

УДК 621.577

С. О. Филатов, магистрант (БГТУ);

В. И. Володин, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой (БГТУ)

РАБОТА ТЕПЛООБМЕННИКОВ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ ГРУНТА

В работе исследуются режимы работы грунтового теплообменника теплового насоса системы теплоснабжения здания. Численный анализ показал уменьшение его теплового потока до трех раз при снижении температуры грунта с 7 до 1°C. Это явление обусловлено режимом течения теплоносителя водного раствора этиленгликоля. Поддержание требуемого теплового потока в системе может быть достигнуто регулированием расхода теплоносителя.

Modes of operation of ground heat exchanger heat pump heating system of the building are investigated in this work. The numerical analysis showed a decrease in its heat flux of up to three times reduction in soil temperature from 7 to 1°C. This phenomenon is caused by fluid flow regime of an aqueous solution of ethylene glycol. Maintain the required heat flow in the system can be achieved by regulating the heat carrier flow rate.

Введение. Одним из современных направлений в развитии систем теплоснабжения зданий является применение теплонасосных установок с использованием в качестве источника теплоты окружающей среды: атмосферного воздуха, грунта, грунтовых и поверхностных вод.

Температура атмосферного воздуха подвержена существенным колебаниям как в течение суток, так и на протяжении года. Грунт как источник низкопотенциальной теплоты характеризуется тем, что в течение года он имеет практически постоянную положительную температуру, существенно отличающуюся от температуры окружающего воздуха. В зимний период она больше температуры воздуха, в летний период – меньше. Поэтому грунт представляет наибольший интерес для систем теплоснабжения на основе использования тепловых насосов, так как при этом обеспечиваются стабильные параметры системы. Одним из основных и затратных элементов таких систем является грунтовой теплообменник (ГТО).

В данной работе представлены метод и результаты исследования грунтового теплообменника, учитывающие возможные изменения параметров грунта.

Характеристика грунта как источника (приемника) теплоты. В работе [1] предложена модель температурного режима почвы, формируемого потоком солнечного излучения и потоком теплоты из недр Земли. Температура воздуха приближенно равна:

$$T_{\text{в}} = \bar{T}_{\text{в}} + \Delta T_{\text{в}} \cos\left(\frac{2\pi t}{t_0} - \varphi_0\right), \quad (1)$$

где $\bar{T}_{\text{в}}$ – среднегодовая температура воздуха рассматриваемого региона, К; $\Delta T_{\text{в}} = T_{\text{в,срм}} - \bar{T}_{\text{в}}$; t – время с начала года, ч; t_0 – продолжительность года, 8760 ч; φ_0 – сдвиг фазы макси-

мальной температуры по отношению к началу года, $\sim 1,06\pi$; $T_{\text{в,срм}}$ – среднемесячная температура для месяца с максимальной температурой в году.

Температура грунта:

$$T_{\text{г}} = \bar{T}_{\text{в}} + \Delta T_{\text{в}} \exp(-\xi) \cos\left(\frac{2\pi t}{t_0} - \varphi_0 - \xi\right), \quad (2)$$

$$\xi = z \cdot \sqrt{\frac{\pi}{3600at_0}}, \quad (3)$$

где z – глубина, м; a – температуропроводность грунта, м²/с.

На рис. 1 для условий Республики Беларусь представлены графики изменения температуры воздуха и грунта в течение года, моделируемые с помощью уравнений (1)–(3). Для Минска $\bar{T}_{\text{в}} = 5,5^\circ\text{C}$, $T_{\text{в,срм}} = 17,7^\circ\text{C}$ [2].

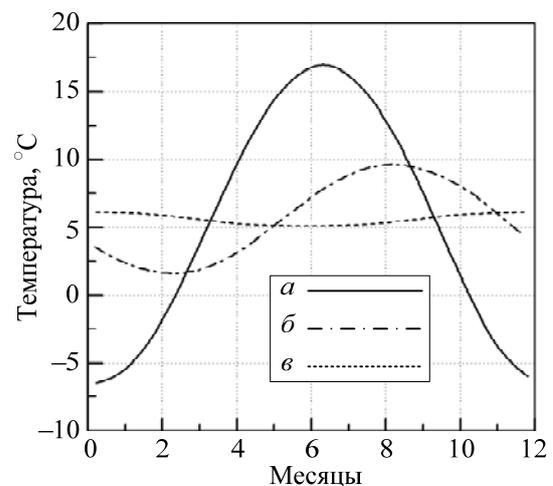


Рис. 1. Годовое изменение температуры: а – атмосферного воздуха; б – грунта на глубине 2 м; в – грунта на глубине 6 м

Видно, что в летний и зимний периоды температуры грунта и воздуха существенно отличаются друг от друга. Температура грунта изменяется в меньшей степени. Из этого вытекают определенные преимущества грунта как источника/приемника теплоты по отношению к воздуху.

Эффективность работы теплового насоса значительно зависит от температур источников и приемников теплоты. Коэффициент преобразования теплового насоса, параметр, определяющий энергетическую эффективность утилизации теплоты в теплонасосном цикле, увеличивается с ростом температуры источника и падением температуры приемника теплоты. Следовательно, по сравнению с атмосферным воздухом массив грунта представляется в зимний период более благоприятным источником теплоты (грунтовой теплообменник связан с испарителем теплового насоса) для отопления. В летний период, когда возникает необходимость в кондиционировании помещений, грунтовой массив выступает благоприятным приемником теплоты (в реверсивном режиме грунтовой теплообменник связан с конденсатором теплового насоса).

Грунт поверхностных слоев Земли фактически представляет собой тепловой аккумулятор неограниченной емкости, тепловой режим которого формируется под воздействием двух основных факторов: солнечной радиации и потока радиогенного тепла, поступающего из земных недр.

В летний период происходит аккумулярование теплоты, поступающей к грунту за счет солнечного излучения, от воздуха за счет конвекции, с атмосферными осадками. Также в течение года из нижних слоев Земли за счет теплопроводности поступает теплота с постоянным тепловым потоком. В зимний период за счет большой тепловой инерционности почвы происходит медленное ее остывание.

Рассмотренные особенности теплового режима грунта определяют специфику расчета грунтовых теплообменников (ГТО) для использования в качестве испарителей (конденсаторов) при работе трансформатора тепла.

Конструктивные особенности грунтовых теплообменников. Системы использования низкопотенциальной теплоты грунта поверхностных слоев Земли в общем случае включают в себя грунтовой теплообменник и трубопроводы, соединяющие его с теплонасосным оборудованием.

Можно выделить два вида систем:

- открытые, с использованием в качестве источника низкопотенциальной теплоты грунтовых вод, подводимых непосредственно к тепловым насосам из скважин;

- замкнутые, с использованием непосредственно теплоты грунта с помощью теплообменника, расположенного в нем, с организацией циркуляции теплоносителя теплообменник – тепловой насос.

Схема открытой системы приведена на рис. 2. Достоинством открытых систем является возможность получения большого количества тепловой энергии при относительно низких затратах. Однако скважины требуют обслуживания, использование таких систем возможно не во всех местностях, т.к. вода должна забираться из больших подземных резервуаров и возвращаться обратно.

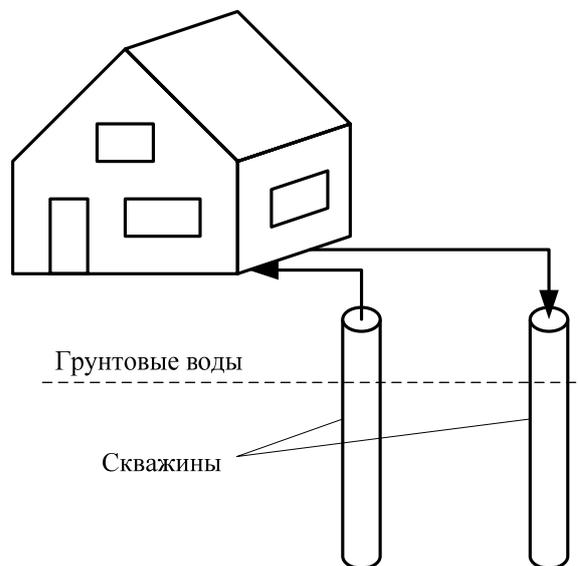


Рис. 2. Открытая система теплоснабжения

Открытые системы чаще используются для тепло- или хладоснабжения крупных зданий. К системам отбора теплоты с поверхностных слоев Земли относят и системы, использующие низкопотенциальное тепло открытых водоемов.

Закрытые системы, в свою очередь, делятся на горизонтальные и вертикальные.

В горизонтальных системах с использованием промежуточного теплоносителя грунтовой теплообменник устраивается, как правило, рядом со зданием на небольшой глубине, не подверженной промерзанию. Использование горизонтальных грунтовых теплообменников ограничено размерами имеющейся площадки.

Горизонтальные грунтовые аппараты обычно представляют собой отдельные трубы, соединенные между собой последовательно в виде плоского змеевика (рис. 3, а) или параллельно с использованием П- или Z-образных коллекторных систем (рис. 3, б). Для экономии площади участка были разработаны усовершенствованные типы теплообменников, например, теплообменники в форме спирали (рис. 3, в).

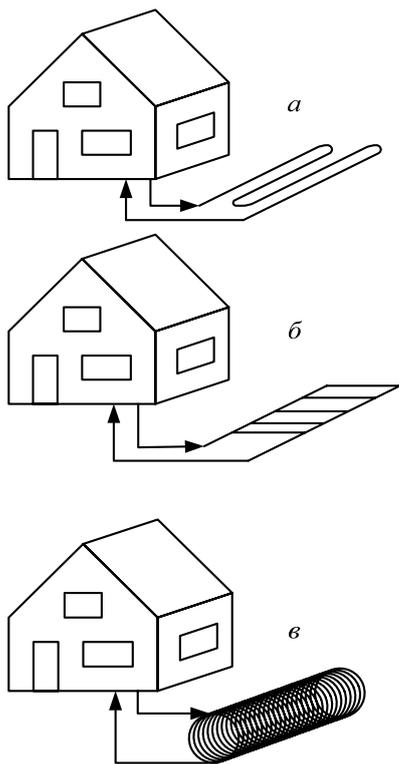


Рис. 3. Виды горизонтальных
грунтовых теплообменников

Вертикальные грунтовые теплообменники позволяют использовать тепловую энергию грунтового массива, лежащего ниже зоны температурных колебаний, вызванных неравномерностью поступления солнечной энергии (15–20 м от уровня земли). Системы с вертикальными грунтовыми теплообменниками не требуют участков большой площади [3]. При этом могут достигаться более высокие температуры теплоносителя от источника низкой температуры грунта на выходе из теплообменника.

Как правило, используется два типа вертикальных грунтовых теплообменников:

- U-образный теплообменник из труб с расположением в одной или двух (реже трех) скважинах таких конструкций;

- коаксиальный (труба в трубе).

Частным случаем вертикальных закрытых систем является использование в качестве грунтовых теплообменников строительных конструкций, например, термосвай – фундаментных свай с замоноличенными трубопроводами. Вид такой системы приведен на рис. 4 [3].

Такая конструкция является перспективной, прежде всего, благодаря тому, что монтаж грунтового теплообменника и установка свай здания являются одной и той же операцией, что позволяет снизить затраты на строительномонтажные работы в отличие от отдельного монтажа ГТО.

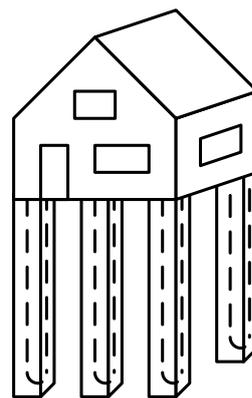


Рис. 4. Схема грунтовых теплообменников,
замоноличенных в фундаментные сваи

Грунтовой теплообменник может непосредственно выполнять функции испарителя, который включается в контур теплового насоса [1]. За счет этого могут достигаться более высокие температуры насыщения и давления рабочего вещества и, таким образом, более высокие коэффициенты преобразования, чем в случае систем с промежуточным контуром. К преимуществам таких систем также относится отсутствие циркуляционного насоса.

Однако здесь также существуют определенные недостатки: узкий диапазон допустимых для надежной работы температур грунта; большая стоимость, вызванная применением более качественных материалов для теплообменника; опасность утечки хладагента непосредственно в грунтовой массив; необходимость более квалифицированного персонала при установке и эксплуатации грунтового теплообменника.

Режимы работы ГТО. Трансформатор тепла может работать как комбинированное устройство в реверсивном режиме нагрева или охлаждения. Тогда в отопительный период он работает в качестве теплового насоса и массив грунта является источником теплоты, и через грунтовой теплообменник производится отведение ее от грунта и преобразование в цикле теплового насоса. При эксплуатации теплообменника в этом режиме температура грунта может с течением времени падать, что приводит к снижению коэффициента преобразования. В теплый период года за счет поступления солнечной энергии и энергии недр земли температура грунта восстанавливается до исходного значения.

Если в летнее время года возникает необходимость в кондиционировании помещений, то массив грунта может рассматриваться как хороший теплоприемник, а трансформатор тепла будет работать в режиме холодильной машины. При этом в грунтовой теплообменнике происходит передача теплоты, отводимой

от кондиционируемого помещения, к массиву грунта. Это является преимуществом в сравнении с воздушным конденсатором, применяемым в большинстве современных кондиционеров, так как с уменьшением температуры теплоприемника растет холодильный коэффициент. При эксплуатации грунтового теплообменника в этом режиме температура грунта с течением времени растет, что приводит к уменьшению коэффициента трансформации. В течение холодного периода года за счет медленного охлаждения почвы температура грунта восстанавливается до своего исходного значения.

Очевидно, что реверсивный режим работы наиболее эффективный, так как возрастает нагрузка устройства и в окружающую среду не сбрасывается теплота, отведенная от кондиционируемого помещения, а используется частично в виде полезной теплоты для нагрева помещения в отопительный период.

Моделирование работы ГТО. Для оценки работы ГТО была использована следующая модель. В качестве ГТО использовался плоский односторонний змеевик (рис. 3, а). На внешней стенке трубы принимались граничные условия 1-го рода, а именно температура наружной стенки ГТО соответствовала температуре прилегающего грунта. С внутренней стороны задаются расход теплоносителя и его температура на входе для заданного теплового потока, соответствующая мощности испарителя теплового насоса.

Теплоперенос в аппарате описывается системой уравнений

$$\begin{aligned} Q &= Gc_p(t'' - t'), \\ Q &= \alpha F(t_c - t_n), \\ Q &= R^{-1}F(t_r - t_c), \end{aligned} \quad (4)$$

где Q – тепловой поток, Вт; G – массовый расход теплоносителя, кг/с; c_p – удельная теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг·К); t'' – температура потока на выходе из ГТО, К; t' – температура потока на входе в ГТО, К; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); F – площадь теплообмена, м²; t_c – температура внутренней стенки ГТО, К; t_n – средняя температура потока, К; R – термическое сопротивление стенки трубы ГТО, м²·К/Вт; t_r – температура грунта (наружной стенки трубы), К.

Система уравнений (4) дополняется уравнениями подобия для расчета коэффициента теплоотдачи в зависимости от режима течения потока:

– при развитом турбулентном течении ($Re > 10000$):

$$Nu = 0,021Re^{0,8}Pr^{0,43}\left(\frac{Pr}{Pr_c}\right)^{0,25}, \quad (5)$$

– вязкостно-гравитационном режиме ($Re < 2300$, $GrPr > 5 \cdot 10^5$):

$$Nu = 0,15(RePr)^{0,33}(GrPr)^{0,1}\left(\frac{Pr}{Pr_c}\right)^{0,25} \quad (6)$$

– вязкостном режиме ($Re < 2300$, $GrPr < 5 \cdot 10^5$):

$$Nu = 3,66\left(\frac{\mu}{\mu_c}\right)^{0,14}, \quad (7)$$

– переходном режиме ($2300 < Re < 10000$):

$$Nu = 0,008Re^{0,9}Pr^{0,43}\left(\frac{Pr}{Pr_c}\right)^{0,25}, \quad (8)$$

где Nu – число Нуссельта; Re – число Рейнольдса; Pr – число Прандтля при средней температуре потока; Pr_c – число Прандтля при температуре поверхности стенки; Gr – число Грасгофа; μ – динамическая вязкость при температуре потока, Па·с; μ_c – динамическая вязкость при температуре стенки, Па·с.

Численное исследование проводится в следующем порядке. Вначале путем решения системы уравнений (4) методом последовательных приближений с использованием замыкающих уравнений подобия (5)–(8) и физических свойств теплоносителя проводится конструкторский расчет и находится требуемая поверхность теплообмена аппарата для заданного типоразмера канала. Затем выполняется исследовательский расчет, в результате которого выясняется влияние режимных условий эксплуатации на эффективность аппарата.

Результаты исследования. Исследуется грунтовой теплообменник с тепловым потоком 10 кВт, выполненный в виде плоского змеевика из стальной трубы 38×2 мм, уложенный в грунт. Расчетная температура грунта 5°C, температуры теплоносителя на входе и выходе ГТО составляют соответственно – 1 и 3°C. В качестве теплоносителя используется 38,8%-ный водный раствор этиленгликоля [5].

Для заданных условий необходимая длина трубы змеевика составила 20,7 м. В дальнейшем исследовании использовался данный теплообменник.

При эксплуатации ГТО из-за постоянного отведения теплоты может происходить снижение температуры грунта у наружной стенки теплообменника. Это приводит к снижению температурного напора при постоянной температуре теплоносителя на входе и, как следствие, к снижению теплового потока ГТО. Для количественной оценки влияния температуры грунта на параметры ГТО был проведен расчет.

Результаты расчета даны на рис. 5 и 6, где показана зависимость теплового потока и температуры на выходе из теплообменника от температуры грунта.

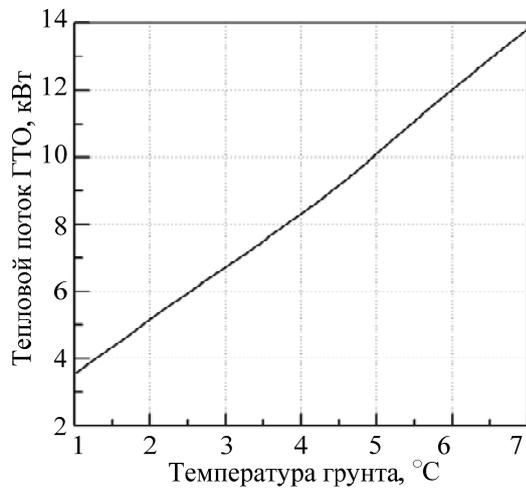


Рис. 5. Влияние температуры грунта на тепловой поток ГТО

Видно, что снижение температуры грунта на 1°C приводит к уменьшению теплового потока примерно на 20%. Также от изменения температуры грунта существенно зависит температура на выходе ГТО, уменьшение которой приводит к снижению коэффициента преобразования теплового насоса, с испарителем которого связан ГТО.

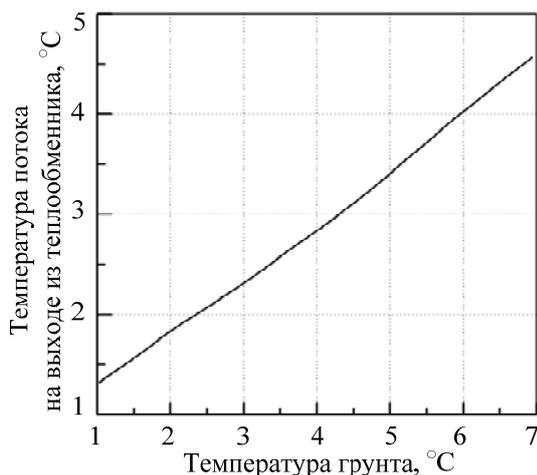


Рис. 6. Влияние температуры грунта на температуру потока на выходе из ГТО

Поддержание постоянной мощности ГТО при снижении температуры грунта в течение периода эксплуатации теплового насоса может быть достигнуто путем регулирования массового расхода теплоносителя.

На рис. 7 представлены результаты расчета значения требуемого массового расхода при различных температурах грунта для теплового потока аппарата 10 кВт. В расчете использовался исследуемый ранее ГТО.

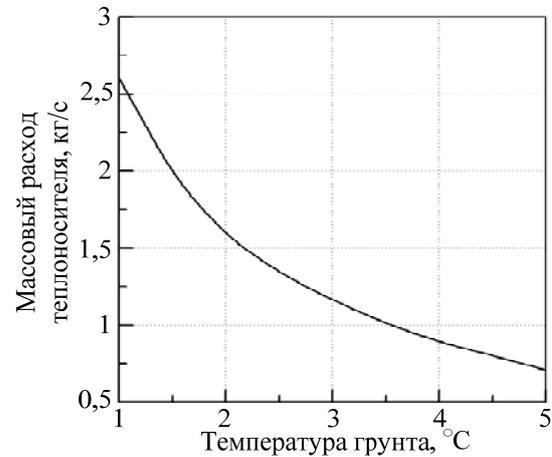


Рис. 7. Изменение расхода теплоносителя от температуры грунта при постоянном тепловом потоке ГТО

При таком количественном способе регулирования температура теплоносителя на выходе ГТО остается практически постоянной, а следовательно, и коэффициент преобразования теплового насоса останется тем же, что и при работе в номинальном режиме.

В течение эксплуатации ГТО может изменяться потребность в тепловой энергии системы теплоснабжения. Это может быть достигнуто также изменением расхода теплоносителя. На рис. 8 и 9 представлены результаты расчета теплового потока и температуры теплоносителя на выходе из ГТО для этого случая.

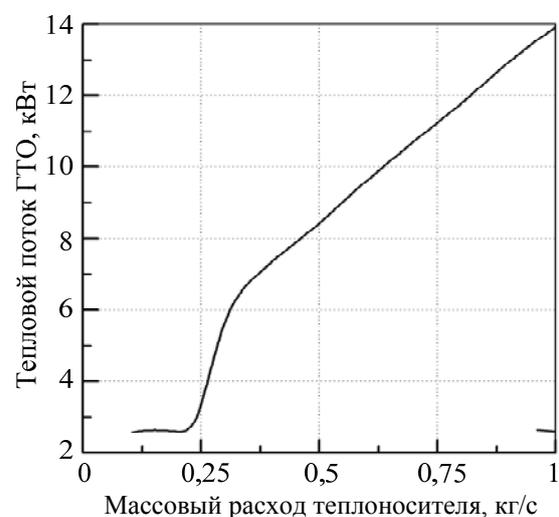


Рис. 8. Влияние расхода теплоносителя на тепловой поток ГТО

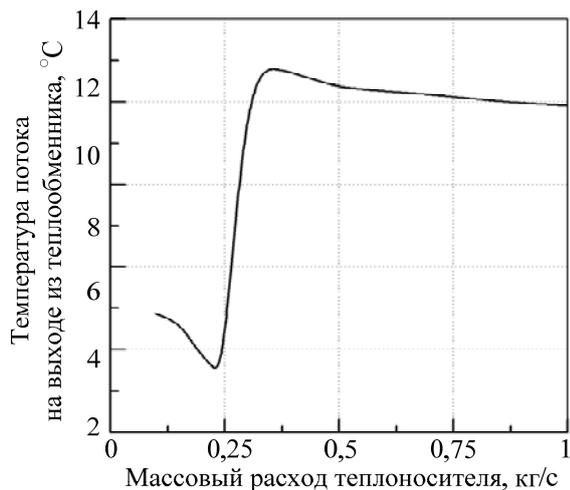


Рис. 9. Влияние расхода теплоносителя на температуру на выходе из ГТО

Видно, что в результате уменьшения расхода теплоносителя может изменяться его режим течения от переходного к ламинарному, что приводит к существенному изменению тепловой нагрузки ГТО. Этот фактор необходимо учитывать при эксплуатации теплонасосной системы теплоснабжения.

В случае использования в качестве источника теплоты грунтовых вод требуется уточнение метода расчета с учетом особенностей их фильтрации и расположения. Некоторые подходы к их моделированию приводятся в [4].

Заключение. В результате проведенного анализа работы грунтовых теплообменников

тепловых насосов установлено, что снижение температуры грунта с 7 до 1°С приводит к уменьшению его теплового потока до 3 раз, что обусловлено в том числе режимом течения потока. Поддержание требуемого теплового потока в системе теплоснабжения здания может быть достигнуто регулированием расхода теплоносителя.

Литература

1. Ramming, K. Bewertung und Optimierung ober flächennaher Erdwärmekollektoren für verschiedene Lastfälle: Dissertation ... Doktoringenieur / K. Ramming. – TU Dresden, 2007. – 149 s.
2. Строительная климатология: СНиП 23-01-99. – Введ. 1999.11.06. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 67 с.
3. Геотермальные теплонасосные системы теплоснабжения зданий и сооружений [Электронный ресурс.] – Москва, 2010. – Режим доступа: http://www.insolar.ru/lib_7.php. – Дата доступа: 20.10.2010.
4. Васильев, Г. П. Теплоснабжение зданий и сооружений с использованием тепловой энергии поверхностных слоев Земли / Г. П. Васильев. – М.: Издательский дом «Граница», 2006. – 176 с.
5. Бажан, П. И. Справочник по теплообменным аппаратам / П. И. Бажан, Г. Е. Каневец, В. Е. Селиверстов. – М.: Машиностроение, 1989. – 367 с.

Поступила 28.02.2011