**ВЕСТНИК ПНИПУ.
СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
Т. 8, № 4, 2017
PNRPU BULLETIN.
CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE**
<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9826/2017.4.09

УДК 624.138.9

ОЦЕНКА ВЗАИМОВЛИЯНИЯ РАБОТЫ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ СВАЙ

А.В. Захаров, И.Д. Бакиева

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 05 июля 2017
Принята: 21 августа 2017
Опубликована: 15 декабря 2017

Ключевые слова:

энергоэффективные фундаменты,
энергоэффективные сваи, низко-
потенциальная энергия грунта,
взаимное влияние

АННОТАЦИЯ

Приведены результаты исследования взаимного влияния работы двух энергоэффективных свай в качестве грунтовых теплообменников. Энергоэффективные сваи, в отличие от других видов энергоэффективных фундаментов, работают как отдельные теплообменники в составе единого фундамента, оказывая влияние друг на друга. Данный факт необходимо учитывать при расчете работы свай в составе энергоэффективного свайного фундамента.

При проведении исследования оценивались величина снижения плотности теплового потока через поверхность, константа свай с грунтом при их работе в качестве грунтовых теплообменников. Исследование проводилось путем серии численных расчетов. Основными факторами, варьируемыми при их выполнении, принимались диаметр свай и расстояние между ними.

Численные расчеты выполнялись в модуле TEMP программного комплекса GeoStudio. Для их проведения была создана численная модель, были определены ее геометрические размеры, начальные и граничные условия, минимально необходимая продолжительная численного моделирования. Начальные и граничные условия моделирования были приняты для климатических условий и температурного режима грунтов г. Перми. Исследования проводились при работе энергоэффективных свай в глинистом грунте.

Результаты численного моделирования обрабатывались методами математической статистики. В результате были получены зависимость теплового потока через поверхность, константа свай с грунтом при их работе в качестве грунтовых теплообменников от диаметра свай и расстояние между ними. Графически зависимость представлена в виде номограммы.

Анализ полученной зависимости позволил сделать следующие выводы: величина падения плотности теплового потока уменьшается при увеличении расстояния между сваями; величина падения плотности теплового потока увеличивается: при малых расстояниях между сваями – с уменьшением диаметра свай, при больших – с его увеличением.

© ПНИПУ

© Захаров Александр Викторович – кандидат технических наук, доцент, e-mail: spstf@pstu.ru.
Бакиева Ильмира Дамировна – магистрант, e-mail: spstf@pstu.ru.

Aleksandr V. Zakharov – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: aspirant123@mail.ru.
Il'mira D. Bakieva – Master Student, e-mail: spstf@pstu.ru.

ASSESSMENT OF THE MUTUAL INFLUENCE OF ENERGY PILES

A.V. Zakharov, I.D. Bakieva

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 05 July 2017
Accepted: 21 August 2017
Published: 15 December 2017

Keywords:

Energy foundations, energy piles,
low-potential ground energy, mutual
influence

ABSTRACT

The article presents the results of a study of the mutual influence of the work of two energy-efficient piles as ground heat exchangers. Energy-efficient piles differ from other types of energy-efficient foundations that work as separate heat exchangers as part of a single foundation, influencing each other. This fact should be taken into account when calculating the work of piles as part of an energy efficient pile foundation.

In the course of the study, the value of the decrease in the heat flux density through the surface of the constant piles with soil was estimated when operating as ground heat exchangers. The study was carried out by performing a series of numerical calculations. The main factors that were varied during the calculations were the diameter of the piles and the distance between them.

Numerical calculations were carried out in the TEMP module of the GeoStudio software package. A numerical model has been created to carry out the calculations: the geometric dimensions of the model, the initial and boundary conditions, the minimum necessary for a long numerical simulation have been determined. The initial and boundary conditions for modeling were adopted for the climatic conditions and temperature conditions of the Perm soil. The studies were carried out during the operation of energy-efficient piles in clay soil.

The results of numerical simulation were processed using mathematical statistics. As a result, the dependence of the heat flux through the surface of the constant piles with the soil is obtained when they work as ground heat exchangers from the diameter of the piles and the distance between them. Graphically, the dependence is presented as a nomogram.

An analysis of the obtained dependence made it possible to draw the following conclusions: the magnitude of the drop in the density of the heat flux decreases with increasing distance between the piles; The magnitude of the drop in the density of the heat flux increases: at small distances between the piles, with a decrease in the diameter of the piles, at large – with increasing.

© PNRPU

В последние годы проблема энергосбережения становится для Российской Федерации стратегическим направлением развития. Одним из путей повышения энергоэффективности зданий является использование возобновляемых источников энергии: ветра, воды, солнца и грунта [1–3].

В зарубежной практике нашли широкое применение энергоэффективные конструкции фундаментов «двойного» назначения [3–7]. В России же подобные конструкции пока не получили широкого применения.

Энергоэффективность фундаментов «двойного» назначения объясняется тем, что, кроме основной функции фундаментов – передачи полезной нагрузки на грунтовое основание, за счет своей развитой контактной поверхности они позволяют использовать геотермальную энергию окружающего грунтового массива. При помощи теплового насоса полученная энергия передается в системы отопления и кондиционирования зданий в период их эксплуатации [8–11].

В качестве энергоэффективных конструкций применяются свайный, плитный фундаменты, «стена в грунте»; известны примеры выполнения отделки стен метрополитена с функцией грунтового теплообменника [2, 10].

Отличительной особенностью энергоэффективной сваи является то, что каждая свая в составе свайного фундамента выступает в качестве отдельного грунтового теплообменника, в то время как остальные виды энергоэффективных конструкций работают как единый грунтовый теплообменник [12].

Таким образом, при расчете энергоэффективных свай, в отличие от других видов энергоэффективных конструкций, возникает необходимость учитывать их взаимное влияние.

Для качественной оценки взаимного влияния работы энергоэффективных свай в составе фундамента проведено исследование путем решения серии численных задач. Его целью являлось нахождение зависимости величины падения плотности теплового потока через поверхность контакта сваи с грунтом Δq (в %) при работе двух энергоэффективных свай от их диаметра d и расстояния между ними S .

При планировании были приняты следующие границы основных факторов:

- диаметр сваи $d = 0,3\text{--}1,2$ м;
- расстояние между сваями $S = 1\text{--}11$ м.

Для исследования были применены многофакторные планы. Предполагалось, что искомая зависимость имеет вид полного квадратичного уравнения регрессии:

$$y_i = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i \neq j} b_{ij} x_i x_j.$$

При двух факторах уравнение регрессии принимает вид

$$y_i = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{12} x_1 x_2.$$

Приняты три уровня варьирования основных факторов. Всего решено 11 численных задач.

Для проведения численного эксперимента использовался программный комплекс GeoStudio, предназначенный для геотехнических задач и моделирования работы фундаментов и грунтовых конструкций. Численные эксперименты проводились в модуле TEMP/W программного комплекса GeoStudio.

До выполнения серии расчетов в программном комплексе была создана численная модель работы энергоэффективной сваи, были определены начальные и граничные условия, временные параметры, теплофизические характеристики грунтов модели.

В качестве начальных условий задавалась температура грунтового массива (начальная температура принята 6°C согласно проводимым исследованиям в г. Перми [13]).

Граничные условия принимались [13] следующие:

- температура боковых границ модели равна 6°C (начальной температуре массива);
- температура поверхности сваи в виде функции с переменной температурой: $+1^\circ\text{C}$ – моделировался отбор тепловой энергии свай; $+10^\circ\text{C}$ – моделировался сброс тепловой энергии в грунт свай.

Геометрические параметры расчетной модели:

- контур региона грунта 50×50 м;
- диаметр свай $d = 1,2$ м.

Модель строилась для сваи с максимальным рассматриваемым в исследовании диаметром. Вид расчетной модели приведен на рис. 1.

Были определены временные параметры численной модели:

- продолжительность работы свай по отбору тепла в год – 220 дней (продолжительность отопительного периода для г. Перми);
- общая продолжительность моделирования – 10 лет.

В Пермском крае продолжительность отопительного периода принята 220 дней, следовательно, в течение этого времени моделируется отбор тепловой энергии грунта. В следующие 145 дней грунтовый массив восстанавливает температурный баланс. Для моделирования задача делилась на отдельные промежутки времени. Временные интервалы численной модели приведены на рис. 2.

Рис. 1. Вид расчетной модели
Fig. 1. Calculation model

Рис. 2. Временные интервалы численной модели
Fig. 2. Time intervals of the numerical model

В качестве грунта модели принята глина со следующими характеристиками [14, 15]:

- объемная теплоемкость грунта в талом состоянии $C_{\text{тал}} = 2400 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$;
- объемная теплоемкость грунта в мерзлом состоянии $C_{\text{мерзл}} = 1639,40 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$;
- теплопроводность талого грунта $\lambda_{\text{тал}} = 1,21 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$;
- теплопроводность талого грунта $\lambda_{\text{мерзл}} = 1,90 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$;
- объемная влажность грунта $\omega = 0,34 \text{ д.е.} = 34 \%$.

Указанные выше параметры численной модели были определены путем решения ряда тестовых задач для оценки достаточности назначенных временных и геометрических параметров. Созданная численная модель использовалась для проведения серии численных экспериментов. При этом при работе двух свай ширина численной модели увеличивалась не менее чем на расстояние между сваями.

С учетом подобранных геометрических и временных параметров численной модели проводилась серия численных экспериментов по оценке взаимовлияния работы двух энергоэффективных свай на основании ранее составленной матрицы планирования.

В качестве примера на рис. 3 приведена расчетная схема задачи для свай диаметром 1,2 м и расстоянием между ними 6 м.

Рис. 3. Расчетная схема модели для свай диаметром 1,2 м
и расстоянием между ними 6 м

Fig. 3. The design scheme of the model for piles with a diameter of 1.2 m
and a distance between them is 6 m

Пример визуализации работы двух энергоэффективных свай по отбору тепла из грунтового массива на последний (10-й) год моделирования для свай диаметром 1,2 м и с расстоянием между ними 6 м приведен на рис. 4. Цветом показаны области с одинаковой температурой, а стрелками – направление теплового потока.

Обработка результатов была проведена методами математической статистики. Получено уравнение регрессии зависимости величины падения плотности теплового потока от диаметра свай и расстояния между ними:

$$\Delta q = 36,9574 - 4,1166d - 5,3561S - 1,5229d^2 + 0,20264S^2.$$

На основе полученного уравнения регрессии построена номограмма зависимости величины падения плотности теплового потока от диаметра свай и расстояния между ними (рис. 5).

Рис. 4. Визуализация работы двух энергоэффективных свай диаметром 1,2 м и с расстоянием между ними 6 м по отбору тепла.

Fig. 4. Visualization of the work of two energy piles with a diameter of 1.2 m and a distance between them of 6 m for heat collection

Рис. 5. Номограмма зависимости величины падения плотности теплового потока от диаметра свай и расстояния между ними

Fig. 5. A nomogram of the dependence of the drop in the density of the heat flux on the diameter of the piles and the distance between them

Анализ результатов проведенного исследования показал следующее:

- при работе двух энергоэффективных свай величина плотности теплового потока через поверхность контакта свай с грунтом зависит от их диаметра и расстояния между ними;
- величина падения плотности теплового потока уменьшается при увеличении расстояния между сваями;
- величина падения плотности теплового потока увеличивается при малых расстояниях между сваями – с уменьшением диаметра свай, при больших – с его увеличением.

Библиографический список

1. Шаповал В.Г., Моркляник Б.В. Температурні поля в ґрунтових основах теплових насосів: монографія. – Дніпропетровськ: Пороги, 2011. – 123 с.
2. Пономарев А.Б., Винников Ю.Л. Подземное строительство: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – 261 с.
3. Hochleistungsenergiepfähle zur Nutzung der Geothermie im Hochhausbau / R. Katzenbach [et al.] // Proceedings of the 6th Austrian Geotechnical Conference, Vienna, 18–19 January 2007. – Vienna, 2007. – P. 511–522.
4. Brandl H. Thermo-active ground-source structures for heating and cooling // Procedia Engineering. – 2013. – Vol. 57. – P. 9–18.
5. Brandl H., Adam D., Markiewicz R. Ground-sourced energy wells for heating and cooling of buildings // Acta Geotechnica Slovenica. – 2006. – Vol. 3, № 1. – P. 5–27.
6. Brandl H. Energy piles and diaphragm walls for heat transfer from and into the ground // Proceeding of the 3h International Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles. – Vienna, Austria, 1998. – P. 38–60.
7. Katzenbach R., Adam D., Waberseck T. Innovationen bei der Nutzung geothermischer Energie durch erdberührte Bauwerke, wie z.B // Pfahlgründung mittels Energiepfählen. Geothermie-Symposium Bremerhaven Erdwärme – Energieträger der Zukunft. – Bremerhaven, 2002.
8. Sanner B., Mands E., Sauer M.K. Larger geothermal heat pump plants in the central region of Germany // Geothermics. – 2003. – № 32. – P. 589–602.
9. Бобров И.А., Захаров А.В. Применение тепловой энергии грунтового основания для отопления и кондиционирования зданий // Вестник Перм. гос. техн. ун-та. Строительство и архитектура. – 2011. – № 1. – С. 10–14.
10. Захаров А.В., Пономарев А.Б., Машенко А.В. Энергоэффективные конструкции в подземном строительстве: учеб. пособие для вузов. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. – 127 с.
11. Васильев Г.П. Теплохладоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной тепловой энергии поверхностных слоев земли: моногр. – М.: Граница, 2006. – 176 с.
12. Dupray F., Laloui L., Kazangba A. Numerical analysis of seasonal heat storage in an energy pile foundation // Computers and Geotechnics. – 2014. – Vol. 55. – P. 67–77.
13. Захаров А.В., Пономарев А.Б. Мониторинг температурных полей грунтов г. Перми // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2015. – № 4. – С. 103–112. DOI: 10.15593/2224-9826/2015.4.08

14. 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., посвящ. 50-летию БашНИИСтроя: в 3 т. – Уфа, 2006. – Т. 2. – С. 119–124.

15. Захаров А.В., Пономарев А.Б. Анализ взаимодействия энергетических фундаментов в геологических и климатических условиях г. Перми // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2011. – Вып. 4. – С. 24–33.

References

1. Shapoval V.G., Morklianik B.V. Temperaturnye polia v gruntovykh osnovaniikh teplovykh nasosov [The temperature field in the ground basis heat pump]. Dnepropetrovsk, Porogi, 2011, 123 p.

2. Ponomarev A.B., Vinnikov Iu.L. Podzemnoe stroitel'stvo [Underground construction]. Perm, Permskii natsionalnyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2014, 261 p.

3. Katzenbach R. et al. 2007. Hochleistungsenergiepfähle zur Nutzung der Geothermie im Hochhausbau. *Proceedings of the 6th Austrian Geotechnical Conference*, 18–19 January, Vienna, 2007, pp. 511–522.

4. Brandl H. Thermo-active ground-source structures for heating and cooling. *Procedia Engineering*, 2013, vol. 57, pp. 9–18.

5. 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.

6. H. Brandl Energy piles and diaphragm walls for heat transfer from and into the ground // *Proceedings of the 3th International Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles*. Vienna, Austria, 1998, pp. 38–60.

7. Katzenbach R., Adam D., Waberseck T. Innovationen bei der Nutzung geothermischer Energie durch erdberührte Bauwerke, wie z.B. *Pfahlgründung mittels Energiepfählen*. *Geothermie-Symposium Bremerhaven Erdwärme – Energieträger der Zukunft*. Bremerhaven, 2002.

8. Sanner B., Mands E., Sauer M.K. Larger geothermal heat pump plants in the central region of Germany. *Geothermics*, 2003, no. 32, pp. 589–602.

9. Bobrov I.A., Zakharov A.V. Primenenie teplovoi energii gruntovogo osnovaniia dlia otopeniia i konditsionirovaniia zdaniia [The application of thermal energy subgrade for heating and air conditioning of buildings]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2011, no. 1, pp. 10–14.

10. Zakharov A.V., Ponomarev A.B., Mashchenko A.V. Energoeffektivnye konstruksii v podzemnom stroitel'stve [Power efficient structure in underground construction]. Perm, Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2012, 127 p.

11. Vasil'ev G.P. Teplokhladostabzhenie zdaniia i sooruzhenii s ispol'zovaniem nizkopotentsial'noi teplovoi energii poverkhnostnykh sloev zemli [Heat supply and cooling of buildings using low-grade thermal energy of the surface layers of the earth]. Moscow, Granitsa, 2006, 176 p.

12. Dupray F., Laloui L., Kazangba A. Numerical analysis of seasonal heat storage in an energy pile foundation. *Computers and Geotechnics*, 2014, vol. 55, pp. 67–77.

13. Zakharov A.V., Ponomarev A.B. Monitoring temperaturnykh polei gruntov g. Permi [Monitoring soil temperature fields in Perm]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2015, no. 4, pp. 103-112. DOI: 10.15593/2224-9826/2015.4.08.

14. Ponomarev A.B., Kaloshina S.V. Ob inzhenerno-geologicheskikh usloviakh stroitel'stva g. Permi [On the engineering-geological conditions of construction Perm]. *Proceedings of the International Scientific and Technical Conference. Problemy mekhaniki gruntov i fundamentostroeniia v slozhnykh gruntovykh usloviakh*. Ufa, 2006, vol. 2, pp. 119-124.

15. Zakharov A.V., Ponomarev A.B. Analiz vzaimodeistviia energeticheskikh fundamentov v geologicheskikh i klimaticheskikh usloviakh g. Permi [The analysis of the interaction of energy foundations in geological and climatic conditions Perm]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. prikladnaia ekologiya. Urbanistika*, 2011, no. 4, pp. 24-33.