

Овчинников Н.М., Захаров А.В. Оценка степени влияния теплофизических характеристик грунтового массива на величину тепловой энергии, отбираемой энергоэффективной сваей // *Construction and Geotechnics*. – 2020. – Т. 11, № 1. – С. 53–61. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.1.05

Ovchinnikov N.M., Zaharov A.V. Investigation of influence of thermophysical characteristics of soil massif on the value of thermal energy taken by energy efficient pile. *Construction and Geotechnics*. 2020. Vol. 11. No. 1. Pp. 53-61. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.1.05



CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 11, № 1, 2020

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



DOI: 10.15593/2224-9826/2020.1.05

УДК 624.131

## ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТОВОГО МАССИВА НА ВЕЛИЧИНУ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ, ОТБИРАЕМОЙ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ СВАЕЙ

Н.М. Овчинников, А.В. Захаров

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

### О СТАТЬЕ

Получена: 04 декабря 2019

Принята: 27 января 2020

Опубликована: 27 марта 2020

#### Ключевые слова:

низкопотенциальная энергия, теплоемкость, теплопроводность, энергоэффективность, энергия, температура, климат.

### АННОТАЦИЯ

Исчерпаемость традиционных ископаемых источников энергии ведет к все более широкому освоению нетрадиционных источников энергии. Одним из перспективных направлений альтернативной энергетики видится использование низкопотенциальной энергии грунтового массива для отопления зданий и сооружений различного назначения. Отбор тепла возможен посредством применения конструкций энергоэффективных фундаментов. Однако их рациональное проектирование невозможно без тщательного изучения большого числа факторов, оказывающих влияние на потенциальную величину тепловой энергии, извлекаемой из толщи земли. Целью данной работы являлось построение цельной методики, позволяющей оценить степень влияния теплофизических характеристик грунтового массива, в частности, таких как теплоемкость и теплопроводность, на величину тепловой энергии, отбираемой энергоэффективной сваей. Произведена постановка и анализ численного эксперимента по выявлению искомых зависимостей. Составлена матрица планирования эксперимента. Выполнено численное моделирование работы энергоэффективной сваи различных геометрических параметров в разных грунтовых условиях. Осуществлена статистическая обработка полученных экспериментальных данных. Составлено квадратичное уравнение регрессии для определения количества теплоты через боковую поверхность сваи в зависимости от длины сваи, ее диаметра, теплоемкости и теплопроводности грунта. Проведен анализ данного уравнения с целью оценки степени влияния исходных теплофизических параметров грунта на величину тепловой энергии, отобранной сваей.

© ПНИПУ

© Овчинников Никита Михайлович – магистрант, e-mail: zryty@yandex.ru.

Захаров Александр Викторович – кандидат технических наук, доцент, e-mail: miks@pstu.ru.

Nikita M. Ovchinnikov – Master Student, e-mail: zryty@yandex.ru.

Zakharov A. Viktorovich – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: miks@pstu.ru.

## **INVESTIGATION OF INFLUENCE OF THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF SOIL MASSIF ON THE VALUE OF THERMAL ENERGY TAKEN BY ENERGY EFFICIENT PILE**

**N.M. Ovchinnikov, A.V. Zaharov**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

---

### ARTICLE INFO

Received: 04 December 2019

Accepted: 27 January 2020

Published: 27 March 2020

#### *Keywords:*

low-potential energy, heat capacity, heat conductivity, energy efficiency, pile, foundation, temperature, climate.

### ABSTRACT

The depletion of traditional fossil energy sources leads to an increasing development of non-traditional energy sources. One of the promising directions of alternative energy is the use of low-potential energy of the soil massif for heating buildings and structures for various purposes. Heat extraction is possible through the use of energy-efficient Foundation structures. However, their rational design is impossible without a careful assessment of a large number of factors that affect the potential value of thermal energy extracted from the earth's thickness. The purpose of this work was to build a whole methodology to assess the degree of influence of thermophysical characteristics of the soil mass, in particular, such as heat capacity and thermal conductivity, on the amount of heat energy selected energy-efficient pile. The formulation and analysis of the numerical experiment to identify the desired dependencies. The matrix of experiment planning is made. The numerical simulation of the energy-efficient pile of different geometric parameters in different soil conditions is performed. Statistical processing of the obtained experimental data was carried out. A quadratic regression equation was developed to determine the amount of heat through the side surface of the pile depending on the length of the pile, its diameter, heat capacity and thermal conductivity of the soil. The analysis of this equation for the purpose of estimation of degree of influence of initial thermophysical parameters of soil on value of thermal energy of the selected pile is carried out..

© PNRPU

---

## **Введение**

Все более ярко прослеживаемая тенденция поиска нетрадиционных источников энергии ведет к очень скорому и неизбежному внедрению результатов исследований в этой области в повседневную жизнь. Вместе с тем повышается внимание к экономии энергоресурсов, в частности, вводятся дополнительные требования к повышению экономической эффективности использования энергетических ресурсов при эксплуатации зданий и сооружений, которые во многих странах устанавливаются на законодательном уровне [1–8].

Одним из эффективных способов повышения энергетической эффективности, а также степени автономности зданий видится использование низкопотенциальной энергии грунтового массива для отопления зданий в холодный период года [9–12].

Многочисленными исследованиями установлено, что начиная с определенной глубины температура грунта остается постоянной и лежит в пределах 5–10 °С. Данного порядка величин температур вполне достаточно для обеспечения объекта строительства тепловой энергией. Повышение температуры теплоносителя до рабочих значений осуществляется путем включения в технологическую схему теплоснабжения теплового насоса [13, 14].

В отсутствие нормативной базы на территории РФ в области проектирования энергоэффективных фундаментов утвержденные методики расчета отсутствуют. Особую роль в развитии технологии играют натурные исследования и анализ работы уже реализованных проектов [15, 16].

Число факторов, оказывающих влияние на эффективность работы энергетических фундаментов, огромно. Заметно влияние климатических параметров наружного воздуха, периодичности работы энергоэффективной сваи. Значительную роль играют также и теплофизические характеристики грунтового массива [17–20].

В настоящей статье приведены результаты численного эксперимента по оценке влияния параметров теплоемкости и теплопроводности грунтового массива на величину тепловой энергии, получаемой с помощью энергоэффективной сваи.

## 1. Постановка задачи

Методика исследований влияния параметров теплопроводности и теплоемкости грунта на количество тепловой энергии, отбираемое энергоэффективной сваей, заключается в многократном решении задачи по вычислению величины теплового потока для различных грунтовых условий.

Была составлена матрица планирования эксперимента. В качестве параметров варьирования приняты радиус сваи, длина сваи, коэффициент теплопроводности грунта и его теплоемкость [21].

Для трехуровневого плана с четырьмя значимыми факторами строится матрица из 24 точек плана. Уровни варьирования основных факторов представлены в табл. 1. Общий вид матрицы планирования эксперимента приведен в табл. 2 [22–24].

Таблица 1

Уровни варьирования основных факторов

Table 1

The levels of variation of the main factors

Основной фактор		Уровни варьирования		
основной фактор, ед. изм.	кодировый вид	–1	0	1
$r$ , м	X1	0,15	0,35	0,55
$l$ , м	X2	6	13	20
$\lambda$ , Вт/м · °С	X3	0,5	1,5	2,5
$c$ , МДж/м <sup>3</sup> · °С	X4	1,2	1,8	2,2

Численное моделирование проводилось в программном комплексе GeoStudio/TEMP. Выходным параметром являлась величина плотности теплового потока через единицу боковой поверхности энергоэффективной сваи за единицу времени. Данный параметр путем простейших математических операций приводился к величине тепловой энергии, отбираемой сваей за единицу времени. Постановка задачи – осесимметричная.

Отбор тепловой энергии сваей обеспечивался заданием по ее боковой поверхности граничного условия  $t = 1$  °С.

Климатические условия задавались граничным условием на верхнюю границу данной модели. В качестве климатических параметров были приняты температура воздуха, толщина снегового покрова, величина солнечной радиации на квадратный метр поверхности, скорость ветра. Численное значение параметров определялось как среднее по результатам метеонаблюдений с 2005 по 2018 г. для г. Перми. Фрагмент таблицы исходных данных представлен в табл. 3 [25].

Таблица 2

Матрица планирования эксперимента

Table 2

Experiment planning matrix

Номер эксперимента	Основные факторы			
	x1	x2	x3	x4
1	1	1	0	0
2	1	-1	0	0
3	-1	1	0	0
4	-1	-1	0	0
5	1	0	1	0
6	1	0	-1	0
7	-1	0	1	0
8	-1	0	-1	0
9	0	1	1	0
10	0	1	-1	0
11	0	-1	1	0
12	0	-1	-1	0
13	0	0	1	0
14	0	0	1	-1
15	0	0	-1	1
16	0	0	-1	-1
17	-1	0	0	1
18	-1	0	0	-1
19	-1	0	-1	1
20	-1	0	-1	-1
21	0	1	0	1
22	0	1	0	-1
23	0	-1	0	1
24	0	-1	0	-1

Таблица 3

Осредненные данные метеорологических наблюдений за период с 2008 по 2018 г.

Table 3

Averaged data from meteorological observations for the period from 2008 to 2018

Календарный день	Температура, °С	Скорость ветра, м/с	Снежный покров, см	Солнечная радиация, МДж/м <sup>2</sup>
01.01	-13,71	2,79	44,00	1,48
02.01	-12,26	2,64	38,00	1,48
03.01	-12,66	2,82	35,00	1,48
04.01	-12,21	2,71	39,00	1,48
05.01	-12,56	2,36	39,00	1,48
06.01	-12,45	2,17	41,00	1,48
07.01	-15,56	2,08	41,00	1,48
08.01	-16,40	1,93	38,00	1,48

Исходя из нелинейной зависимости выходного параметра от независимых, для описания процесса применялось квадратичное уравнение регрессии для четырехфакторного эксперимента:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{44}x_4^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{34}x_3x_4, \quad (1)$$

где  $b_i, b_{ii}, b_{ij}$  – коэффициенты уравнения регрессии.

### Обработка результатов численного эксперимента

Коэффициенты квадратичного уравнения регрессии были получены посредством обработки экспериментальных данных в программном комплексе STATISTIKA 13.5. Вид анализа – регрессия поверхности отклика. Зависимый параметр – тепловой поток. Независимые параметры – основные факторы, представленные в табл. 1.

Общий вид численной модели приведен на рис. 1.

После каждого эксперимента определялась осредненная по глубине величина плотности потока, которая приводилась к величине теплового потока через сваю. Результат обработки эксперимента в программе STATISTICA представлен в табл. 4.

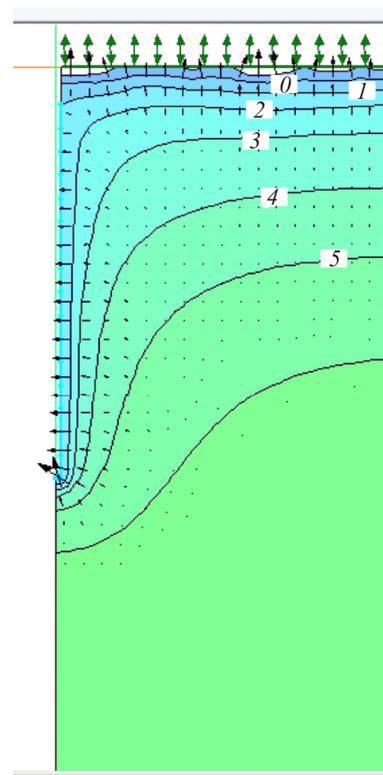


Рис. 1. Общий вид численной модели  
 Fig. 1. General view of the numerical model

Таблица 4

Результат расчета в программе STATISTICA

Table 4

Calculation result in the STATISTICA program

$N = 24$	
Intercept	84,6852
$x_1$	-23,0320
$x_2$	-4,9385
$x_3$	-19,6787
$x_4$	-62,5935
$x_1^2$	140,1583
$x_2^2$	0,2451
$x_3^2$	-6,4060
$x_4^2$	10,7175
$x_1x_2$	-5,8841
$x_1x_3$	-26,3860
$x_1x_4$	-6,2579
$x_2x_3$	5,0107
$x_2x_4$	2,5596
$x_3x_4$	16,5980

После обработки результатов численного эксперимента была получена искомая зависимость в форме квадратичного уравнения регрессии:

$$Q = 84,69 - 23,03 \cdot r - 4,94 \cdot l - 19,68 \cdot \lambda - 62,59 \cdot c + 140,16 \cdot r^2 + 0,25 \cdot l^2 - 6,41 \cdot \lambda^2 + 10,72 \cdot c^2 - 5,88 \cdot r \cdot l - 26,39 \cdot r \cdot \lambda - 6,26 \cdot r \cdot c + 5,01 \cdot l \cdot \lambda + 2,55 \cdot l \cdot c + 16,59 \cdot \lambda \cdot c. \quad (2)$$

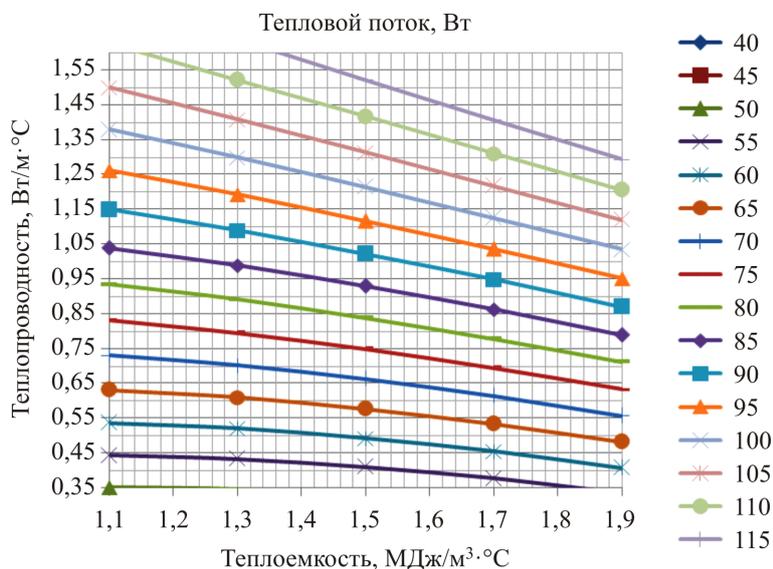


Рис. 2. Номограмма плотности потока в единицу времени  
 Fig. 2. Nomogram of flux density per unit time

Для различных сочетаний длины и радиуса энергоэффективной сваи были построены номограммы зависимости теплового потока от теплоемкости и теплопроводности окружающего массива грунта (рис. 2).

## Заключение

1. По результатам эксперимента можно сделать вывод, что полученная зависимость обладает высоким показателем статистической сходимости с результатами, полученными опытным путем ( $R^2 > 0,92$ ), что показывает возможность дальнейшего исследования данной закономерности и ее применения на практике.

2. Анализ построенных номограмм позволяет сделать вывод, что с изменением теплоемкости грунта величина извлеченной тепловой энергии изменяется незначительно. Наибольшее влияние на эффективность теплообмена грунтового массива с энергоэффективной свайей оказывает коэффициент теплопроводности грунта.

## Библиографический список

1. Amis T., Loveridge F. Energy piles and other thermal foundations for GSHP // *Rehva journal*. – 2014. – P. 32–35.
2. 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.

3. Brandl H. Energy foundation and other thermo-active ground structures // *Geotechnique*. – 2006. – J 56. – P. 81–122.
4. Thermal performance and ground temperature of vertical pile-foundation heat exchangers: A case study / Jun Gao, Xu Zhang, Jun Liu Kui, Shan Li, Jie Yang // *Applied Thermal Engineering*. – 2018. – Vol. 28. – P. 2295–2304. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2008.01.013
5. López-Acosta N.P., Barba-Galdámez D.F., Sánchez M. Numerical analysis of the thermo-mechanical behavior of an energy pile in Mexico // *Springer Series in Geomechanics and Geoen-gineering*. – 2019. – № 217729 (0). – С. 147–154. DOI: 10.1007/978-3-319-99670-7\_19
6. Xu B., Zhang H., Chen Z. Study on heat transfer performance of geothermal pile-foundation heat exchanger with 3-U pipe configuration // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2020. – (147). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119020
7. Ma Q., Wang P. Underground solar energy storage via energy piles // *Applied Energy*. – 2020. – Vol. 261. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.114361
8. Nicholson S.R., Mwesigye A., Dworkin S.B. Modelling and optimization of helical steel piles as in-ground heat exchangers for Ground-Source Heat Pumps // *IOP Conference Series: Ma-terials Science and Engineering*. – 2019. – № 5 (609). DOI: 10.1088/1757-899X/609/5/052026
9. An experimental and numerical case study of passive building cooling with foundation pile heat exchangers in Denmark / S.E. Poulsen, M. Alberdi-Pagola, D. Cerra, A. Magrini // *Energies*. – 2019. – № 14 (12). DOI: 10.3390/en12142698
10. Захаров А.В., Пономарев А.Б., Машенко А.В. Энергоэффективные конструкции в подземном строительстве. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. – 128 с.
11. Assessment of soil thermal conduction using artificial neural network models / Tao Zhang, Cai-jin Wang, Song-yu Liu, Nan Zhang, Tong-wei Zhang // *Cold Regions Science and Technology*. – 2020. – Vol. 169.
12. Bourne-Webba P.J., Bodas Freitas T.M., Freitas Assunção R.M. A review of pile-soil in-teractions in isolated, thermally-activated piles // *Computers and Geotechnics*. – 2019. – Vol. 108. – P. 61–74. DOI: 10.1016/j.compgeo.2018.12.008
13. Brandl H., Adam D., Markiewicz R. Ground-Sourced Energy Wells for Heating and Cooling of Buildings // *Acta Geotechnica Slovenica*. – 2006. – Vol. 3, iss. 1. – P. 5–27.
14. A novel energy pile: The thermo-syphon helical pile / Jie Huang, John S. Mc Cartney, Howard Perko, Drew Johnson, Chao Zheng, Qingwen Yang // *Applied Thermal Engineering*, – 2019. – Vol. 159. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.113882
15. Johansen O. *Thermal Conductivity of Soils*. – Trondheim, Norway, 1977.
16. Белоокая Н.В., Пивоварова Е.И. Обзор альтернативных источников энергии. Гео-термальная энергия // *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. – 2015. – № 1 (12). – С. 67–72.
17. Thermomechanical properties of an energy micro pile – raft foundation in silty clay / Gang-qiang Kong, Te Cao, Yao-hu Hao, Yang Zhou, Lian-wei Ren // *Underground Space*. – October 2019. DOI: 10.1016/j.undsp.2019.09.005
18. Архангельская Т.А., Лукьященко К.И. Современные подходы к расчетной оценке те-пловых свойств почв // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – 2009. – № 1 (7). – С. 1408–1412.
19. Чудновский А.Ф. *Теплофизика почв*. – М.: Наука, 1976. – 352 с.
20. Васильев Г.П. *Теплохладоснабжение зданий и сооружений с использованием низ-копотенциальной тепловой энергии поверхностных слоев Земли*. – М.: Москва, 2006. – 186 с.

21. Королев В.А. Термодинамика грунтов: учеб. пособие. – М.: Изд-во МГУ, 1997. – 168 с.
22. Королев В.А. Принципы термодинамики в инженерной геологии // Основные проблемы геологии: материалы школы-семинара. – М., 1982. – С. 15–24.
23. Филипов Т.В. Рекомендации по применению методов математического планирования эксперимента в технологии бетона. – М.: Отдел науч.-техн. информ. НИИЖБ, 1982. – С. 53.
24. Математические методы и планирование эксперимента в грунтоведении и инженерной геологии: учеб. пособие / В.М. Кнатько [и др.]. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1988. – С. 112.
25. Овчинников Н.М., Захаров А.В. Исследование влияния климатических параметров окружающей среды на работу энергоэффективной сваи // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2019. – С. 312–317.

## References

1. Amis T., Loveridge F. Energy piles and other thermal foundations for GSHP. *Rehva journal*, 2014, 32-35 pp.
2. Zakharov A.V. Primenenie geotermal'noi energii grunta dlia otopleniia zdaniy v klimaticheskikh i inzhenerno-geologicheskikh usloviakh Permskogo kraia. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*, 2010, no. 2(23), pp. 85–89 pp.
3. Brandl H. Energy foundation and other thermo-active ground structures. *Geotechnique*, 2006, iss. 56, pp. 81-122.
4. Jun Gao, Xu Zhang, Jun Liu Kui, Shan Li, Jie Yang. Thermal performance and ground temperature of vertical pile-foundation heat exchangers: A case study. *Applied Thermal Engineering*, 2018, vol. 28, pp. 2295-2304. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2008.01.013.
5. López-Acosta N.P., Barba-Galdámez D.F., Sánchez M. Numerical analysis of the thermo-mechanical behavior of an energy pile in Mexico. *Springer Series in Geomechanics and Geoengeering*, 2019, no. 217729(0), pp. 147–154. DOI:10.1007/978-3-319-99670-7\_19.
6. Xu B., Zhang H., Chen Z. Study on heat transfer performance of geothermal pile-foundation heat exchanger with 3-U pipe configuration. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, (147). DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119020.
7. Ma Q., Wang P. Underground solar energy storage via energy piles. *Applied Energy*, 2020, (261). DOI:10.1016/j.apenergy.2019.114361.
8. Nicholson S.R., Mwesigye A., Dworkin S.B. Modelling and optimization of helical steel piles as in-ground heat exchangers for Ground-Source Heat Pumps. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, no. 5(609). DOI:10.1088/1757-899X/609/5/052026.
9. Poulsen S.E., Alberdi-Pagola M., Cerra D., Magrini A. An experimental and numerical case study of passive building cooling with foundation pile heat exchangers in Denmark. *Energies*, 2019, № 14(12). DOI:10.3390/en12142698.
10. Zakharov A.V., Ponomarev A.B., Mashchenko A.V. Energoeffektivnye konstruksii v podzemnom stroitel'stve [Energy efficient structures in underground construction]. Perm, Permskii natsionalnyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2012, 128 p.
11. Tao Zhang, Cai-jin Wang, Song-yu Liu, Nan Zhang, Tong-wei Zhang. Assessment of soil thermal conduction using artificial neural network models. *Cold Regions Science and Technology*, 2020, vol. 169.
12. Bourne-Webba P.J., Bodas Freitas T.M., Freitas R.M. Assunção. A review of pile-soil interactions in isolated, thermally-activated piles. *Computers and Geotechnics*, 2019, vol. 108, pp. 61-74. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2018.12.008>.

13. Brandl H., Adam D., Markiewicz R. Ground-Sourced Energy Wells for Heating and Cooling of Buildings. *Acta Geotechnica Slovenica*, 2006, vol. 3, no. 1, pp. 5-27.
14. Jie Huang, John S. Mc Cartney, Howard Perko, Drew Johnson, Chao Zheng, Qingwen Yang. A novel energy pile: The thermo-syphon helical pile. *Applied Thermal Engineering*, 2019, vol.159. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113882>.
15. Johansen O. Thermal Conductivity of Soils. Trondheim, Norway, 1977.
16. Belookaia N.V., Pivovarova E.I. Obzor al'ternativnykh istochnikov energii. Geotermal'naiia energiia [Overview of alternative energy sources. Geothermal energy]. *Izvestiia vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'*, 2015, no. 1(12), pp. 67-72.
17. Gang-qiang Kong, Te Cao, Yao-hu Hao, Yang Zhou, Lian-wei Ren. Thermomechanical properties of an energy micro pile – raft foundation in silty clay. *Underground Space*, October 2019. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2019.09.005>.
18. Arkhangel'skaia T.A., Luk'iashchenko K.I. Sovremennye podkhody k raschetnoi otsenke teplovykh svoistv pochv [Modern approaches to the calculation of thermal properties of soils]. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2009, no. 1(7), pp. 1408–1412.
19. Chudnovskii A.F. Teplofizika pochv [Thermophysics of soils]. Moscow, Nauka, 1976, 352 p.
20. Vasil'ev G.P. Teplokhladosnabzhenie zdaniy i sooruzhenii s ispol'zovaniem nizkopotentsial'noi teplovoi energii poverkhnostnykh sloev Zemli [Heat and cold supply of buildings and structures using low-potential heat energy of the surface layers of the Earth]. Moscow, Moskva, 2006. 186 p.
21. Korolev V.A. Termodinamika gruntov [Thermodynamics of soils]. Moscow, MGU, 1997, 168 p.
22. Korolev V.A. Printsipy termodinamiki v inzhenernoi geologii [Principles of thermodynamics in engineering geology]. *Materialy shkoly-seminara: osnovnye problemy geologii*. Moscow, 1982, pp. 15-24.
23. Filipov T.V. Rekomendatsii po primeneniuiu metodov matematicheskogo planirovaniia eksperimenta v tekhnologii betona [Recommendations on the application of methods of mathematical design of the experiment in concrete technology]. Moscow, Otdel nauch.-tekhn. inform. NIIZhB, 1982, pp.53.
24. Knat'ko V.M. et al. Matematicheskie metody i planirovanie eksperimenta v gruntovedenii i inzhenernoi geologii [Mathematical methods and experimental design in soil science and engineering geology]. Leningrad, Leningradskii universitet, 1988, 112 p.
25. Ovchinnikov N.M., Zakharov A.V. Icsledovanie vliianiia klimaticheskikh parametrov okruzhaiushchei sredy na rabotu energoeffektivnoi svai [Investigation of the influence of climatic environmental parameters on the operation of energy-efficient piles]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Modernizatsiia i nauchnye issledovaniia v transportnom komplekse»*, 2019, pp. 312-317.