. Ядовина К.С., Мащенко А.В. О практическом значении определения теплофизических свойств сезоннопромерзающих грунтов// Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2017. – Т. 8, № 1. – С. 81-89.
4. Моделирование сезонного промерзания земляного полотна автомобильной дороги/ А.М. Бургутдинов [и др.]// Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе: материалы науч.-практ. конф. с междунар. участием. – Пермь, 2015. – Т. 1. – С. 346-350.
5. Жолобов И.А., Примаков С.С. Теплосиловое взаимодействие горячих подземных трубопроводов с многолетнемерзлыми грунтами// Новые технологии – нефтегазовому региону: мат. науч.-практ. конф. с междунар. участием. – Тюмень, 2014. – Т. 1. – С. 93-95.
6. Ravaska O., Kujala K. Prediction of frost penetration depth by heat transfer analysis // *2nd European Spec. Conf. on Numerical Methods in Geotechn. Eng.* – Santander, 1990. – P. 293-302.
7. Медведев Д.П., Захаров А.В. Анализ сходимости результатов натурного измерения теплопроводности песчаного грунта с зарубежными расчетными методами// Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2014. – № 4. – С. 129-137.
8. Примаков С.С., Жолобов И.А. Измерение коэффициента теплопроводности мерзлых грунтов в интервале практически значимых температур// Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 9. – С. 55-57.
9. Григорьев Б.В., Шабаров А.Б. Экспериментальное исследование промерзания оттаивания грунтов в неравновесных условиях// Вестник Тюмен. гос. ун-та. – 2012. – №4. – С. 53-60.
10. Горобцов Д.Н. Анализ взаимосвязи между теплофизическими свойствами и простейшими физическими показателями мореных суглинков Московского региона// Инженерные изыскания. – 2011. – №2. – С. 22-28.
11. Горобцов Д.Н. Анализ взаимосвязи теплофизических свойств грунтов от естественной влажности// Сб. тез. докладов Научной конференции «Молодые – наукам о Земле». – М.: РГГРУ, 2010.
12. Старостин Е.Г., Лебедев М.П. Свойства связанной воды в дисперсных породах. Часть 1. Вязкость, диэлектрическая проницаемость, плотность, теплоемкость, поверхностное натяжение // *Криосфера Земли.* – 2014. – Т. XVIII, № 3. – С. 46-54.
13. Злочевская Р.И. Связанная вода в глинистых грунтах. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1969. – 176 с.
14. Гаврильев Р.И. Теплофизические свойства горных пород и напочвенных покровов криолитозоны. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1998. – 280 с.

Топырақтың маусымдық қату жағдайындағы іргетас пен іргетастардың қазіргі жағдайын талдау нәтижесінде термофизикалық қасиеттерді зерттеу көптеген жер асты құрылыстарын салу үшін практикалық маңызы зор.

Бұл бағыттағы зерттеулер термиялық әдістер мен түрлі химиялық реактивтерді қолдана отырып, топырақты жергілікті еріту үшін өте маңызды. Мақалада келесі жүйелердегі басым факторлардан топырақтың физикалық сипаттамалары мен топырақтың жылу өткізгіштік коэффициентінің өзгеру заңдылықтарын белгілеуге арналған ғылыми-эксперименттік зерттеудің нәтижелері келтірілген: топырақ сынамаларын алу тереңдігі – топырақтың ылғалдылығы; сынама алу тереңдігі – топырақ тығыздығы; топырақ ылғалдылығы – топырақтың жылу өткізгіштік коэффициенті.

***Түйін сөздер:** жылу өткізгіштік коэффициенті, топырақ тығыздығы, топырақтан сынама алу тереңдігі, топырақтың ылғалдылығы, топырақтың жылу сыйымдылығы, топырақтың термофизикалық қасиеттері, топырақты жергілікті еріту.*

As a result of the analysis of the current state of the foundation and foundations in the conditions of seasonally freezing soils, the study of thermophysical properties is of great practical importance for the construction of many underground structures.

Research in this direction is especially important for local thawing of soil using thermal methods and various chemical reagents. The article presents the results of a scientific - experimental study to establish patterns of change in the physical characteristics of the soil and the coefficient of thermal conductivity of the soil from the dominant factors in the following systems: depth of soil sampling – soil moisture; sampling depth – soil density; soil moisture – coefficient of soil thermal conductivity.

***Key words:** thermal conductivity coefficient, soil density, depth of soil sampling, soil moisture, heat capacity of soil, thermophysical properties of soil, local thawing of soil.*