

## ГЕОТЕРМАЛЬНАЯ СИСТЕМА ОТОПЛЕНИЯ И ОХЛАЖДЕНИЯ

*Цветкова Г.В., Аль-Наджар М.А., Нагхави Я.*

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург*

**Ключевые слова:** теплопроводность грунта, глубина скважины, радиус трубы.

**Аннотация.** В мире растет спрос на технологии, позволяющие получать энергию из возобновляемых источников. В этой статье излагается возможный подход к продвижению использования источников возобновляемой энергии. Для этого проведены расчеты с использованием экспериментальных данных. Основная цель исследования - снизить стоимость энергии и защитить нашу планету от загрязнений.

## GEOTHERMAL HEATING AND COOLING SYSTEM

*Tsvetkova G.V., Al-Najjar M., Naghawi Y.*

*Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg*

**Keywords:** soil thermal conductivity, well depth, pipe radius.

**Abstract.** There is a growing demand in the world for technologies that make it possible to obtain energy from renewable sources. This article outlines a possible approach to promoting the use of renewable energy sources. For this, calculations were carried out using experimental data. The main goal of the research is to reduce the cost of energy and protect our planet from pollution.

### Введение

Иордания не располагает достаточным количеством собственного ископаемого топлива и полностью зависит от его импорта, для использования в качестве главного источника энергии. Так, например, в 2013 году генерация энергии за счет собственных источников составляла только 3% от потребленной энергии [1]. При сжигании топлива, такого, как дизельное, керосин, природный газ, выделяются газы, оказывающие негативное влияние на окружающую среду, вызывающие разрушение озонового слоя. В настоящее время в стране проводятся исследования для того чтобы подтвердить эффективность использования геотермальной энергии для обогрева и охлаждения зданий вместо традиционных источников энергии.

Цели исследовательской работы заключались в поиске путей снижения затрат на электроэнергию и защиты планеты за счет использования вертикальной геотермальной системы для обогрева и охлаждения здания.

Для достижения поставленной цели, были сформулированы следующие задачи:

- анализ путей уменьшения энергетических затрат и загрязнения окружающей среды;
- расчет тепловой и охлаждающей нагрузок;
- расчет контура заземления;
- энергетический анализ;
- стоимость грунтовых тепловых насосов;
- стоимость тепловых насосов с воздушным источником.

Использованные методы и программы:

- уравнение Кавано и Рафферти [2, 3];
- программы EXCEL и NAR.

### Объект исследований и общая схема геотермальной системы обогрева и охлаждения

Объект исследований – многоцелевое двухэтажное здание площадью 860 м<sup>2</sup>. Главные части геотермальной системы для обогрева и охлаждения здания схематично представлены на рисунке 1. Геотермальная система воздушного кондиционирования имеет два или три основных компонента:

- компонент, связанный с землей (также известный, как коллектор);
- нагрузка, в данном случае, здание, которое должно быть обогрето или охлаждено;
- и, обычно, рефрижератор.

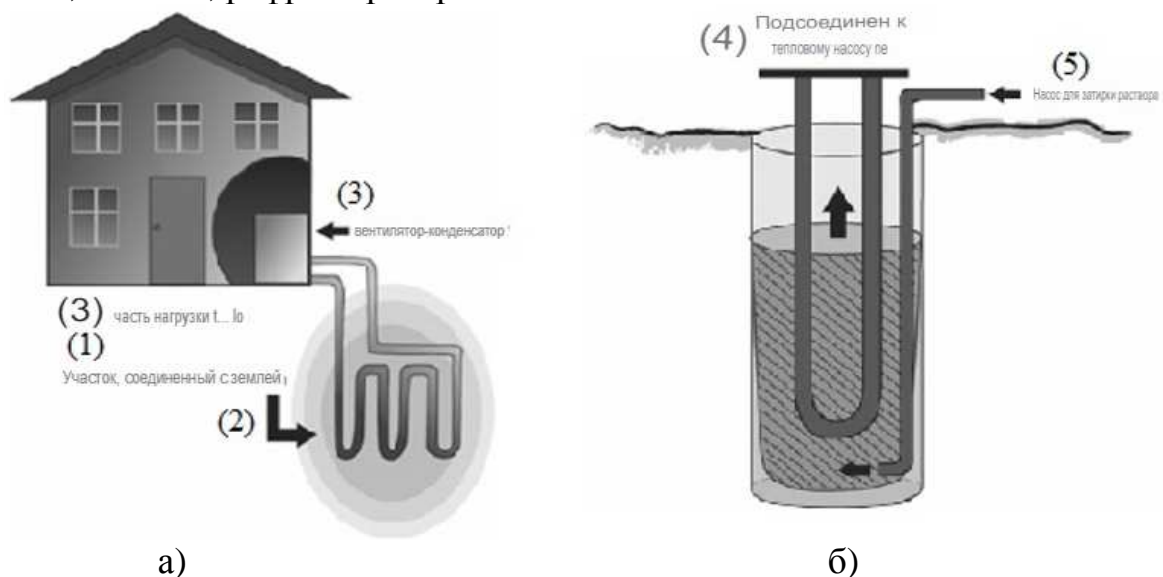


Рис. 1. Общая схема частей системы (а), схема вертикальной петли (б) [3], где (1) - нагрузка; (2) - оборудование под землей; (3) - вентилятор-конденсатор; (4) - контур теплового насоса; (5) - контур растворонасоса

Проектировщику вертикальных геотермальных систем часто требуется быстро оценить глубину бурения скважины для строения с заданными параметрами. Одним из способов выполнения этого расчета является использование уравнения, предложенного Кавано и Рафферти и приведенного в руководстве ASHRAE [4]:

$$L = \frac{q_h R_b + q_y R_{10y} + q_m R_{1m} + q_h R_{6h}}{T_m - (T_g + T_p)}, \quad (1)$$

где  $L$  – длина скважины;

$T_m$  – средняя температура жидкости в скважине;

$T_g$  – температура ненарушенного грунта;

$T_p$  – температурная поправка, представляющая собой коррекцию температуры ненарушенного грунта, учитывающую тепловое взаимодействие между скважинами;

$q_h$  – пиковая часовая тепловая нагрузка на грунт;

$R_b$  – эффективное тепловое сопротивление скважины;

$q_y$  – среднегодовая тепловая нагрузка на грунт;

$R_{10y}$  – эффективное тепловое сопротивление грунта, рассчитываемое за 10 лет;

$q_m$  – наибольшая ежемесячная тепловая нагрузка на грунт;

$R_{1m}$  – эффективное тепловое сопротивление грунта, соответствующее одному месяцу;

$R_{6h}$  – эффективное тепловое сопротивление грунта, соответствующее шести часам.

### Корреляции для $R_{6h}$ , $R_{1m}$ и $R_{10y}$

Эффективное тепловое сопротивление земли рассчитывается по температурному распределению от стенки скважины к ненарушенному периферийному грунту. Метод оценки тепловых сопротивлений основан на решении для цилиндрического источника тепла.

Формулы для эффективных тепловых сопротивлений имеют следующий вид [4]:

$$R_{6h} = \frac{1}{k} G \left( \frac{\alpha t_{6h}}{r_{bore}^2} \right), \tag{2}$$

$$R_{1m} = \frac{1}{k} \left[ G \left( \frac{\alpha t_{1m+6h}}{r_{bore}^2} \right) - G \left( \frac{\alpha t_{6h}}{r_{bore}^2} \right) \right], \tag{3}$$

$$R_{10y} = \frac{1}{k} \left[ G \left( \frac{\alpha t_{10y+1m+6h}}{r_{bore}^2} \right) - G \left( \frac{\alpha t_{1m+6h}}{r_{bore}^2} \right) \right], \tag{4}$$

где  $G$  – функция, аналитическое выражение решения для цилиндрического источника тепла;

$k$  – теплопроводность грунта;

$\alpha$  – коэффициент температуропроводности грунта;

$r_{bore}$  – радиус скважины.

Значение  $G$ -function рассчитывается точно на основе работы Бодуэна. Альтернативно можно использовать графические значения (рис. 2), представленные Кавано и Рафферти.

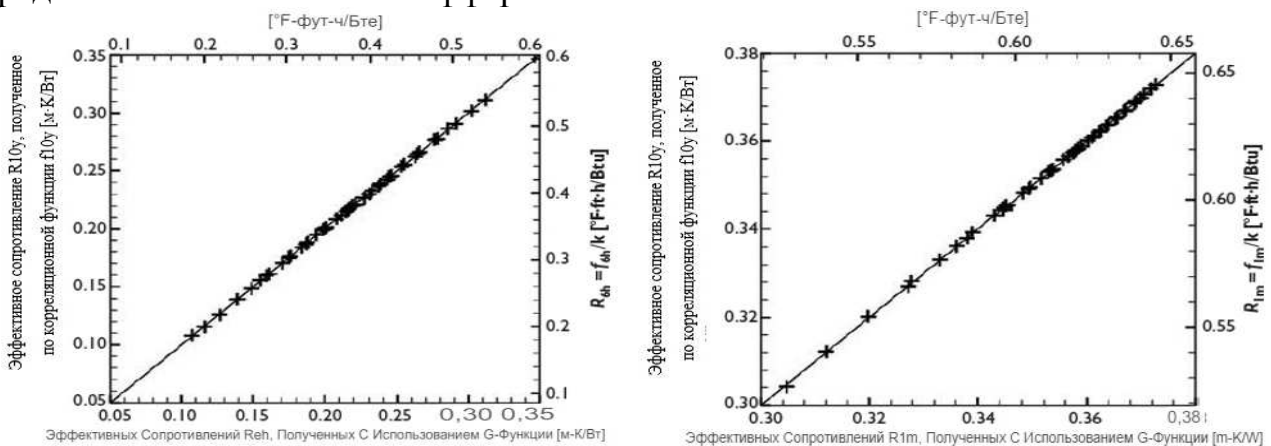


Рис. 2. Сравнение эффективных тепловых сопротивлений  $R_{6h}$ ,  $R_{1m}$ , и  $R_{10y}$ , полученных путем расчета и корреляции для  $k = 1 \text{ W} / (\text{m} \cdot \text{K})$  [4]

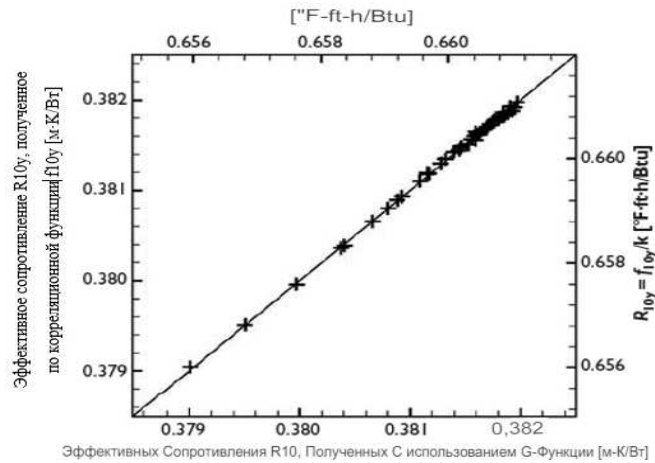


Рис. 2. Продолжение

*Корреляция температурной поправки,  $T_p$*

Температурная поправка  $T_p$  представляет собой корректировку, применяемую к температуре грунта для учета теплового взаимодействия между скважинами на буровом поле.  $T_p$  – это разница температур, а не абсолютная температура. Эта корреляция основывается на корреляционной функции, которая зависит от четырех параметров и имеет следующий вид [4]

$$T_p = \frac{q_y}{2\pi kL} F(t/t_s, B/H, NB, A), \tag{5}$$

где  $H$  – глубина скважины;

$B$  – расстояние между соседними скважинами (предполагается квадратная сетка скважин);

$NB$  – количество скважин;

$A$  – геометрическое соотношение (количество скважин в самом длинном направлении к количеству скважин в другом направлении);

$t_s$  – характерное время ( $=H^2/9\alpha$ ).

Для того, чтобы выбрать оптимальный дизайн, используются первичные и вторичные переменные, приведенные в таблице 1. Эти переменные показаны на нижеследующих графиках.

Табл. 1. Переменные величины

1. Первичные переменные:	2. Вторичные переменные:
Коэффициент температуропроводности почвы	Температура невозмущенного грунта ( $T_g$ )
Теплопроводность затирки	Температура на входе теплового насоса ( $T_{in}$ НР)
	Радиус скважины
	Радиус трубы
	Расстояние между скважинами
	Толщина трубы

Таким образом, на рисунке 3 видно, что чем больше глубина скважины, тем больше температура грунта. На глубине 180 м температура грунта для грунта (керамика и песчаник) и грунта (керамика и глина) равняется  $30^\circ\text{C}$ , а для грунта (бетон и известняк) и грунта (бетон и глина) температура грунта будет  $30^\circ\text{C}$  на глубине 240 м.

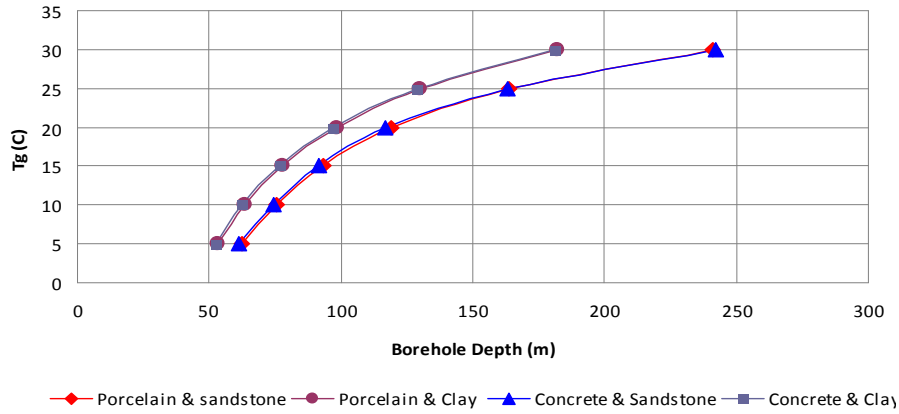


Рис. 3. Зависимость Tg от глубины скважины

Из рисунка 4 видно, что, чем больше глубины скважины, тем меньше температура на входе теплового насоса. При глубине скважины 260м температура Tin HP для грунта (керамика и песчаник) и (керамика и глина) равняется 20°C, а в случае грунтов (бетон и известняк) и (бетон и глина) температура Tin HP будет 20°C при глубине скважины 340м.

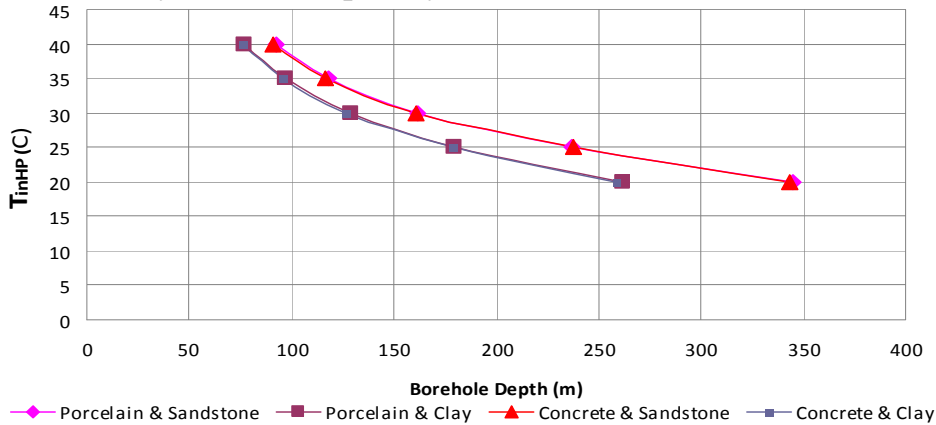


Рис. 4. Зависимость TinHP от глубины скважины

Графики на рисунке 5 показывают, что глубина скважины с уменьшением ее радиуса изменяется незначительно.

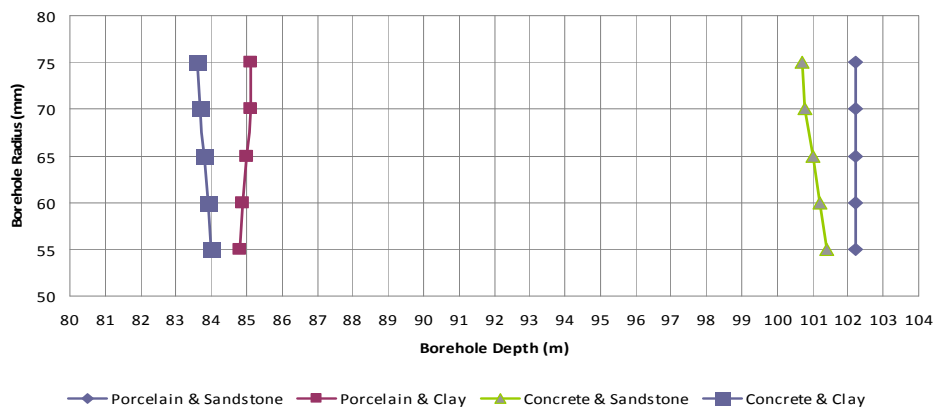


Рис. 5. Влияние радиуса скважины на глубину скважины

Из рисунка 6 видно, что чем больше глубина скважины, тем меньше радиус трубы. Один и тот же радиус трубы в 10мм для разных грунтов получается при разной глубине скважины:

96м – для грунта (керамика и песчаник);

98м – для грунта (керамика и глина);  
 113м – для грунта (бетон и известняк);  
 115м – для грунта (бетон и глина).

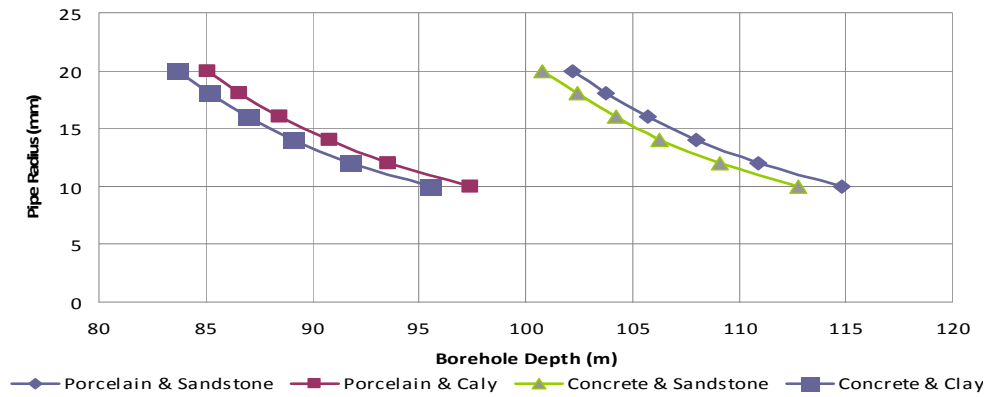


Рис. 6. Влияние радиуса трубы на глубину скважины

Из рисунка 7 следует, что, чем больше глубины скважины, тем меньше расстояние между скважинами. Одно и то же расстояние между скважинами в 5мм для разных грунтов получается при разной глубине скважины: 88м – для грунта (керамика и песчаник); 92м – грунт (керамика и глина); 108м – грунт (бетон и известняк); 113м – грунт (бетон и глина).

Из рисунка 8 следует, что чем больше глубина скважины, тем больше толщина трубы. Одна и та же толщина трубы в 5мм для разных грунтов получается при разной глубине скважины: 85м – для грунта (керамика и песчаник); 88м – грунт (керамика и глина); 104м – грунт (бетон и известняк); 107м – грунт (бетон и глина).

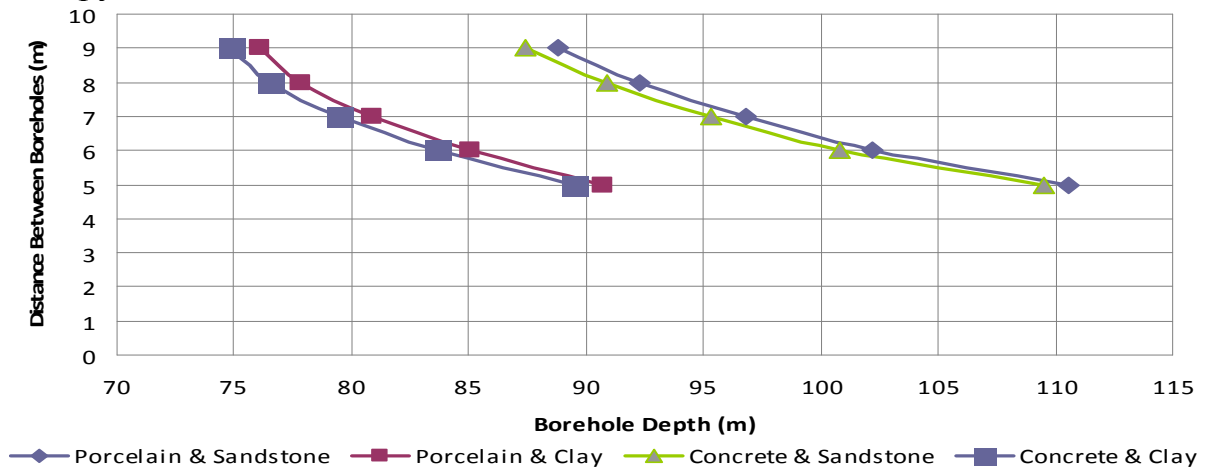


Рис. 7. Зависимость расстояния между скважинами от глубины скважины

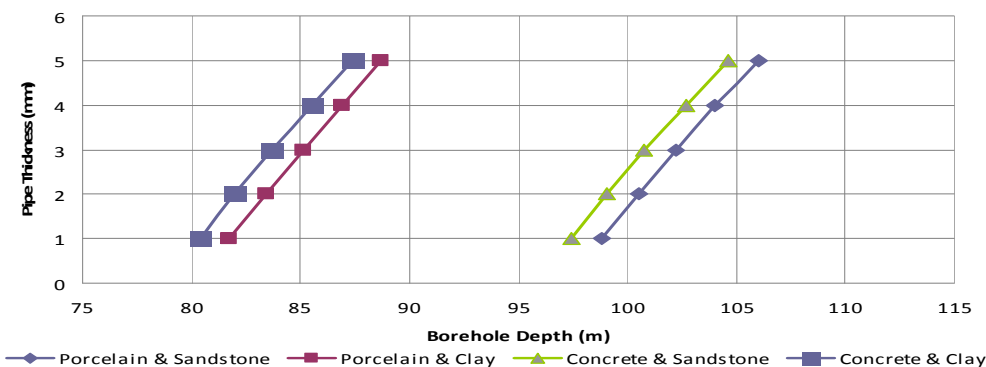


Рис. 8. Влияние толщины трубы на глубину скважины

## **Вывод**

Общая нагрузка на нагрев и охлаждение в этом проекте составляет 63 кВт и 174 кВт соответственно.

Охлаждающая нагрузка (наибольшая нагрузка в проекте) выбрана в качестве главного параметра при проектировании геотермальной системы (в основном для оценки количества скважин). Для обеспечения этой нагрузки требуется 50 скважин.

Затраты на техническое обслуживание и эксплуатацию геотермальной системы обогрева и охлаждения меньше, чем у традиционных источников теплоснабжения и охлаждения.

Основным аргументом против установки геотермальной системы обогрева и охлаждения являются капитальные затраты (затраты на бурение и оборудование), но высокая первоначальная стоимость оправдана коротким сроком окупаемости (всего 3 года).

В настоящем проекте не рассматривались коллекторы, имеющие горизонтальное расположение петель из-за ограничений по площади занимаемой поверхности. Вместо этого используются вертикальные петли, но они стоят дороже, так как требуют проведения буровых работ. Поэтому необходимо провести детальное исследование, чтобы выбрать тип конструкции петель.

Геотермальные системы отопления и охлаждения значительно сокращают выбросы парниковых газов и вносят значительный вклад в создание экологически чистых зданий и получение сертификата LEED (Лидерство в энергетическом и экологическом проектировании).

Мы рекомендуем домовладельцам и владельцам бизнеса устанавливать геотермальные системы переменного тока, особенно если эксплуатационные расходы их зданий высоки, так как это сократит срок окупаемости и эксплуатационные расходы.

## **Список литературы**

1. Geothermal HVAC: Green Heating and Cooling – Jay Egg & Brian Clark Howard <https://www.researchgate.net/journal/Ashrae-Journal-0001-2491>.
2. Sizing Calculation Spreadsheet Vertical Geothermal Borefields - By Mikael Philippe; Michel Bernier, Ph.D., P.Eng., Member ASHRAE; and Dominique Marchio 2011 ASHRAE Handbook- HVAC Applications, Chapter 34.
3. Proceedings World Geothermal Congress 2000, Geothermal Energy Resources In Jordan, Country Update Report.
4. Myslil V. Report on evaluation of geothermal potential of Jordan. 1988.

## Сведения об авторах:

*Цветкова Галина Викторовна* – к.т.н., доцент;

*Аль-Наджар Мохаммад* – студент;

*Нагхави Янал* – студент.