

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь,
Россия

Решение тестовых задач для проведения численного эксперимента оценки взаимовлияния работы двух энергоэффективных свай

В данной статье приведены исследования зависимости взаимовлияния работы двух энергоэффективных свай при отборе низкопотенциального тепла грунтового массива от расстояния между сваями и их геометрических параметров.

В статье представлены результаты планирования численного эксперимента. Выбран план, определены основные факторы, количество уровней и границы варьирования. С целью получения искомой зависимости составлена матрица планирования эксперимента. Планируется проведение двухфакторного трехуровневого численного эксперимента.

В качестве входных параметров численного эксперимента приняты радиус свай и расстояние между ними. В качестве выходного параметра - средняя величина плотности теплового потока через поверхность контакта свай с грунтом за отопительный период.

Численный эксперимент планируется проводить в программном комплексе GeoStudio. Климатические, геологические, временные параметры (продолжительность отопительного периода) принимались для условий Пермского края. В статье приведены основные положения по моделированию в программном комплексе GeoStudio модуль TEMP.

Для подбора временных и геометрических параметров численного моделирования приведено решение тестовой задачи. Временные параметры оценивались по результатам сравнения величины плотности теплового потока за отопительный период на протяжении нескольких лет работы энергоэффективной свай. По результатам установлено, что продолжительность моделирования должна составлять не менее 10 лет. Геометрические параметры численной модели подбирались путем оценки изменения температурного режима грунтового массива при работе энергоэффективной свай на протяжении нескольких лет. По результатам установлено, что размер численной модели должен составлять не менее 50x50 м для заданных условий.

Ключевые слова: энергоэффективная свая, грунтовый массив, численный эксперимент, отопительный период, временные параметры, геометрические параметры, численная модель, тестовая задача, матрица планирования.

Bakieva I.D., Zaharov A.V.

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

Solving test problems for carrying out a numerical experiment evaluating the mutual influence of two energy-efficient piles

In this article, studies are given of the relationship between the interference of two energy-efficient piles during the selection of low-potential heat from a soil massif from the distance between piles and their geometric parameters.

The article presents the results of a numerical experiment planning. Selected plan identifies the main factors, the number of levels, and varying boundaries. With the purpose of obtaining the required dependence, the experimental planning matrix is compiled. A two-factor three-level numerical experiment is planned.

As the input parameters of the numerical experiment, the radius of the piles and the distance between them are assumed. As an output parameter – the average value of the heat flux density through the contact surface of piles with soil during the heating period.

A numerical experiment is planned to be carried out in the GeoStudio software package. Climatic, geological, time parameters (duration of the heating season) were taken for the conditions of the Perm region. In the article the basic positions on modeling in a program complex GeoStudio module TEMP/W are resulted.

For the selection of time and geometric parameters of numerical simulation, the solution of the test problem is given. Time parameters were evaluated by comparing the magnitude of the heat flux during the heating season for a number of years of energy-efficient pile. According to the results it found that the duration of the simulation must be at least 10 years. Geometric parameters of the numerical model were selected by estimating the change in the

temperature regime of the soil massif during the operation of an energy efficient pile for several years. According to the results it is established that the size of the numerical model should be at least 50x50 m for the given conditions.

Keywords: energy efficient pile, soil massif, numerical experiment, heating period, time parameters, geometric parameters, numerical model, test problem, planning matrix.

В настоящее время ведутся исследования зависимости количества тепла, получаемого от энергоэффективных свай от расстояния между сваями и их геометрических характеристик.

Исследования зависимости планируется выполнять методами численного моделирования. Для постановки серии численных экспериментов была составлена матрица планирования экспериментов.

При планировании решения данной задачи были определены основные факторы: диаметр сваи и расстояние между сваями.

Диаметр сваи принят в границах от 0,3 до 1,2 м, исходя из технологических параметров оборудования для устройства свай. Расстояние обусловлено нормативными значениями минимального и максимального расстояния между сваями и принято в диапазоне 3-6 диаметров.

Предполагается, что искомая зависимость имеет вид полного квадратичного уравнения регрессии [2]:

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

Так как для исследования были применены многофакторные планы, то уравнение регрессии при двух факторах принимает вид [2]:

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

Принято три уровня варьирования основных двух факторов.

Таблица 1

Уровни варьирования основных факторов

Тип фундаментов	Основной фактор		Уровни варьирования			Интервал варьирования
	Натуральный вид	Кодированный вид	-1	0	+1	
1	2	3	4	5	6	7
Энергоэффективные фундаменты	Расстояние между сваями (S)	x_1	3d	4,5d	6d	1,5
	Диаметр сваи (d), м	x_2	0,3	0,75	1,2	0,45

Основываясь на количестве выделенных основных факторов и уровней их варьирования, по [2] было принято количество звездных и нулевых точек, выявлено звездное плечо, а также принято общее количество опытов (13). В итоге построена матрица проведения численного эксперимента, как для двухфакторного трехуровневого плана.

Таблица 2

Матрица проведения эксперимента для энергоэффективных свай

№ опыта (точка)	Фактор	Выходной параметр
--------------------	--------	-------------------

плана)	x_1	x_2	Y_1
1	2	3	4
1	-1	-1	y_1
2	+1	-1	y_2
3	-1	+1	y_3
4	+1	+1	y_4
5	-1,414	0	y_5
6	1,414	0	y_6
7	0	-1,414	y_7
8	0	1,414	y_8
9	0	0	y_9
10	0	0	y_{10}
11	0	0	y_{11}
12	0	0	y_{12}
13	0	0	y_{13}

Каждая строка данной матрицы – численный эксперимент, в результате которого будет определена величина получаемой тепловой энергии от энергоэффективной сваи. Для проведения численного эксперимента использован программный комплекс для инженерно-геологических задач и моделирования грунтовых конструкций GeoStudio.

Программный пакет GeoStudio позволяет построить модель, установить начальные характеристики, смоделировать сложные временные последовательности, выполнить анализ, объединить несколько анализов с использованием различных модулей программного пакета в один проект моделирования, а также разложить сложную задачу на ряд более мелких и более удобных для анализа.

GeoStudio состоит из восьми программных продуктов (модулей) [6]: SLOPE/W, SEEP/W, SIGMA/W, QUAKE/W, TEMP/W, CTRAN/W, AIR/W, VADOSE/W

Численное моделирование планируется проводить в модуле TEMP/W. Модуль анализирует тепловые изменения в грунте, происходящие из-за строительства зданий, трубопроводов или изменения факторов окружающей среды. Программный продукт включает в себя: геотермальный анализ, проектирование геотехнической, гражданской и горнодобывающей промышленности, инженерные проекты, объекты, которые подверглись замораживанию и оттаиванию [3].

Для постановки численного эксперимента, предварительно решены тестовые задачи в программном модуле TEMP/W.

Основными целями решения тестовых задач были:

- 1) Подбор геометрических размеров численной модели;
- 2) Подбор временных параметров численного моделирования.

Численное моделирование проводилось для глинистые грунтов характерных для левобережной части г.Пермь[1]. Применена тугопластичная глина со следующими физическими и теплофизическими характеристиками [9]:

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

Для каждого ИГЭ в программном комплексе задаются:

- 1) Влажность;

- 2) Теплоемкость в талом и мерзлом состоянии;
 - 3) Функция теплопроводности от температуры;
 - 4) Функция перехода воды в грунте в мерзлом состоянии.
- Пример задания характеристик грунта приведен на рис. 1.

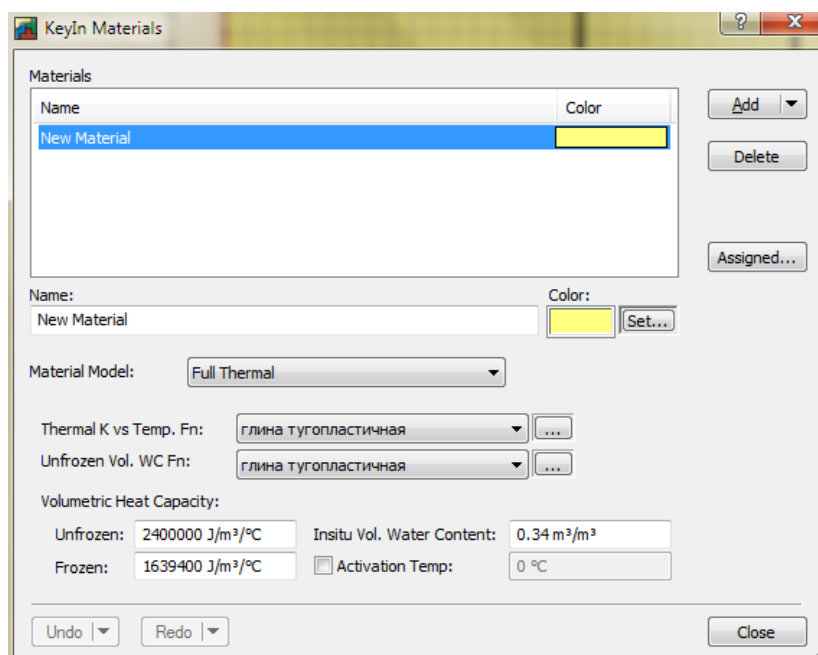


Рис.1. Задание характеристик для расчетного слоя грунта

Теплопроводность грунта задается функцией от температуры. Пример функции приведен на рис. 2. Задаются теплопроводности талого и мерзлого грунта. Функция изменения теплопроводности строится автоматически в зависимости от выбранного типа грунта [8].

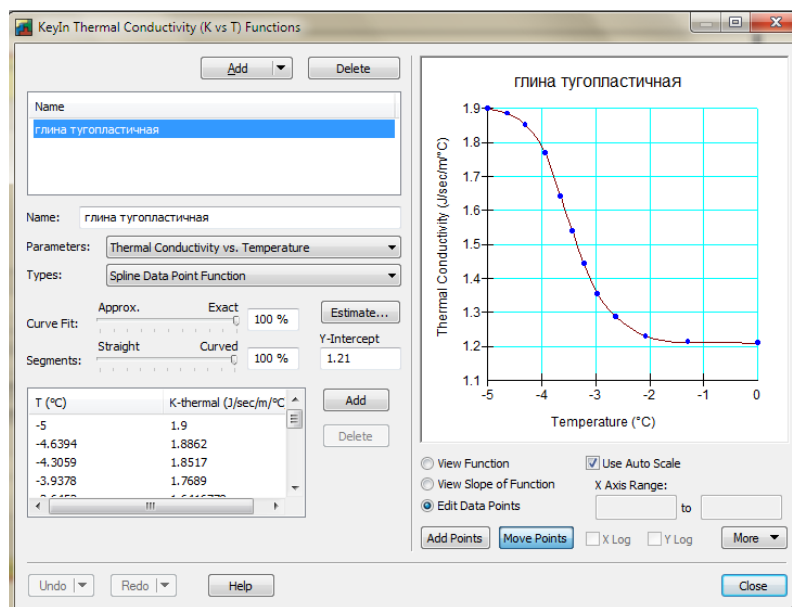


Рис.2. Пример функции теплопроводности грунта от температуры

Для рабочего слоя грунта задается функция перехода воды в грунте в мерзлое состояние [10]. Функция строится автоматически в зависимости от типа грунта. Пример функции приведет на рис. 3.

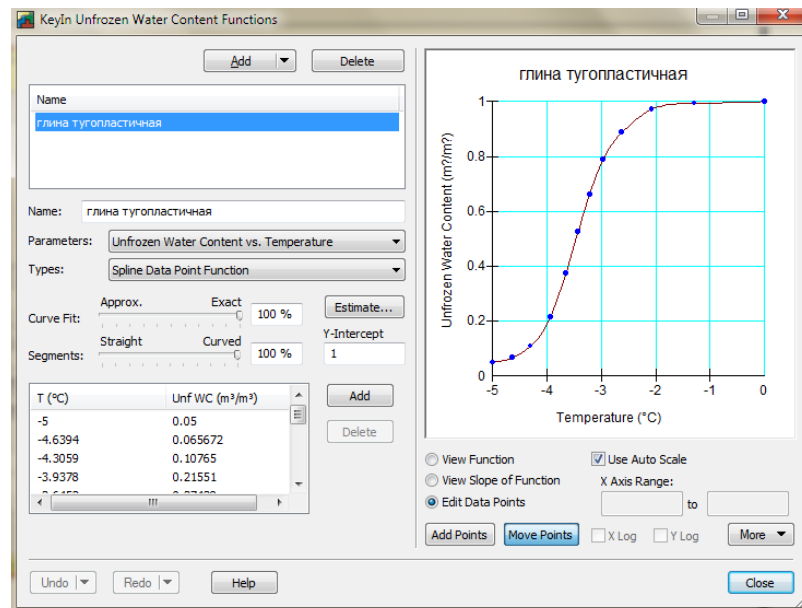


Рис.3. Пример функции содержания незамерзшей воды в грунте

В качестве начальных условий задавалась температура грунтового массива (см. рис. 4) [4]. Начальная температура для г.Перми принята $+6^{\circ}\text{C}$ [5];

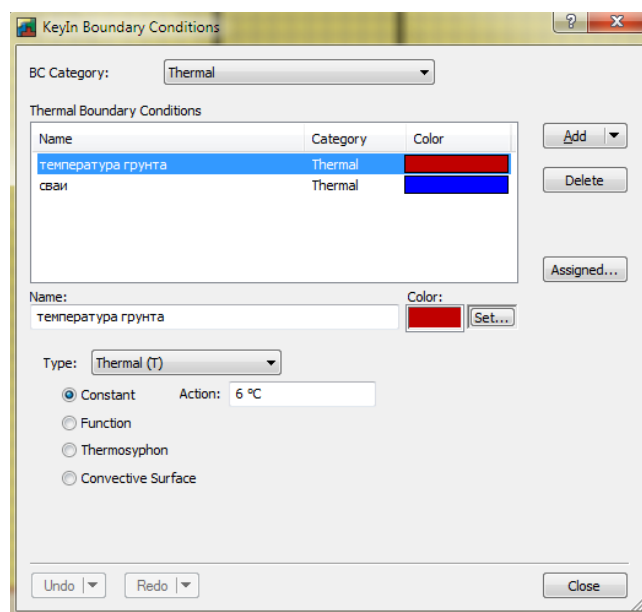


Рис.4.Задание граничных условий

В качестве граничных условий принимались:

- Температура боковых границ модели равна $+6^{\circ}\text{C}$ (начальной температуре массива) [7];
- Температура поверхности свай задавалась 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 (см. рис. 5).

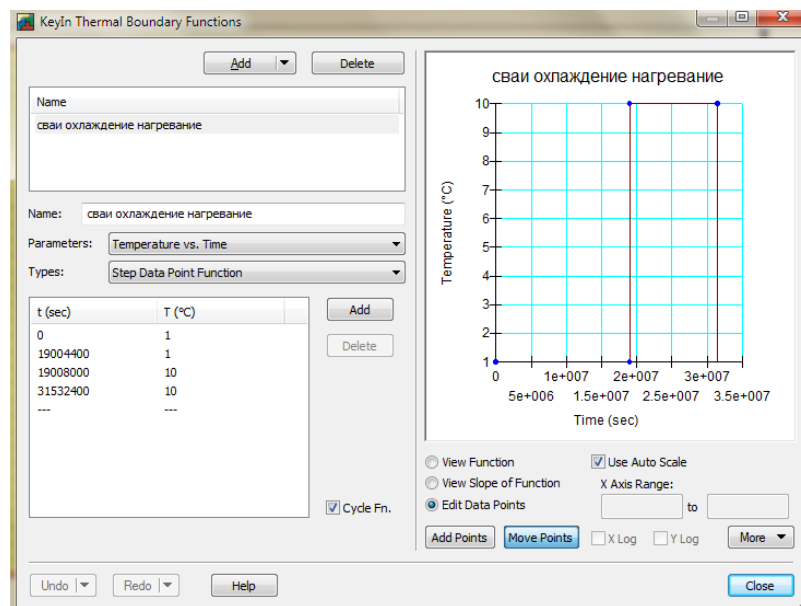


Рис.5. Задание граничных условий температуры поверхности свай в виде функции

Приняты геометрические параметры расчетной модели:

- 1) Размеры численной модели 50х50м;
- 2) Диаметр свай $d=1200\text{мм}$.

Для решения тестовой задачи принят максимальный диаметр свай по максимальному уровню варьирования при планировании эксперимента.

При формировании расчетной схемы тестового эксперимента (см. рис. 6), свай диаметром $d=1200\text{мм}$ приводились к квадратному сечению.

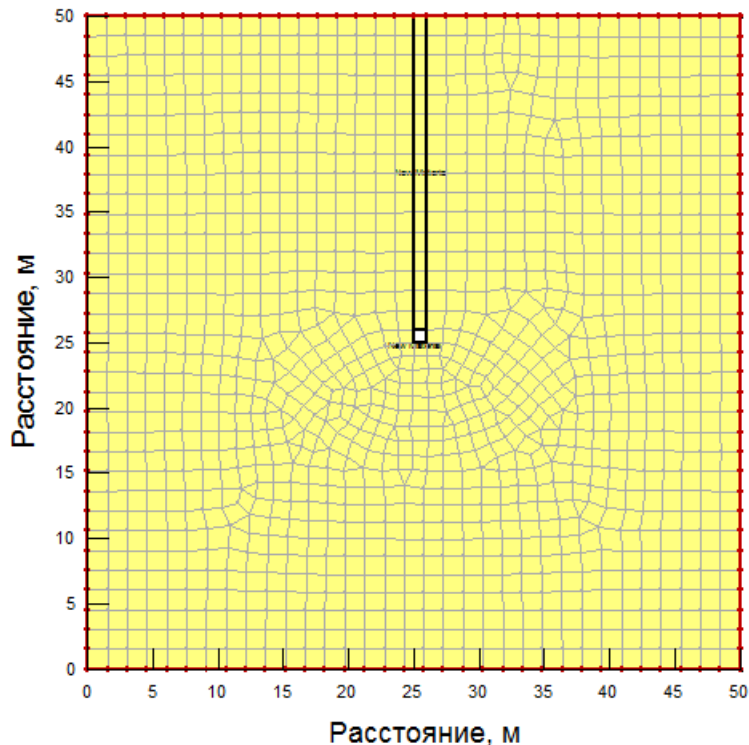


Рис.6. Расчетная схема тестового эксперимента

Изначально приняты следующие временные параметры численной модели тестовой задачи:

- 1) Продолжительность работы свай по отбору тепла в год - 220 дней;
- 2) Общая продолжительность моделирования - 10 лет.

В Пермском крае продолжительность отопительного периода принята 220 дней, следовательно в течение 220 дней моделируется отбор тепловой энергии грунта. В следующие 145 дней, грунтовый массив восстанавливает температурный баланс.

Оценка временного периметра численного моделирования производилась на основе анализа величины средней плотности теплового потока за отопительный период. Полученные плотности потока приведены на графике (рис. 7).

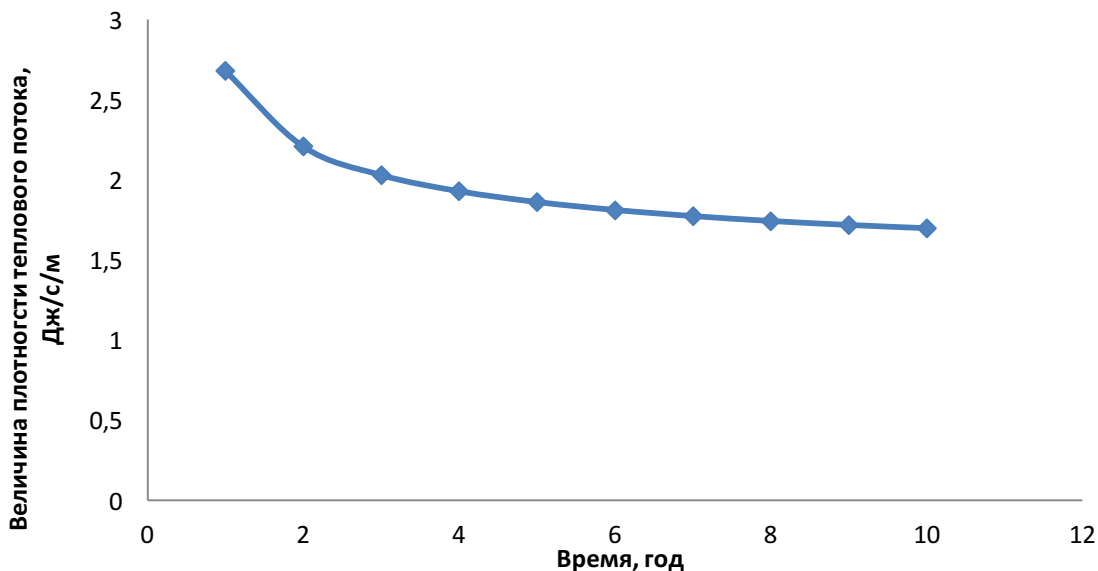


Рис. 7. Средняя плотность теплового потока через поверхность контакта сваи с грунтом

Анализ полученных результатов показал, что величина средней плотности теплового потока с годами уменьшается, причем за последние два года падение плотности потока не более 0,2%.

На основании этого предварительно назначенная продолжительность моделирования в 10 лет принята для выполнения дальнейших численных экспериментов.

Оценки достаточности назначенных геометрических размеров численной модели производились путем анализа изменения температуры грунтового массива. Было выполнено сравнение температуры грунтового массива при работе ЭЭС и без отбора тепла ЭЭС. Результаты сравнения приведены на графике - рис. 8.

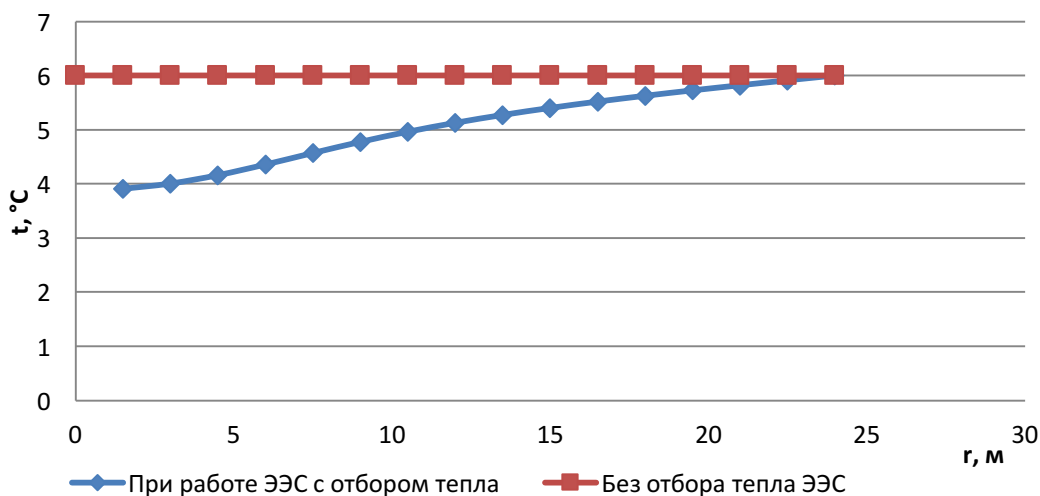


Рис.8. Изменение температуры грунта на расстоянии r от сваи на 10 год моделирования

Анализ приведенного графика показал, что температура грунтового массива у границ численной модели незначительно изменяется (менее 0,1°C) от работы энергоэффективной сваи в течение 10 лет. Таким образом сделан вывод о достаточности предварительно назначенных геометрических размерах модели.

В дальнейшем с учетом подобранных геометрических и временных параметров численной модели планируется провести серию численных экспериментов по оценке взаимовлияния работы двух энергоэффективных свай на основании ранее составленной матрицы планирования.

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. Кнатько В.М., Руднева И.Е. Математические методы и планирование эксперимента в грунтоведении и инженерной геологии. - Издательство ЛГУ, 1983.
3. ORKUSTOFNUN Working Group, Iceland (2001): Sustainable production of geothermal energy - suggested definition. IGA News no. 43. January-March, 2001. 1-2.
4. Sanner B. Ground Heat Sources for Heat Pumps (classification, characteristics, advantages). 2002.
5. Ponomarev A.B., Zaharov A.V. Numerical simulation of the process of geothermal low-potential ground energy extraction in Perm region (Russia)//MATEC Web of Conferences 86, 03008 (2016).
6. Rybach L., Sanner B. Ground-source heat pump systems - the European experience. GeoHeatCenter Bull. 21/1, 2000.
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. Rybach L. Status and prospects of geothermal heat pumps (GHP) in Europe and worldwide; sustainability aspects of GHPs. International course of geothermal heat pumps, 2002.
9. Пономарев А.Б., Захаров А.В. Использование геотермальной энергии для отопления и кондиционирования зданий // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2010. – Вып. 17 (36). – С. 119-122.
10. Васильев, Г. П. Теплохладоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной тепловой энергии поверхностных слоев земли : монография / Г. П. Васильев. М. : Изд. дом «Граница», 2006. - 176 с

References

1. Zaharov A.V., Ponomarev A.B., Mashchenko A.V. Energoehffektivnye konstrukcii v podzemnom stroitel'stve: ucheb. posobie dlya vuzov. -Perm' [Energy-efficient design in civil engineering]: Izd-vo Perm. nac. issled. politekhn. un-ta, 2012. -127 s.
2. Knat'ko V.M. Rudneva I.E. Matematicheski metody I planirovanie eksperimenta v gruntovedenii i inzhenernoy geologii [Mathematical methods and planning experiments in soil science and engineering geology.] - Izd-vo LGU, 1983.
3. ORKUSTOFNUN Working Group, Iceland (2001): Sustainable production of geothermal energy - suggested definition. IGA News no. 43. January-March, 2001. 1-2.
4. Sanner B. Ground Heat Sources for Heat Pumps (classification, characteristics, advantages). 2002.
5. Ponomarev A.B., Zaharov A.V. Numerical simulation of the process of geothermal low-potential ground energy extraction in Perm region (Russia)//MATEC Web of Conferences 86, 03008n (2016).
6. Rybach L., Sanner B. Ground-source heat pump systems - the European experience. GeoHeatCenter Bull. 21/1, 2000.

7. Zaharov A.V. Primenenie geotermal'noj ehnergii grunta dlya otopeniya zdaniy v klimaticheskikh i inzhenerno-geologicheskikh usloviyah Permskogo kraya [The use of geothermal energy for heating buildings soil in climatic and geotechnical conditions of the Perm region.]/Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. -2010. -№ 2 (23). -S. 85-89.

8. Rybach L. Status and prospects of geothermal heat pumps (GHP) in Europe and worldwide; sustainability aspects of GHPs. International course of geothermal heat pumps, 2002.

9. Ponomarev A.B., Zaharov A.V. Ispol'zovanie geotermal'noj ehnergii dlya otopeniya i kondicionirovaniya zdaniy [The use of geothermal energy for heating and cooling buildings.]/Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura. – 2010. – Vyp. 17 (36). – S. 119-122.

10. Vasil'ev, G. P. Teplohlosnabzhenie zdaniy i sooruzhenij s ispol'zovaniem nizkopotencial'noj teplovoj ehnergii poverhnostnykh sloev zemli : monografiya [Heat and cold buildings with low potential thermal energy of the surface layers of the earth: monograph]/ G. P. Vasil'ev. M. : Izd. dom «Granica», 2006. - 176 s

Об авторах

Бакиева Ильмира Дамировна (Пермь, Россия) – магистрант кафедры «Строительное производство и геотехника» ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, 29, e-mail: spstf@pstu.ru)

Захаров Александр Викторович (Пермь, Россия) – доцент кафедры «Строительное производство и геотехника» ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, 29, e-mail: spstf@pstu.ru)

About the authors

Bakieva Il'mira D., (Perm, Russian Federation) – Undergraduate student, Department of Construction Technology and Geotechnics, Perm National Research Polytechnic University (614990, 29, Komsomolsky av., Perm, Russian Federation, e-mail: spstf@pstu.ru).

Zaharov Aleksandr V., (Perm, Russian Federation) – assistant professor, Department of Construction Technology and Geotechnics, Perm National Research Polytechnic University (614990, 29, Komsomolsky av., Perm, Russian Federation, e-mail: spstf@pstu.ru).