



## CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 11, № 2, 2020

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2020.2.02

УДК 692.115

# ВЛИЯНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА НА ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ПЕСЧАНОГО ГРУНТА

**А.В. Захаров, С.Э. Маховер**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

### О СТАТЬЕ

Получена: 20 января 2020  
Принята: 04 марта 2020  
Опубликована: 30 июня 2020

#### Ключевые слова:

теплопроводность, песчаный грунт, плотность, гранулометрический состав, теплофизика грунтов, уравнение регрессии.

### АННОТАЦИЯ

В настоящее время остро стоит вопрос сохранения ресурсов, в связи с чем актуальными становятся вопросы энергосбережения и поиска альтернативных источников энергии. Основными возобновляемыми источниками энергии являются: лучистая энергия Солнца, энергия ветра, энергия движущейся воды. Наша работа направлена на исследование вопроса использования низкопотенциальной теплоты грунтового массива при помощи энергоэффективных строительных конструкций – фундаментов.

Для расчета энергоэффективных конструкций необходимо знать теплофизические характеристики грунтов. На данный момент широко представлены расчетные методы определения теплофизических свойств грунтов с последующим практическим применением в области строительства, но ни один из них не учитывает их гранулометрический состав.

Таким образом, изучение зависимости теплопроводности от гранулометрического состава грунта является актуальным.

Цель работы – оценка зависимости теплопроводности от гранулометрического состава на примере песчаных грунтов.

В данной статье представлен анализ зависимости теплопроводности песчаного грунта от его гранулометрического состава.

Составлена матрица планирования эксперимента. Проведена серия экспериментов на основании ранее разработанной методики. Результаты обработаны методами математической статистики.

На основании проведенных исследований сделан вывод о конкурирующем влиянии на теплопроводность грунта двух факторов: увеличение  $\lambda$  за счет повышения степени заполнения пор и уменьшение общей теплопроводности за счет снижения степени заполнения пор. Данные результаты позволяют сделать вывод, что гранулометрический состав оказывает влияние на теплопроводность песчаного грунта.

В результате исследований экспериментально установлена зависимость теплопроводности песчаных грунтов от их гранулометрического состава.

© ПНИПУ

© Захаров Александр Викторович – кандидат технических наук, доцент, e-mail: miks@pstu.ru.  
Маховер Станислав Эдуардович – магистрант, e-mail: spymix90@gmail.com.

Alexander V. Zakharov – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: miks@pstu.ru.  
Stanislav E. Makhover – Master Student, e-mail: spymix90@gmail.com.

## THE EFFECT GRAIN-SIZE COMPOSITION ON THERMAL CONDUCTIVITY OF SANDY SOILS

A.V. Zakharov, S.E. Makhover

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

---

### ARTICLE INFO

Received: 20 January 2020  
Accepted: 04 March 2020  
Published: 30 June 2020

#### Keywords:

thermal conductivity, sandy soil, specific gravity, grain-size composition, thermal physics of earth foundation, regression equation.

### ABSTRACT

Today the issue of energy saving is acute. The main sources of energy are radiant energy of the Sun, wind energy, energy of moving water. Therefore, the issue of solving alternative energy sources is relevant. The article aims to solve the problem by using low-potential heat of the soil mass by means of energy-efficient building constructions - foundations.

It is necessary to know the thermal characteristics of soils for this. At the moment, methods for determining the thermophysical properties of inert materials with subsequent practical application in the field of construction have been widely studied, but no one of these methods takes into account the grain-size composition.

Thus, the study of the connection between the thermal conductivity and the grain-size composition of the soil is important.

The aim of the work is to Estimation of thermal conductivity of sandy soils based on grain-size composition.

This article presents an analysis of the dependence of the thermal conductivity of the sandy soil of its grain-size composition. The matrix of experiment planning is made; the methodology and technological sequence of the experiment were tested.

Statistical processing of the obtained experimental data was carried out.

Based on a series of test experiments, it was concluded that there are two factors competing in its thermal conductivity: an increase in  $\lambda$  due to an increase in the degree of pore filling and a decrease in total heat conductivity due to a decrease in the degree of pore filling. These results suggest that grain-size composition has an impact on the thermal conductivity of the sandy soil.

During the experiment, the dependence of the thermal conductivity of sandy soils on their grain-size composition was experimentally established.

© PNRPU

---

## Введение

Работа направлена на исследование закономерности теплофизических характеристик песчаных грунтов различного гранулометрического состава при изменении таких параметров, как влажность, плотность.

Искомая зависимость позволит на ранних этапах проектирования оценить возможность применения энергоэффективных фундаментов по данным стандартных инженерно-геологических изысканий.

Целью работы является оценка влияния зависимости теплопроводности от гранулометрического состава на примере песчаных грунтов.

Для достижения цели поставлены следующие задачи: провести анализ существующих методов оценки теплопроводности грунтов, выполнить планирование эксперимента, провести серии экспериментов на основании ранее разработанной методики, обработать результаты методами математической статистики.

## Основная часть

Процесс теплообмена в грунтах, как и оценка их теплопроводности, является сложной задачей, обусловленной прежде всего его неоднородностью.

Наличие в грунтах межзернового пространства, заполненного воздухом, водой, резко осложняет процесс переноса тепла.

В существующих исследованиях предложено множество расчетных методов оценки теплопроводности грунтов, которые позволяют учитывать тип грунтов, его плотность, влажность.

Анализируя проведенные исследования в области использования низкопотенциальной тепловой энергии грунта, можно сделать вывод, что на сегодняшний день широко изучены методы определения теплофизических свойств инертных материалов с последующим практическим применением в области строительства, но ни один из них не учитывает гранулометрический состав [1–9].

Таким образом, исследование с целью определения зависимости теплопроводности от гранулометрического состава грунта с учетом изменения его влажности и плотности на основе натурального эксперимента актуально. Работа находит свое практическое применение в расчетах энергоэффективных фундаментов. Исследования, посвященные оценке эффективности и возможности внедрения систем, использующих низкопотенциальную теплоту грунта для целей теплоснабжения зданий и сооружений, можно найти в работах А.В. Захарова и А.Б. Пономарева и других авторов [10–18].

Искомая зависимость позволит на ранних этапах проектирования оценить возможность применения энергоэффективных фундаментов без проведения сложных геологических и лабораторных исследований грунтов, только на основе имеющихся физических характеристик грунтов, в ходе полученных стандартных инженерно-геологических изысканий.

Ранее произведено планирование эксперимента и составлена матрица планирования эксперимента [2].

Методика проведения эксперимента следующая. В качестве объекта исследования использовались искусственно приготовленные образцы песчаного грунта.

Входными параметрами приняты:

$Y_1$  – плотность  $\rho$ , варьировалась в пределах 1,73–1,89 т/м<sup>3</sup>;

$Y_2$  – влажность  $\omega$ , варьировалась в пределах 0,04–0,12.

Выходной параметр – коэффициент теплопроводности  $\lambda$ .

Проведено три серии экспериментов для получения отдельных зависимостей для трех фракций песчаного грунта 0,5; 0,25; 0,1 мм.

Для линейной или неполной квадратичной модели достаточно двух значений каждого фактора (двух уровней фактора) при вычислении коэффициентов уравнения регрессии. Если расстояние между этими значениями фактора на оси координат разделим пополам, то получим величину основного – нулевого уровня. Разность между верхним или нижним и нулевым уровнем – интервал варьирования фактора [3].

Принят следующий вид уравнения регрессии:

$$\lambda = b_0 X_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2, \quad (1)$$

где  $X_0$  – свободный член,  $X_0 = 1$ ;  $X_1$  – плотность грунта;  $X_2$  – влажность грунта;  $b_0, b_1, b_2, b_{12}$  – коэффициенты уравнения регрессии.

Интервал определялся как половина разницы между верхним и нижним значением фактора. Причем верхний уровень фактора равен (+1), нижний – (–1).

Кодированное значение фактора

$$x_i = \frac{2(x_i - x_0)}{\Delta_i}, \quad (2)$$

где  $x_i$  – кодированное значение фактора;  $X_i$  – истинное значение фактора;  $X_0$  – истинное значение нулевого уровня;  $\Delta_i$  – интервал варьирования фактора.

План каждого эксперимента (для каждой фракции) представлен в табл. 1.

Таблица 1

Матрица планирования эксперимента

Table 1

The matrix of experiment planning

Номер эксперимента	Значения факторов				Значения откликов
	Плотность		Влажность		
	Кодированное значение	Истинное значение, т/м <sup>3</sup>	Кодированное значение	Истинное значение, д.е.	Теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·К)
	$x_1$	$X_1$	$x_2$	$X_2$	
1	-1	1,73	-1	0,04	$\lambda_1$
2	1	1,89	-1	0,04	$\lambda_2$
3	-1	1,73	1	0,12	$\lambda_3$
4	1	1,89	1	0,12	$\lambda_4$

По описанной выше методике были определены входные параметры и границы их варьирования. В качестве объекта исследования использовался песок, отобранный в Пермском крае. По классификации ГОСТ 25100–2011 песок является мелким.

Натурный эксперимент проведен на материально-технической базе лаборатории кафедры «Строительное производство и геотехника» (рис. 1).



Рис. 1. Подготовка к тестовым экспериментам

Fig. 1. Trial experiments

Серия экспериментов проводилась по следующей методике. В качестве материала использовались фракции песка мелкого: 0,5; 0,25 и 0,1 мм. Песок просеивался через сита до необходимой фракции, затем образцы песчаного грунта увлажнялись водой до значения влажности 0,04–0,12 для каждой фракции и уплотнялись на гидравлическом прессе до заданной плотности в цилиндре (рис. 2–4).

В итоге подготовлены 12 образцов с различной комбинацией значений плотности, влажности и гранулометрического состава.

Теплопроводность исследуемых образцов определялась зондовым методом на приборе «МИТ-1» (рис. 5).

Измерение теплопроводности производилось по ГОСТ 30256–94. Исследование теплопроводности  $\lambda$  проводилось на 12 образцах песка. В табл. 2 приведены экспериментальные данные, полученные для песка фракции 0,5; 0,25; 0,1 мм с заданными значениями влажности и плотности.



Рис. 2. Отсев на фракции  
Fig. 2. Sifting of the soil



Рис. 3. Увлажнение образца  
Fig. 3. Humidification  
of the studied sample



Рис. 4. Уплотнение образца  
Fig. 4. Compaction  
of the studied sample



Рис. 5. Определение теплопроводности  
Fig. 5. Determination of the thermal conductivity

Полученные результаты обработаны методами математической статистики в программном комплексе MS Excel. В табл. 3 представлены уровни варьирования основных факторов.

Для каждой фракции определены коэффициенты уравнения регрессии (1) в программном комплексе MS Excel. Модель проверена на адекватность. После обработки результатов численного эксперимента была определена искомая зависимость в виде уравнения регрессии.

Уравнение регрессии для фракции 0,5 имеет вид

$$\lambda = -0,055 + 1,34\rho + 5,74\omega - 3,55\rho\omega. \quad (3)$$

Уравнение регрессии для фракции 0,25 имеет вид

$$\lambda = -2,72 + 2,17\rho + 33,42\omega - 17,19\rho\omega. \quad (4)$$

Уравнение регрессии для фракции 0,1 имеет вид

$$\lambda = 2,15 - 0,67\rho - 17,56\omega + 10,57\rho\omega. \quad (5)$$

График численной модели зависимости теплопроводности от влажности и плотности для фракции 0,5 представлен на рис. 6.

Таблица 2

Результаты испытаний

Table 2

The results of the experiment

п/п	Фракция	Плотность, т/м <sup>3</sup>	Влажность, д.е.	Теплопроводность, Вт/(м·К)
1	0,5	1,73	0,04	2,246
1	0,5	1,89	0,04	2,437
1	0,5	1,73	0,12	2,213
1	0,5	1,89	0,12	2,359
2	0,25	1,73	0,04	1,175
2	0,25	1,89	0,04	1,412
2	0,25	1,73	0,12	1,470
2	0,25	1,89	0,12	1,486
3	0,1	1,73	0,04	1,059
3	0,1	1,89	0,04	1,022
3	0,1	1,73	0,12	1,173
3	0,1	1,89	0,12	1,277

Таблица 3

Уровни варьирования

Table 3

The levels variation

Уровень	Факторы	
	Плотность $\rho$	Влажность $\omega$
	$X_1$	$X_2$
1	1,89	0,12
-1	1,73	0,04

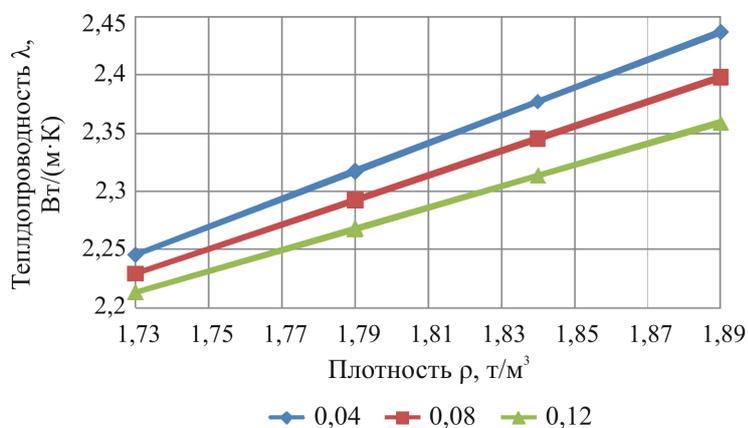


Рис. 6. График теплопроводности песка фракции 0,5 мм при различных влажностях грунта  
 Fig. 6. Schedule dependence of thermal conductivity of sandy soil, grain-size of 0.5 of various humidity of the studied sample.

## Заключение

Анализ результатов исследований позволил сделать следующие выводы:

1. Конкурирующее влияние на теплопроводные свойства грунтов оказывают два фактора – плотность и влажность, что подтверждает результаты ранее проведенных исследований.
2. При одинаковой влажности и плотности существенное значение имеет крупность зерен грунта, гранулометрический состав оказывает влияние на теплопроводность песчаного грунта. С увеличением крупности зерен теплопроводность песчаного грунта возрастает.

## Библиографический список

1. Захаров А.В., Пономарев А.Б., Мащенко А.В. Энергоэффективные конструкции в подземном строительстве: учеб. пособие для вузов. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. – 127 с.
2. Маховер С.Э., Захаров А.В. Планирование эксперимента по определению теплопроводности песчаных грунтов на основе гранулометрического состава // *Современные технологии в строительстве. Теория и практика.* – 2019. – Т. 1. – С. 72–76.
3. Баталин Б.С. Строительные материалы – исследования, изобретения. – Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 1992. – 144 с.
4. Захаров А.В. Анализ взаимодействия прогрессивных конструкций энергетических фундаментов с грунтовым массивом в геологических условиях г. Перми // *Интернет-вестник ВолгГАСУ. Серия: Политематическая.* – 2011. – Вып. 4 (19).
5. Usowicz B., Usowicz L. Thermal conductivity of soils – comparison of experimental results and estimation methods // *Eurosoil 2004 Congress.* – Freiburg, 2004. – 10 p.
6. The Effect of Soil Thermal Conductivity Parameterization on Surface Energy Fluxes and Temperatures / C.D. Peters-Lidard, E. Blackburn, X. Liang, E.F. Wood // *Journal of the Atmospheric Sciences.* – 1998. – Vol. 55, iss. 7. – P. 1209–1224.
7. Захаров А.В. Применение геотермальной энергии грунта для отопления зданий в климатических и инженерно-геологических условиях Пермского края // *Вестник гражданских инженеров.* – 2010. – № 2 (23). – С. 85–89.
8. Горобцов Д.Н. Научно-методические основы исследования теплофизических свойств дисперсных грунтов: дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2011. – 198 с.
9. Чудновский А.Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит-ры, 1962. – 456 с.
10. Аметистов Е.В., Григорьев В.А., Емцев Б.Е. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: справочник / под общ. ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. – М.: Энергоиздат, 1982. – 512 с.
11. Сборник трудов международной конференции (ASSMGT) TAGUNGBEITÄGE, 18–19 января 2007 г.
12. Brandi H. Energy foundation and other thermo- active ground structures // *Geotechnique.* – 2006. – № 56. – P. 81–122.
13. Пономарев А.Б., Калошина С.В. Об инженерно-геологических условиях строительства г. Перми. Проблемы механики грунтов и фундаментостроения в сложных грунтовых условиях // *Тр. междунар. науч.-техн. конф., посвященной 50-летию БашНИИСтроя: в 3 т.* – Уфа, 2006. – Т. 2.

14. Васильев Г.П. Теплохладоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной тепловой энергии поверхностных слоев земли: дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2006. – 432 с.
15. Васильев Г.П., Шилкин Н.В. Геотермальные теплонасосные системы теплоснабжения и эффективность их применения в климатических условиях России // АВОК. – 2003. – № 2. – С. 52–60.
16. Бобров И.А., Калошина С.В., Захаров А.В. Применение тепловой энергии грунтового основания для отопления и кондиционирования зданий // Вестник Пермского государственного технического университета. Строительство и архитектура. – 2011. – № 1. – С. 10–14.
17. Шеин Е.В. Курс физики почв. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 432 с.
18. Ши Л. Численные методы в задачах теплообмена. – М.: Мир, 1988. – 544 с.

## References

1. Zakharov A.V., Ponomarev A.B., Maschenko A.V. *Energoeffektivnyye konstruksii v podzemnom stroitel'stve. Uchebnoe posobie dlya vuzov* [Energy efficient design in civil engineering: a manual for high schools]. Perm, Permskii natsionalniy issledovatel'skiy polytekhnicheskii universitet, 2012, 127 p.
2. Makhover S.E., Zakharov A.V. *Planirovaniye eksperimenta po opredeleniyu teploprovodnosti peschanykh gruntov na osnove granulometricheskogo sostava* [Planning an experiment to determine the thermal conductivity of sandy soils based on the granulometric composition]. *Sovremennyye tekhnologii v stroitel'stve. Teoriya i praktika*, 2019, vol. 1, pp. 72-76.
3. Batalin B.S. *Stroitel'nyye materialy-issledovaniya, izobreteniya* [Building materials-research, inventions]. Perm, Permskii natsionalniy issledovatel'skiy polytekhnicheskii universitet, 1992, 144 p.
4. Zakharov A.V. *Analiz vzaimodeystviya progressivnykh konstruksiy energeticheskikh fundamentov s gruntovym massivom v geologicheskikh usloviyakh g. Permi* [Analysis of the interaction of progressive structures of energy foundations with a primer in the geological conditions of the city of Perm]. *Internet-vestnik Volgogradskiy arkhitekturno-stroitel'nyy universitet*, 2011, 4 (19)
5. Usowicz B., Usowicz L. Thermal conductivity of soils – comparison of experimental results and estimation methods. *Eurosoil 2004 Congress*, Freiburg, 2004, 10 p.
6. Peters-Lidard C.D., Blackburn E., Liang X., Wood E.F. The effect of soil thermal conductivity parameterization on surface energy fluxes and temperatures. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1998, vol. 55, iss. 7, pp. 1209–1224.
7. Zakharov A.V. *Primeneniye geotermal'noy energii grunta dlya otopeniya zdaniy v klimaticheskikh i inzhenerno-geologicheskikh usloviyakh Permskogo kraya* [Application of geothermal energy of soil for heating buildings in climatic and engineering-geological conditions of the Perm region]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*, 2010, no. 2 (23), pp. 85-89
8. Gorobtsov D.N. *Nauchno-metodicheskiye osnovy issledovaniya teplofizicheskikh svoystv dispersnykh gruntov* [Scientific and methodological bases of research of thermophysical properties of dispersed soils]. Doctor's degree dissertation. Moscow, 2011, 198 p.
9. Chudnovskiy A.F. *Teplo-fizicheskiye kharakteristiki dispersnykh materialov* [Thermophysical characteristics of dispersed materials]. Moscow, Gosudarstvennoye izdatel'stvo fiziko-matematicheskoy literatury, 1962, 456 p.

10. Ametistov E.V., Grigorev V.A., Emtsev B.E. Teplo- i massoobmen. Teplotekhnicheski eksperiment [Heat and mass transfer. Thermal engineering experiment]. Eds. V.A. Grigorev, V.M. Zorin. Moscow, Energostroyizdat, 1982, 512 p.
11. *Sbornik trudov mezhdunarodnoy konferentsii (ASSMGT) «TAGUNGBEITÄGE»*, 18-19 January 2007.
12. Brandi H. Energy foundation and other thermo- active ground structures. *Geotechnique*, 2006, iss. 56, pp. 81–122.
13. Ponomarev A.B., Kaloshina S.V. Ob inzhenerno-geologicheskikh usloviyakh stroitelstva g. Permi. Problemy mekhaniki gruntov I fundamentostroeniya v slozhnykh gruntovykh usloviyakh [About engineering and geological conditions of construction of Perm. Problems of soil mechanics and Foundation construction in difficult ground conditions]. *Trudy mezhdunarodnoy nauch.-tekhtich. konf., posvyashchennoy 50-letiyu BashNIIstroya*, 2006, vol. 2.
14. Vasil'yev G.P. Teplokhadosnabzheniye zdaniy i sooruzheniy s ispol'zovaniyem nizkopotentsial'noy teplovoy energii poverkhnostnykh sloyev zemli [Heat and cold supply of buildings and structures using low-potential thermal energy of the surface layers of the earth]. Doctor's degree dissertation. Moscow, 2006, 432 p.
15. Vasil'yev G.P., Shilkin N.V. Geotermal'nyye teplonasosnyye sistemy teplosnabzheniya i effektivnost' ikh primeneniya v klimaticheskikh usloviyakh Rossii [Geothermal heat pump systems of heat supply and efficiency of their application in climatic conditions of Russia]. *AVOK*, 2003, no. 2, pp. 52-60.
16. Bobrov I.A., Kaloshina S.V., Zakharov A.V. Primneneniye teplovoy energii gruntovogo osnovaniya dlya otopeniya i konditsionirovaniya zdaniy [Application of ground-based thermal energy for heating and air conditioning of buildings]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2011, no. 1, pp. 10–14.
17. Shein Ye.V. Kurs fiziki pochv [Soil physics course]. Moscow, MGU, 2005, 432 p.
18. Shi L. Chislennyye metody v zadachakh teploobmena [Numerical methods in heat transfer problems]. Moscow, Mir, 1988, 544 p.