Ядовина К.С., Машенко 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. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.1.07

Iadovina K.S., Mashchenko A.V. On importance of determining thermophysical properties of seasonal freezing soils. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Construction and Architecture*. 2017. Vol. 8, no. 1. Pp. 81-89. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.1.07

**ВЕСТНИК ПНИПУ.
СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
Т. 8, № 1, 2017
PNRPU BULLETIN.
CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE**
<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9826/2017.1.07

УДК 624.139

О ПРАКТИЧЕСКОМ ЗНАЧЕНИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЕЗОННОПРОМЕРЗАЮЩИХ ГРУНТОВ

К.С. Ядовина, А.В. Машенко

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 12 декабря 2016
Принята: 30 декабря 2016
Опубликована: 30 марта 2017

Ключевые слова:

теплофизические свойства, сезоннопромерзающие грунты, морозное пучение, коэффициент теплопроводности, объемная теплоемкость, температурный режим грунтов, компьютерное моделирование

АННОТАЦИЯ

Россия является самой холодной страной, ее большую часть занимает вечная мерзлота. Остальная территория приходится на районы сезонного промерзания и оттаивания грунтов. Сезонное промерзание является одним из основных факторов, определяющих конструкцию и глубину заложения подземных сооружений, конструктивное исполнение транспортных 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 автомобильных дорог, подземных тепловых сетей, фундаментов зданий, в частности фундаментов мелкого заложения под малоэтажные здания и сооружения, а также энергетических фундаментов, систем теплообменников. Теплофизические свойства грунтов характеризуются коэффициентом теплопроводности, удельной или объемной теплоемкостью и коэффициентом температуропроводности.

В данной статье сопоставляются различные способы вычисления теплофизических свойств грунтов: расчетный, экспериментальный и по нормативной документации. На основании проведенных сравнений сделан вывод о необходимости изучения теплофизики грунтов прямыми лабораторными методами, так как фактические (действительные) значения теплофизических характеристик могут заметно отличаться от расчетных или опытных данных. Для мелкозаглубленных фундаментов зданий и сооружений вопросы влияния точности определения теплофизических свойств на процессы промерзания-оттаивания сезоннопромерзающих грунтов являются актуальными, однако мало изучены и требуют дальнейшего исследования в современных программных комплексах.

© ПНИПУ

© Ядовина Ксения Сергеевна – магистрант, e-mail: ksezamova@mail.ru.
Машенко Александра Витальевна – аспирант, e-mail: spstf@pstu.ru.

Kseniia S. Iadovina – Master Student, e-mail: ksezamova@mail.ru.
Aleksandra V. Mashchenko – Postgraduate Student, e-mail: spstf@pstu.ru.

ON IMPORTANCE OF DETERMINING THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF SEASONAL FREEZING SOILS

K.S. Iadovina, A.V. Mashchenko

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 12 December 2016
Accepted: 30 December 2016
Published: 30 March 2017

Keywords:

thermophysical properties, seasonal freezing soils, frost heave, thermal conductivity, volumetric heat capacity, temperature conditions of soils, computer simulation

ABSTRACT

The Russian Federation is the coldest country, most of its territory is covered with permafrost. The rest of the territory has the areas of seasonal freezing and thawing of soils. Seasonal freezing is one of the main factors determining the structure, depth of the underground constructions and the type of transport constructions. In addition, the seasonal freezing soils containing clay particles or being in the water-saturated state under freezing are exposed to frost heaving, which is able to cause significant deformation and destruction of objects. Studying the freezing and thawing processes includes the study of thermophysics of soils. Thermal properties of soils are of a great practical importance in the field of design, construction and use of motor roads, underground heating networks, foundations of buildings, in particular shallow foundations for the low-rise buildings and structures, as well as power foundations and heat exchanger systems. Thermophysical properties of soils are characterized by the coefficient of thermal conductivity, specific or volumetric heat capacity and temperature diffusivity.

The article compares different ways of calculating thermal properties of soils, such as computations and experimental methods, as well as the method based on regulatory documents. The comparison results prove that it is necessary to study the soil thermophysics using direct laboratory methods, since the real values of thermophysical characteristics may significantly differ from the calculated and experimental data. The accuracy of determining the thermal properties of seasonal freezing and thawing of soils are relevant for shallow foundations of buildings and structures, but they are insufficiently studied and require further studies using advanced software systems.

© PNRPU

Большая часть территории России приходится на районы распространения вечной мерзлоты, которые охватывают 60 % площади нашей страны (рис. 1). Остальные 40 % занимают грунты, подверженные сезонному промерзанию и оттаиванию. Температурный режим грунтов сезонного промерзания имеет большое значение для практики строительства, определяет его принцип, а также конструктивные особенности фундаментов зданий и сооружений. Под температурным режимом понимаются распределение температурного поля в грунтовой толще по глубине и непрерывные изменения этого распределения во времени. Динамичность среднегодовой температуры грунта в естественных условиях и при их нарушении во многом определяет развитие ряда мерзлотных процессов и явлений, которые могут неблагоприятно сказаться на устойчивости сооружений и, кроме того, природном равновесии окружающей среды.

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 грунтовой массе происходит передача тепла. Например, тепловые процессы в грунтах учитываются при проектировании автомобильных и железных дорог [1], аэродромов, подземных инженерных сетей, в частности теплопроводов [2], силовых кабелей, мелкозаглубленных фундаментов малоэтажных зданий, в вопросах применения геотер-

мальных систем, использующих энергию грунтового основания для отопления, кондиционирования и электроснабжения зданий [3], а также в областях сельского хозяйства, метеорологии и геологии. Для решения всех этих задач требуются знание и тщательный анализ теплофизических свойств.

Рис. 1. Карта распространения вечной мерзлоты
Fig. 1. Map of permafrost distribution

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

Теплопроводностью грунта называется его способность пропускать тепло при условии разных температур поверхности. Данная характеристика определяется коэффициентом теплопроводности, который выступает показателем пропорциональности между величиной удельного теплового потока и градиентом температуры в грунте. Процесс теплопередачи в грунте является сложным и осуществляется в первую очередь за счет кондуктивной теплопроводности, а также переноса влаги и излучения. Коэффициент теплопроводности численно равен установившемуся потоку тепла через слой единичной толщины при разнице температур на границах слоя в 1 °C (рис. 2). Единица измерения коэффициента теплопроводности – Вт/(м · °C).

Теплоемкость грунта характеризует его способность поглощать тепло при нагревании и удерживать его в себе, а при охлаждении – отдавать (выделять). Другими словами, это некоторое количество тепла, необходимое для повышения температуры грунта на 1 °C. Различают удельную и объемную теплоемкость грунта. Значение теплоемкости грунтов как многокомпонентных систем определяется теплоемкостью его составляющих (твердых, жидких и газообразных). На практике используют значения объемной теплоемкости, которую получают путем умножения ее удельной величины на показания плотности грунта. Единица измерения объемной теплоемкости – Дж/(м³ · °C).

Рис. 2. Коэффициент теплопроводности материала
Fig. 2. Thermal conductivity of material

Температуропроводность характеризует скорость изменения (выравнивания) температуры грунта. Она является мерой скорости прогрева грунта, численно принимается равной отношению теплопроводности к объемной теплоемкости, измеряется в м²/с.

Свойства грунтов, в том числе и теплофизические, могут определяться косвенно, т.е. по нормативным документам, эмпирическим зависимостям или прямыми лабораторными методами. Теплофизические характеристики относятся к параметрам грунтов, которые определить косвенным путем достаточно сложно [4]. В первую очередь это объясняется влиянием множества факторов на теплоемкость и теплопроводность грунта. На рис. 3 показана зависимость теплофизики грунта от его различных параметров.

Рис. 3. Факторы, влияющие на теплопроводность и теплоемкость грунта
Fig. 3. Factors influencing the thermal conductivity and heat capacity of soils

В настоящее время российскими и зарубежными учеными разработан ряд расчетных методов вычисления теплофизических характеристик [5–9], которые различаются необходимыми исходными данными. В работе А.Л. Невзорова [10] приводится сравнение величин теплопроводности и теплоемкости по различным графикам со значениями, указанными в нормативной литературе (таблица). По полученным данным видно, что величины теплопроводности грунта в талом состоянии имеют наименьшую погрешность, когда для мерзлого состояния разница между значениями достаточно велика. Однако если рассматривать между собой только методики, то можно сказать о сравнительно небольшой разнице (до 4,5 %) полученных величин. Удельная теплоемкость по СП как для талого, так и для

мерзлого грунта в сравнении с методикой М. Kersten [11] имеет повышенные значения, и аналогично для мерзлого состояния разница между значениями возрастает (до 17,5 %).

Сравнение экспериментальных данных коэффициента теплопроводности грунта с его расчетными значениями представлено в статье [12]. В результате проведенного исследования сделан вывод, что наиболее близкие к измеренным данным результаты получены по методу О. Johansen [9, 13] (среднее отклонение составило 10 %). При этом отмечено, что при низкой влажности грунта погрешность значительно выше. Это объясняется зависимостью методики от содержания влаги в грунте.

Значения теплофизических характеристик грунтов, определенные
по нормативной литературе и расчетными методами

Comparison of thermophysical properties of soils determined according to regulatory
documents and calculation methods

Теплофизические характеристики	СП 25.13330.2012*	Методика М. Kersten	Методика О. Johansen
Коэффициент теплопроводности грунта			
Талого	1,55	1,65	1,7
Мерзлого	1,7	2,22	2,32
Удельная теплоемкость грунта			
Талого	$3,15 \cdot 10^6$	$2,8 \cdot 10^6$	–
Мерзлого	$2,35 \cdot 10^6$	$2,0 \cdot 10^6$	–

Примечание. *В работе [10] значения теплофизических характеристик принимались по СНиП 2.02.04-88. В актуализированной редакции изменений, касаемых указанных величин, внесено не было.

Таким образом, действительные значения теплофизических свойств грунтов могут существенно отличаться от опытных и расчетных показаний. Следовательно, встает вопрос о необходимости изучения тепловых характеристик грунтов, а именно о прямом лабораторном исследовании теплофизических свойств. При проведении инженерно-геологических изысканий и проектировании сооружений в условиях распространения вечномерзлых грунтов прямое определение теплофизических характеристик является обязательным требованием нормативных документов, тогда как для грунтов сезонного промерзания-оттаивания данный вопрос во внимание не принимается.

Учеными О. Ravaska и К. Kajula [14] 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 %.

Кроме того, в некоторых современных работах рассматривались проблемы изучения теплофизики грунтов в лабораторных условиях, приборы и оборудование для определения теплофизических характеристик грунтов [12, 15, 16]. 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 (рис. 4). Проблема строительства зданий и сооружений малой этажности на пучинистых грунтах с небольшими нагрузками на фундаменты имеет актуальное значение, поскольку заглубление малонагруженных фундаментов на глубину ниже сезонного промерзания грунта не всегда обеспечивает их устойчивость и не гарантирует защиту зданий от деформаций вследствие их накопления под действием сил морозного пучения [17]. Кроме того, для малоэтажных зданий устройство традиционных фундаментов, пререзающих слой сезонного промерзания грунтов, технически и экономически нецелесообразно.

Рис. 4. Деформации зданий в результате проявления сил морозного пучения
Fig. 4. Deformation of buildings as a result of frost heaving forces

Для определения глубины промерзания грунтовой толщи возможно использовать расчетные методы, которые, как и в случае вычисления теплофизических характеристик грунтов, не обеспечивают ее точного прогноза. Применение таких расчетов оправдано при строительстве фундаментов, залегающих ниже глубины промерзания грунта. Для проектирования современных малозаглубленных подземных сооружений необходимо решение нелинейной плоской или пространственной задачи, в которой необходимо учесть, кроме теплофизических и физико-механических характеристик грунтов, также уровень грунтовых вод, конструктивные особенности здания, наличие теплоизоляции, расстояния от различных существующих подземных сооружений и т.д. Изучение же промерзания и оттаивания грунта в реальных условиях не только долгий, но и дорогостоящий процесс, а ручной аналитический расчет достаточно трудоемок и занимает много времени. В связи с этим в последнее время успешно применяются численные методы моделирования в специализированных программных комплексах. Для выполнения теплотехнических расчетов одним из существующих геотехнических программных комплексов является GeoStudio, включающий в себя один из продуктов моделирования – GeoStudioTEMP/W. Данная программа позволяет анализировать, какие тепловые изменения происходят в грунтовой толще под влиянием окружающей среды, а также при строительстве различных подземных сооружений (рис. 5) [1, 18]. Программные расчеты производятся по методу конечных элементов. В качестве исходных данных в GeoStudio TEMP/W задаются теплофизические свойства грунтов: коэффициент теплопроводности и объемная теплоемкость в талом и мерзлом состоянии соответственно. Таким образом, качество вводимых данных напрямую влияет на точность и надежность теплотехнических расчетов.

Рис. 5. Примеры численного моделирования в программном комплексе GeoStudio TEMP/W
Fig. 5. Examples of numerical simulation using the software package GeoStudio TEMP/W

Таким образом, изучение теплофизических свойств сезоннопромерзающих грунтов имеет важное практическое значение для строительства многих подземных сооружений. Для зданий малой этажности это особенно значимо, так как устройство фундаментов ниже глубины промерзания для них нецелесообразно, необходимо строительство мелкозаглубленных фундаментов. Проектирование в таком случае потребует проведения тепло-технических расчетов с использованием данных о теплофизических свойствах грунтов. Качество строительства и надежная эксплуатация малозаглубленных фундаментов на грунтах сезонного промерзания-оттаивания напрямую связаны с исследованием пучинистости и точности определения теплофизики грунтов основания.

Библиографический список

1. Моделирование сезонного промерзания земляного полотна автомобильной дороги / А.М. Бургунутдинов [и др.] // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе: материалы науч.-практ. конф. с междунар. участием. – Пермь, 2015. – Т. 1. – С. 346–350.
2. Жолобов И.А., Примаков С.С. Теплосиловое взаимодействие горячих подземных трубопроводов с многолетнемерзлыми грунтами // Новые технологии – нефтегазовому региону: материалы науч.-практ. конф. с междунар. участием. – Тюмень, 2014. – Т. 1. – С. 93–95.
3. Захаров А.В. Анализ взаимодействия прогрессивных конструкций энергетических фундаментов с грунтовым массивом в геологических условиях г. Перми [Электронный ресурс] // Интернет-вестник Волгоград. гос. арх.-строит. ун-та. Сер. Политематическая. – 2011. – № 4 (19). – URL: [http://vestnik.vgasu.ru/attachments/Zakharov-2011_4 \(19\).pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/Zakharov-2011_4 (19).pdf) (дата обращения: 01.12.2016).
4. Зайцев В.С., Жолобов И.А. Об определении теплофизических свойств многолетнемерзлых грунтов // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 2. – С. 17–19.
5. Общее мерзлотоведение (геокриология) / под ред. В.А. Кудрявцева. – М.: Изд-во МГУ, 1978. – 464 с.
6. Usowicz B., Usowicz L. Thermal conductivity of soils – comparison of experimental results and estimation methods // Eurosoil 2004 Congress. – Freiburg, 2004. – 10 p.
7. The effect of soil thermal conductivity parameterization on surface energy fluxes and temperature / C.D. Peters-Lidard, E. Blackburn, X. Liang, E.F. Wood // Journal of the Atmospheric Sciences. – 1998. – Vol. 55, iss. 7. – P. 1209–1224.

8. An improved model for predicting soil thermal conductivity from water content at room temperature / S. Lu, T. Ren, Yu. Gong, R. Horton // Soil Science Society of America. – 2007. – Vol. 71. – P. 8–14.
9. Johansen O. Thermal conductivity of soils. – Hanover, New Hampshire: CRREL, 1977. – 291 p.
10. Невзоров А.Л. Фундаменты на сезоннопромерзающих грунтах. – М.: АСВ, 2000. – 152 с.
11. McFadden T.T., Bennett F.L. Construction in cold regions. – New York: John Wiley&Sons, 1991. – 615 p.
12. 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.
13. Farouki O.T. Thermal properties of soils // Trans. Tech. Publications. – 1986. – 136 p.
14. 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.
15. Примаков С.С., Жолобов И.А. Измерение коэффициента теплопроводности мерзлых грунтов в интервале практически значимых температур // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 9. – С. 55–57.
16. Григорьев Б.В., Шабаров А.Б. Экспериментальное исследование промерзания-оттаивания грунтов в неравновесных условиях // Вестник Тюмен. гос. ун-та. – 2012. – № 4. – С. 53–60.
17. Машченко А.В., Пономарев А.Б. К вопросу использования армированных сезоннопромерзающих пучинистых грунтов в качестве оснований фундаментов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2012. – № 1. – С. 64–80.
18. Бобров И.А., Захаров А.В. Численное моделирование тепловых процессов в ходе вариативного проектирования свайного энергетического фундамента для малоэтажного здания в климатических и геологических условиях города Перми // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2012. – № 2. – С. 45–53.

References

1. A.M. Burgonutdinov et al. Modelirovanie sezonnogo promerzaniia zemliannogo polotna avtomobil'noi do-rogi [Modeling seasonal freezing subgrade of the road]. *Modernizatsiia i nauchnye issledovaniia v transportnom komplekse: materialy nauch.-prakt. konf. s mezhdunarodnym uchastiem*, Perm, 2015, vol. 1. pp. 346–350.
2. Zholobov I.A., Primakov S.S. Teplosilovoe vzaimodeistvie goriachikh podzemnykh truboprovodov s mnogoletnemerzlymi gruntami [Thermal power interaction hot buried pipeline with permafrost soils]. *Novye tekhnologii – neftegazovomu regionu: materialy nauch.-prakt. konf. s mezhdunarodnym uchastiem*, Tiumen, 2014, vol. 1. pp. 93–95.
3. Zakharov A.V. Analiz vzaimodeistviia progressivnykh konstruktssii energetiche-skikh fundamentov s gruntovym massivom v geologicheskikh usloviakh g. Permi [Interaction analysis of progressive constructions energy foundations with soil masses in geological conditions of

Perm]. *Inter-net-vestnik VolgGASU. Seriya: Politematicheskaya*, 2011, no. 4 (19), available at: [http://vestnik.vgasu.ru/attachments/Zakharov-2011_4 \(19\).pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/Zakharov-2011_4 (19).pdf). (accessed 1 December 2016).

4. Zaitsev V.S., Zholobov I.A. Ob opredelenii teplofizicheskikh svoystv mnogo-letne-merzlykh gruntov [On the determination of thermal characteristic permafrost soil]. *Neftianoe khoziaistvo*, 2014, no. 2, pp. 17–19.

5. Kudriavtsev V.A. Obshchee merzlotovedenie (geokriologiya) [Total Permafrost (geocryology)]. Moscow: Izd-vo MGU, 1978. 464 p.

6. Usowicz B., Usowicz L. Thermal conductivity of soils – comparison of experimental results and estimation methods. *Eurosoil 2004 Congress*. Freiburg, 2004. 10 p.

7. Peters-Lidard C.D., Blackburn E., Liang X., Wood E.F. The Effect of Soil Thermal Conductivity Parameterization on Surface Energy Fluxes and Temperature. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1998, vol. 55, iss. 7, pp. 1209–1224.

8. Sen Lu, Tusheng Ren, Yuanshi Gong, Robert Horton. An improved model for predicting soil thermal conductivity from water content at room temperature. *Soil Science Society of America*, 2007, vol. 71, pp. 8–14.

9. Johansen O. Thermal conductivity of soils. Hanover, New Hampshire: CRREL, 1977. 291 p.

10. Nevzorov A.L. Fundamenty na sezonopromerzaiushchikh gruntakh [Foundations in soil seasonally]. Moscow: Izd-vo ASV, 2000. 152 p.

11. McFadden T.T., Bennett F.L. Construction in cold regions. New York: John Wiley&Sons. 1991. 615 p.

12. Medvedev D.P., Zakharov A.V. Analiz skhodimosti rezul'tatov naturnogo izme-reniia teploprovodnosti peschanogo grunta s zarubezhnymi raschetnymi metodami [Convergence analysis of the results of field measurements of thermal conductivity of sandy soil with foreign calculation methods]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2014, no. 4. pp. 129–137.

13. Farouki O.T. Thermal properties of soils. *Trans. Tech. publications*. 1986. 136 p.

14. 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, pp. 293–302.

15. Primakov S.S., Zholobov I.A. Izmerenie koeffitsienta teploprovodnosti merzlykh gruntov v intervale prakticheski znachimykh temperature [Measurement of the thermal conductivity of frozen soils in the range of practically significant temperature]. *Neftianoe khoziaistvo*, 2014, no. 9, pp. 55–57.

16. Grigor'ev B.V., Shabarov A.B. Eksperimental'noe issledovanie promerzaniia-ottaivaniia gruntov v neravnoesnykh usloviakh [Experimental study of freezing and thawing of soil in disequilibrium conditions]. *Vestniki Tiumenskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2012, no. 4, pp. 53–60.

17. Mashchenko A.V., Ponomarev A.B. K voprosu ispol'zovaniia armirovannykh sezonopromerzaiushchikh puchinistykh gruntov v kachestve osnovanii fundamentov [The question of the use of reinforced seasonal freezing heaving soils as bases foundations]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2012, no. 1, pp. 64–80.

18. Bobrov I.A., Zakharov A.V. Chislennoe modelirovanie teplovykh protsessov v khode variativnogo proektirovaniia svainogo energeticheskogo fundamenta dlia maloetazhnogo zdaniia v klimaticheskikh i geologicheskikh usloviakh goroda Permi [Numerical modeling of thermal processes in case of designing of the energy pile foundation for low-rise buildings in climatic and geological conditions of Perm city]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Urbanistika*, 2012, no. 2, pp. 45–53.