**ВЕСТНИК ПНИПУ.
СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА**
Т. 7, № 1, 2016
**PNRPU BULLETIN
CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE**
<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9826/2016.1.13

УДК 697.7

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЗДАНИЙ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ

А.Ю. Колечкина, А.В. Захаров

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 17 января 2016
Принята: 29 января 2016
Опубликована: 31 марта 2016

Ключевые слова:

энергоэффективность зданий, возобновляемые источники, геотермальная энергия, грунт, высокопотенциальная энергия, низкопотенциальная энергия, коллектор, первичный контур, горизонтальный теплообменник, поверхностные теплообменники, энергетические корзины, температура грунта, отопление, тепловой насос, грунтовые воды, коэффициент полезного действия, влажность, теплопроводность

АННОТАЦИЯ

Проблема повышения стоимости электроэнергии вызвала в последнее время тенденцию к строительству энергоэффективных зданий. Кроме того, наблюдается проблема рационального использования ресурсов. В статье рассматривается один из способов повышения энергоэффективности зданий – за счет использования возобновляемых источников энергии. К таким источникам традиционно относят энергию ветра, воды, солнца, грунта (геотермальная энергия). Геотермальная энергия бывает двух типов – высокопотенциальная и низкопотенциальная. В статье подробно рассмотрена низкопотенциальная энергия грунта для отопления зданий. Описаны основные способы извлечения низкопотенциальной энергии грунта. К ним можно отнести использование теплообменников горизонтального и вертикального типа. Также подробно рассмотрены горизонтальные теплообменники. К ним относят поверхностные теплообменники и энергетические корзины. Поверхностные теплообменники состоят из труб, уложенных параллельно поверхности земли. Энергетические корзины – теплообменники, которые устанавливаются в грунте вертикально на глубине до 5 м и представляют собой отдельные контуры труб, закрученные по спирали. Рассмотрен основной состав, последовательность и особенности монтажа, основные достоинства этих систем. Полученная от рассмотренных систем энергия не может использоваться напрямую. Поэтому целесообразно использовать тепловые насосы, которые повышают уровень температуры до необходимого значения. Далее энергия может быть использована для отопления, горячего водоснабжения, а также кондиционирования и электроснабжения зданий.

© ПНИПУ

© Колечкина Анастасия Юрьевна – магистрант, e-mail: spstf@pstu.ru.

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

Anastasiia Iu. Kolechkina – Master Student, e-mail: spstf@pstu.ru.

Alexander V. Zakharov – Ph.D., Associate Professor, e-mail: spstf@pstu.ru.

BUILDING ENERGY EFFICIENCY THROUGH THE USE OF A HORIZONTAL HEAT EXCHANGER SYSTEMS

A.Iu. Kolechkina, A.V. Zakharov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 17 January 2016
Accepted: 29 January 2016
Published: 31 March 2016

Keywords:

energy efficiency in buildings,
renewable energy, geothermal
energy, ground, high-grade energy,
low potential energy, the collector,
the primary circuit, horizontal heat
exchanger, surface heat
exchangers, energy baskets, soil
temperature, heating, heat pump,
ground water, water efficiency,
humidity, thermal conductivity

ABSTRACT

The problem of increased cost of electricity has caused the recent trend towards the construction of energy efficient buildings. In addition, there is the problem of rational use of resources. This article discusses one way to increase the energy efficiency of buildings through the use of renewable energy sources. These sources include traditional wind, water, sun, earth (geothermal). Geothermal energy is of two types – high-grade and low-grade. The article discussed in detail ground low potential energy for heating buildings. The basic methods of extraction low potential energy of the soil. Such methods include the use of heat exchangers of horizontal and vertical type. In this paper we detail the horizontal heat exchangers. These include surface heat exchangers and energy basket. Surface heat exchanger consists of tubes laid parallel to the ground. Energy baskets – heat exchangers, which shall be laid in the ground vertically to a depth of 5 meters and represent the individual contours of the pipe, coiled in a spiral. Consider the basic structure, sequence, and editing features, the main advantages of these systems. Resulting from the energy systems considered can not be used directly. Therefore, it is advisable to use heat pumps, which raise the temperature level to the desired value. Further energy can be used for heating, hot water and electricity for air conditioning and building.

© PNRPU

В настоящее время наблюдается тенденция повышения энергоэффективности зданий. Такое положение объясняется тем, что электроносители в России всегда имели низкую стоимость, и это не позволяло ощутить экономическую выгоду от применения энергоэффективных систем. Но в последнее время стоимость на энергоносители стремительно возросла. Так, цена на электроэнергию увеличилась на 45,8 %, а на газ – на 63,5 % (по данным двух последних лет).

В большей степени данная проблема затрагивает коммунальное хозяйство, на обеспечение которого затрачивается 20 % электроэнергии и 45 % теплоэнергии, производимых в стране. По сравнению с европейскими странам в России на 1 м² жилой площади энергии расходуется в 2–3 раза больше. Происходит это не столько из-за суровых климатических условий, сколько из-за «мягкости» строительных нормативов [1].

Над разработкой методов определения физических свойств грунтов работают ученые всего мира. Так, российский ученый А.В. Меркулов запатентовал способ определения физических свойств грунта и устройство для его осуществления (RU 2193180). Исследователь А.М. Культиков изобрел устройство для определения физических характеристик мерзлых грунтов (SU 122918). Также больших результатов в этой области достигли Н.А. Цытович, В.В. Лушников, А.Л. Невзоров, С.В. Нерпин, А.Ф. Чудновский, А.М. Глобус, В.А. Королев, В.Г. Шаповал.

Над расширением области применения низкопотенциальной энергии грунта работают российские ученые: Г.В. Абраменко (RU 2200282), Н.А. Чеканов (RU 2382295), В.Д. Карпенко (RU 2259517), В.Г. Горшков (RU 2152568), и зарубежные геотехники – Н. Brandl, О. Johansen, R. Katzenbach, B. Sanner, B. Usowicz и др.

Одним из путей повышения энергоэффективности здания является использование возобновляемых источников энергии для отопления, кондиционирования и электроснабже-

ния зданий. К таким источникам традиционно относят энергию ветра, воды, солнца, грунта (геотермальная энергия).

Классификация геотермальной энергии представлена на рис. 1.

Рис. 1. Классификация геотермальной энергии

Fig. 1. Classification of geothermal energy

Геотермальная энергия бывает двух типов: высокопотенциальная и низкопотенциальная. Первая в зависимости от способа применения классифицируется на гидротермальную и петротермальную. Гидротермальная система использует природные водные ресурсы (например, горячий водоносный горизонт). Полученная энергия может использоваться напрямую – тепло или косвенно – электричество. При петротермальном методе энергия получается с использованием горячего горизонта твердой породы. Вначале бурят скважины глубиной в несколько тысяч метров, затем в породу под давлением закачивают воду, что приводит к теплообмену. На следующем этапе энергия в виде водяного пара поступает вверх через соседнюю скважину. Полученная энергия находит применение в паровых турбинах (для производства электричества) либо отопительных системах [2].

Для добычи низкопотенциальной энергии грунта используют скважины глубиной не более 400 м. При данной глубине температура грунта увеличивается на 3 °С каждые 100 м глубины. Температура земной поверхности меняется в зависимости от солнечной радиации, тепловыделений в атмосферу и других факторов. Главная проблема заключается в том, что такую энергию невозможно использовать напрямую. Для отопления и горячего водоснабжения уровень температуры повышают до необходимого значения при помощи теплового насоса [3].

Система теплового насоса представляет собой энергетическую систему, в состав которой входят источник теплоты низкопотенциальной энергии (первичный контур), тепловой насос (ТН) и система потребления теплоты (вторичный контур).

Источниками теплоты для ТН выступают воздух, вода, солнце и грунт. В данном случае в качестве источника рассматривается грунт, т.е. речь идет о геотермальных сис-

темах. На эффективность использования теплоты грунта ключевое влияние оказывают геологические, гидрологические и климатические условия [4].

Важную роль в генерации энергии играют глубина, вид породы и наличие грунтовых вод. В области Центральной Европы грунтовые воды в среднем обладают постоянной температурой на протяжении всего года. Благодаря стабильному потоку тепловая энергия в постоянном режиме поставляется для отопления или рассеивается для нужд охлаждения. Даже в случае сезонного колебания поверхностных температур, на небольшой глубине температура остается неизменной, в пределах среднего значения в 10 °С. Исходя из этого, грунт является постоянным источником низкопотенциальной энергии, которую можно использовать на протяжении всего года в системах как отопления, так и охлаждения зданий.

При проектировании геотермальных систем первостепенное значение должно придаваться местным условиям окружающей среды. Определение свойств грунта: теплопроводности, плотности, удельной теплоемкости, а также оценка различных процессов тепломассообмена являются необходимыми условиями для установления термального потенциала почвы. Расчет источника термальной энергии в значительной степени влияет на энергетический КПД системы теплового насоса.

На рис. 2 показано изменение температур в течение года (для Центральной Европы) в верхней части грунта до глубины 20 м. В зимнее время температура воздуха может опускаться ниже нулевой отметки, однако уже на глубине нескольких метров температура грунта достигает значения в среднем 10 °С [5].

Рис. 2. График изменения температур в течение года
Fig. 2. A graph of temperatures during the year

В летнее время температура воздуха поднимается в среднем до отметки 20 °С, однако температура почвы на глубине примерно 15–20 м остается практически неизменной. Это

также относится к переходным периодам – весне и осени. Годовые изменения температуры в почве на небольшой глубине показывают, что грунт является постоянным источником энергии.

В качестве первичного контура используют теплообменники – грунтовые коллекторы. Они бывают горизонтального и вертикального типа [6].

Горизонтального типа:

- горизонтальные или поверхностные теплообменники;
- спиральные коллекторы и энергетические корзины.

Вертикального типа:

- буровые скважины;
- энергетические сваи.

Выбор той или иной геотермальной системы зависит от окружающей среды (свойств грунтов и климатических условий), эксплуатационных данных, режима эксплуатации, типа здания (коммерческого назначения или частного), доступного места и правовых норм [7].

Горизонтальные грунтовые теплообменники (рис. 3) являются наиболее распространенным вариантом геотермальных теплообменников. Они состоят из труб, уложенных параллельно поверхности земли.

Рис. 3. Схематичное изображение системы горизонтального коллектора
Fig. 3. Scheme of a system of horizontal collector

Основными преимуществами данного метода являются:

- сравнительно низкие инвестиционные затраты;
- высокий сезонный коэффициент полезного действия;
- простой монтаж;
- низкая глубина монтажа без нарушения водного баланса [8].

В зависимости от условий отдельные циркуляционные теплообменники укладываются на расстоянии от 0,5 до 0,8 м (при диаметре труб 40 мм – от 1,2 до 1,5 м), примерно как в системе напольного отопления. Подающие

и возвратные трубы отдельных циркуляционных теплообменников сходятся в распределительные колодцы или коллекторы и подводятся к тепловому насосу. Важным преимуществом теплообменников горизонтального типа являются относительно низкие инвестиционные затраты при относительно высоком сезонном КПД. Из всех систем термальной энергии теплообменники горизонтального типа являются вариантом решения, требующим самых небольших капиталовложений. Для монтажа системы необходимо запланировать относительно большую открытую площадку [9].

Альтернативой теплообменникам горизонтального типа является активация фундаментных плит с целью отопления и/или пассивного охлаждения – создание энергоэффективного плитного фундамента. В данном случае кроме фактической площади, занимаемой самим зданием, не требуется дополнительного места для монтажа. Поскольку конструкция большинства зданий предполагает наличие фундаментных плит, ленточного фундамента или фундамента глубокого заложения либо сочетания таковых, использование термальной энергии с помощью фундаментов является достаточно перспективным вариантом применения геотермальной энергии. Под фундаментной плитой устраивается так называемый

выравнивающий слой, состоящий из бетона или мелкого гравия. Для использования геотермальной энергии можно встроить трубы теплообменника именно в данный слой. Уровни мощности, которые могут быть достигнуты при эксплуатации фундаментных плит, ограничены, и они, безусловно, ниже, чем при использовании теплообменников горизонтального типа, расположенных рядом со зданием, причем кроме состояния грунта важное значение имеют уровень грунтовых вод и их движение. При любых условиях необходимо избегать падения температуры в системе ниже температуры замерзания [10].

До 99 % тепловой энергии, полученной из грунта с помощью грунтовых теплообменников горизонтального типа – это накопленная в грунте солнечная энергия, а не энергия ядра Земли. Поэтому решающим фактором эффективной работы системы является тепловой контакт с поверхностью земли. В зимний период количество чистой солнечной энергии, попадающее в грунт, является минимальным, а извлечение теплоты грунтовыми теплообменниками с помощью тепловых насосов – максимальным. Извлеченная энергия является солнечной энергией, накапливаемой в грунте в течение летнего периода. Для того чтобы горизонтальный теплообменник использовал данную энергию, необходимо, чтобы он был расположен ниже уровня промерзания грунта.

Эффективность грунтового теплообменника горизонтального типа зависит в основном от влажности грунта. В песчаном грунте с низким капиллярным действием дождевая вода быстро просачивается в более глубокие слои. Глинистый грунт, обладающий высоким капиллярным эффектом, в противодействие гравитационным силам, может удерживать воду намного лучше. Эти различия приводят к тому, что влажность песчаного грунта, как правило, составляет менее 10 %, а у глинистого грунта может превышать 35 %. Таким образом, глинистый грунт способен удерживать втрое больший объем воды. Данная вода служит хранилищем для горизонтального теплообменника. К тому же вода, содержащаяся в грунте, увеличивает ее теплопроводность. По этой причине теплота, аккумулируемая более глубокими пластами земли, и солнечная энергия с земной поверхности поступают в теплообменники намного быстрее [11].

В табл. 1 приведены различия между песчаным, глинистым, суглинистым и гравийно-глинистым грунтом, что в полной мере отражает разнообразие грунтов, существующих в природе.

Таблица 1

Физические свойства характерных типов грунтов

Table 1

Physical properties of typical soil

Показатели	Ед. изм.	Песчаный	Глинистый	Суглинистый	Гравийно-глинистый
Влажность	%	9,3	28,2	38,1	36,4
Теплопроводность	Вт/м·К	1,22	1,54	1,49	1,76
Удельная теплоемкость	Дж/кг·К	805	1229	1345	1324
Плотность	кг/м ³	1512	1816	1821	1820

Гравийно-глинистый грунт имеет зернистость средней величины (между 2 и 50 мм). Как правило, объемная влажность этих связных почв достигает 20–40 %, и, таким образом, в сравнении с песчаными грунтами они лучше подходят для использования теплообменников горизонтального типа.

Глинистые грунты, большая часть которых состоит из очень мелкого зерна (<2 мм), обладают еще большим капиллярным эффектом, что увеличивает объемную влажность до уровня выше 30 % [12].

Физические свойства грунтов варьируются от места к месту, на это, среди прочего, влияет различный объем выпадающих осадков. В табл. 2 представлены средние значения физических свойств различных типов грунтов. Климатические различия настолько велики, что нет смысла в установке грунтового теплообменника горизонтального типа по одинаковым правилам. В более теплых районах возможно достижение более высокой поверхностной удельной мощности отведения без нанесения ущерба системе или окружающей среде.

Таблица 2

Референтные значения для расчета размеров теплообменников горизонтального типа

Table 2

Reference values for calculating the size of heat exchangers of horizontal type

Подпочва	Удельная мощность отведения q_E при 1800 Вт/м ³	Удельная мощность отведения q_E при 2400 Вт/м ³	Расстояние между прокладываемыми трубами, м	Глубина установки, м	Расстояние до подводящих труб, м
Сухой, несвязный грунт	10	8	1	1,2–1,5	$>0,7$
Связный, илистый грунт	10–30	16–24	0,8	1,2–1,5	$>0,7$
Насыщенный водой песок/гравий	40	32	0,5	1,2–1,5	$>0,7$

В режиме отопления теплообменники горизонтального типа извлекают теплоту из грунта так, что она охлаждается до температуры ниже природной. При расчете систем следует не допускать пагубного воздействия на грунт и окружающую среду или их повреждения. В целом существует вероятность, что флора над теплообменником горизонтального типа будет развиваться весной с небольшим запозданием. Поскольку теплообменник горизонтального типа располагается, как правило, на глубине более 1 м и на эту глубину проникает лишь незначительное количество корней грунтовых культур, данный эффект является незначительным. В принципе, в зоне расположения горизонтального теплообменника можно сажать любые виды растений, даже деревья. Корни растений не могут повредить трубы геотермальной системы, которые пролегают на обычной глубине, а воздействие труб на растения является минимальным. Ущерб может быть нанесен скорее не охлаждением, а образованием льда в зимний период времени. Если температура поверхности труб падает ниже 0 °С, то вода, находящаяся в окружающем грунте, начинает замерзать. Незначительный уровень образования льда не является проблемой, так как в зимний период грунт обычно промерзает на некоторую глубину в зависимости от региона и оттаивает с наступлением весны. Тем не менее при совместном воздействии этих факторов со слишком интенсивным образованием льда грунту или окружающей среде может быть нанесен вред [13].

Энергетические корзины (рис. 4) используются на объектах, где невозможно глубокое бурение исходя из условий водного законодательства, или по гидрологическим при-

чинам, или недостатка свободного места. Энергокорзина является экономически и энергетически эффективной альтернативой в сфере использования геотермальной энергии. При работе соляной раствор (смесь воды и этиленгликоля) циркулирует по трубам энергокорзины и отбирает теплоту у грунта.

Рис. 4. Схематическое изображение геотермальной системы с использованием энергетической корзины
Fig. 4. Scheme of a geothermal system using the energy mix

Преимущества энергетических корзин:

- эффективное решение для использования геотермальной энергии с экономической и энергетической точки зрения;
- требуется небольшая площадь при эффективном использовании объема грунта;
- постоянный съем тепла;
- небольшая глубина установки без воздействия на уровень грунтовых вод.

В жаркие летние месяцы низкая температура грунта может быть использована для пассивного охлаждения. Во время эксплуатации в данном режиме используется только циркуляционный насос. Следовательно, расход энергии во время фазы охлаждения является минимальным, и данное решение, безусловно, является наиболее рентабельным по сравнению с традиционными вариантами организации охлаждения.

Условием для применения этого решения является наличие поверхностной системы отопления и охлаждения. Такое переменное использование грунта для нагрева и охлаждения создает энергетический баланс в грунтовом массиве и, таким образом, гарантирует работу источника энергии в течение длительного времени [14].

Энергетические корзины предназначены для эксплуатации на глубине от 1 до 4 м. Энергокорзины устанавливаются в непосредственной близости к поверхности грунта и располагаются на такой глубине, где происходят сезонные колебания уровня температуры (рис. 5). Таким образом, погодные условия на 100 % влияют на температуру грунта. Сезонные колебания температуры фиксируются на глубинах примерно до 20 м (в зависимости от региона); ежедневные колебания температуры происходят на глубине примерно 1 м. К тому же наблюдается четкий фазовый сдвиг между температурой воздуха и грунта. В ноябре температура грунта достигает самого высокого уровня, а в мае – самого низкого.

Поскольку отбор теплоты происходит на глубине от 1 до 5 м ниже уровня промерзания грунта, то удастся избежать эффекта так называемого сквозного промерзания. Таким образом, предотвращается вредное воздействие на находящиеся в грунте микроорганизмы. Благодаря этому поверхность над установленной энергокорзиной может использоваться для садовых или огородных нужд без каких-либо последствий. Следует избегать чрезмерной застройки или изоляции данной площади. Процесс естественной регенерации

Рис. 5. Монтаж энергетической корзины: *а* – отделение труб подводки; *б* – установка труб подводки в определенном положении; *в* – фиксация обратной трубы; *г* – фиксация падающей трубы; *д* – рытье котлована для установки; *е* – размещение энергокорзины в котловане; *ж* – заливка котлована; *з* – засыпка энергокорзины; *и* – установленная энергокорзина после уплотнения грунта
Fig. 5. Installation of the energy mix: *a* – branch pipe; *b* – installation of the pipe; *c* – fixing return pipe; *d* – fixation of the falling pipe; *e* – excavation for installation; *f* – placement energy mix in the pit; *g* – fill of the pit; *h* – filling of energy mix; *i* – installed energy mix after compaction

грунта на месте установки происходит за счет поступления солнечного излучения и увлажнения грунта дождевыми и талыми водами. Как правило, в случае с энергетическими корзинами не происходит смещение грунта из-за образования ледяных цилиндров при недостаточных размерах коллектора, также отсутствует вероятность формирования полосы льда ниже уровня поверхности, препятствующей проникновению в грунт дождевых и талых вод [15].

Библиографический список

1. Coskun C., Oktay Z. New energy and energy parameters for geothermal district heating systems // Applied thermal engineering. – 2006. – № 11–12. – P. 2235–2242.
2. Крамина Т.А. Нетрадиционные методы получения геотермальной энергии // Известия казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2015. – № 2. – С. 213–219.

3. Geothermal energy: an underground idea starts to surface // *Engineered systems*. – 1998. – № 4. – P. 25–26.
4. Белоокая Н.В., Пивоварова Е.И. Обзор альтернативных источников энергии. Геотермальная энергия // *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. – 2015. – № 1 (12). – С. 67–72.
5. Медведев Д.П., Захаров А.В. Построение уравнения регрессии зависимости теплопроводности от плотности и влажности // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. – 2014. – Вып. 35 (54). – С. 79–84.
6. Kairouani L., Nehdi E. Cooling performance and energy saving of a compression-absorption refrigeration system assisted by geothermal energy // *Applied thermal engineering*. – 2006. – № 2–3. – P. 288–294.
7. Рагозина Н.М. Оборудование возобновляемых источников энергии на примере использования низкопотенциального тепла в схемах с тепловыми насосами. – М., 2009. – 60 с.
8. Енисеев Г.А. Горизонтальный теплообменник: патент № RU 2296284.
9. Шамигулов П.В. Определение оптимальной глубины закладки горизонтального теплообменника теплового насоса // *Альтернативная энергетика и экология*. – 2015. – С. 48–53.
10. Игнатов Ю.Н. Грунтовый теплообменник: патент № RU 2472076.
11. Васильев Г.П. Теплохладоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной тепловой энергии поверхностных слоев Земли. – М., 2006. – 176 с.
12. Пресс-служба компании ЗАО «Упорнор Рус». Энергетическая независимость // *Сантехника, отопление, кондиционирование*. – № 12. – М., 2012.
13. Захаров А.В., Пономарев А.Б., Машенко А.В. Энергоэффективные конструкции в подземном строительстве: учеб. пособие для вузов. – Пермь, 2012. –
14. Бобров И.А., 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.
15. 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.

References

1. Coskun C., Oktay Z. New energy and energy parameters for geothermal district heating systems. *Applied thermal engineering*, 2006, no. 11–12, pp. 2235–2242.
2. Kramina T.A. Netraditsionnye metody polucheniia geotermal'noi energii [Nonconventional methods of obtaining geothermal energy]. *Izvestiia Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*, 2015, no. 2, pp. 213–219.
3. Geothermal energy: an underground idea starts to surface. *Engineered systems*, 1998, no. 4, pp. 25–26.
4. Belookaia N.V., Pivovarova E.I. Obzor al'ternativnykh istochnikov energii. Geotermal'naia energiia [Survey of alternative energy resources geothermal energy]. *Izvestiia vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'*, 2015, no. 1 (12), pp. 67–72.
5. Medvedev D.P., Zakharov A.V. Postroenie uravneniia regressii zavisimosti teploprovodnosti ot plotnosti i vlazhnosti [Development of the regression equation of thermal conductivity dependence on density and moisture]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2014, vol. 35 (54), pp. 79–84.
6. Kairouani L., Nehdi E. Cooling performance and energy saving of a compression-absorption refrigeration system assisted by geothermal energy. *Applied thermal engineering*, 2006, no. 2–3, pp. 288–294.

7. Ragozina N.M. Oborudovanie vozobnovliaemykh istochnikov energii na primere ispol'zovaniia nizkopotentsial'nogo tepla v skhemakh s teplovymi nasosami [Renewable energy sources equipment using the example of low-grade heat in heat pump circuits]. Moscow, 2009. 60 p.
8. Eniseev G.A. Gorizontal'nyi teploobmennik [Horizontal heat exchanger]. *Patent № RU 2296284*.
9. Shamigulov P.V. Opredelenie optimal'noi glubiny zakladki gorizontal'nogo teploobmennika teplovogo nasosa [Determining the optimum depth of the horizontal tabs exchanger heat pump]. *Mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal al'ternativnaia energetika i ekologiya*, 2015, pp. 48-53.
10. Ignatov Iu.N. Gruntovyi teploobmennik [Ground heat exchangers]. *Patent № RU 2472076*.
11. Vasil'ev G.P. Teplokhodosnabzhenie zdanii i sooruzhenii s ispol'zovaniem nizkopotentsial'noi teplovoi energii poverkhnostnykh sloev Zemli [Heat and cold buildings with low potential thermal energy of the surface layers of the Earth]. Moscow, 2006. 176 p.
12. Press-sluzhba kompanii ZAO "Uponor Rus". Energeticheskaya nezavisimost' [Energy independence]. *Santekhnika, otoplenie, konditsionirovanie*. Moscow, 2012, no. 12.
13. Zakharov A.V., Ponomarev A.B., Mashchenko A.V. Energoeffektivnye konstruksii v podzemnom stroitel'stve [Energy-efficient construction in the underground construction]. Perm', 2012. p.
14. Bobrov I.A., Zakharov A.V. Primenenie teplovoi energii gruntovogo osnovaniia dlia otopleniia i konditsionirovaniia zdanii [The use of thermal energy subgrade for heating and cooling of buildings]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2011, no. 1, pp. 10-14.
15. Ponomarev A.B., Zakharov A.V. Ispol'zovanie geotermal'noi energii dlia otopleniia i konditsionirovaniia zdanii [The use of geothermal energy for heating and cooling of buildings]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2010, vol. 17 (36), pp. 119-122.