

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

УДК 628.81

С.А. АНДРЕЕВ, В.И. ЗАГИНАЙЛОВ, Е.А. ФЛЕГОНТОВ

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева

Т.В. ИВАНОВА

Академия Государственной противопожарной службы МЧС России

ИМПУЛЬСНЫЙ РЕЖИМ ПОДКЛЮЧЕНИЯ ГРУНТОВЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ В ТЕПЛОНАСОСНЫХ ОТОПИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Использование тепловых насосов в автономных отопительных системах является прогрессивным приемом экономии сырьевых и энергетических ресурсов. В качестве первичного источника энергии в таких системах успешно применяют теплоту земли, извлекаемую с небольшой глубины с помощью грунтовых теплообменников. При интенсивной эксплуатации теплонасосных отопительных систем возможно переохлаждение грунта, что вызывает ряд экологических проблем. Для предотвращения этого явления предлагается извлекать тепловую энергию земли с помощью нескольких теплообменников при их поочередном подключении к испарительному контуру теплового насоса. Такой метод отбора теплоты позволяет не только избежать переохлаждения грунта, но также повысить производительность процесса. На основе анализа уравнения динамики нагрева теплоносителя сделан вывод об эффективности импульсного режима подключения теплообменников. При реализации предлагаемого метода нагрев очередной порции теплоносителя осуществляется в условиях наибольшей разности температур, что позволяет заметно интенсифицировать процесс. Доказано, что эффективность импульсного режима возможна при наличии уже двух или нескольких теплообменников. Установлено, что продолжительность подключения каждого грунтового теплообменника в импульсном режиме не должна достигать продолжительности переходного процесса нагрева теплоносителя при традиционном способе отбора теплоты.

Ключевые слова: отопительная система, тепловой насос, грунтовый теплообменник, импульсный режим подключения.

При выборе источников теплоты для автономных отопительных систем проектировщики все чаще обращаются к низкопотенциальным энергоресурсам, сосредоточенным в окружающем воздухе, в водоемах и в поверхностных слоях земли. Низкопотенциальную тепловую энергию обычно извлекают с помощью теплообменников, а затем направляют в промежуточный контур для прогрева хладагента [1]. Этот хладагент циркулирует между испарителем и конденсатором теплового насоса, где нагревается до относительно высоких температур и прогревает теплоноситель, подаваемый в замкнутый контур системы отопления. По такой схеме, например, работает отопительная система с грунтовым источником теплоты (рис. 1) [2]. Тепловая энергия

грунта передается теплоносителю (воде или спирто-содержащему раствору), находящемуся в грунтовом теплообменнике 1. Далее по замкнутому трубопроводу 2 прогретый теплоноситель поступает в тепловой насос 3, в испарителе 4 которого он нагревает хладагент, переходящий в газообразную фазу. Компрессор 5 создает повышенное давление, и в конденсаторе 6 хладагент снова превращается в жидкость, отдавая свою тепловую энергию воде. Отработавший хладагент через редукционный клапан 7 вновь поступает в испаритель 4, и процесс повторяется. Вода, нагретая до 40°...50°С, выходит из теплового насоса 3 и по замкнутому трубопроводу 8 подается к отопительным приборам 9. Проходя по контуру системы отопления, вода остывает и перед

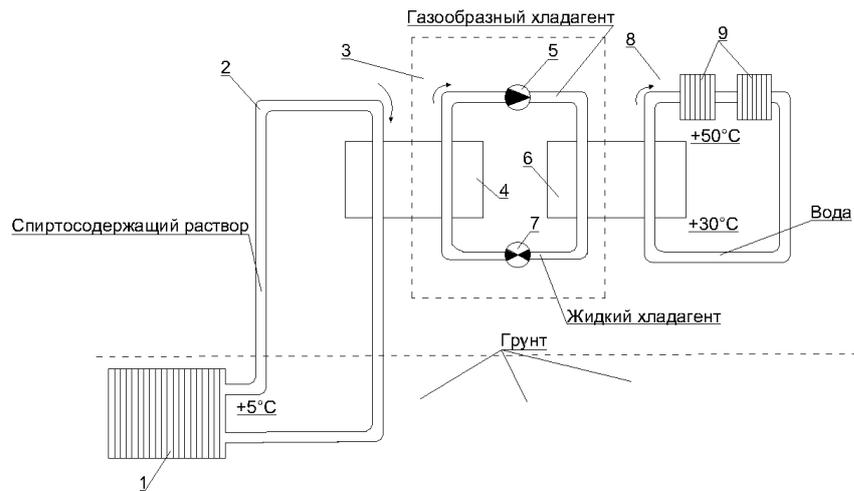


Рис. 1. Функциональная схема теплонасосной отопительной системы, использующей тепловую энергию грунта

входом в теплообменник конденсатора 6 имеет температуру порядка 30°C.

Теплонасосные отопительные системы характеризуются высоким КПД, долговечностью и практически не требует обслуживания [3]. Вместе с тем при широком использовании таких систем начинают проявляться некоторые довольно серьезные проблемы. Одна из них обусловлена тем, что при интенсивном отборе теплоты из грунта последний охлаждается слишком сильно. С такой ситуацией мы часто сталкиваемся в секторе индивидуального жилищного строительства. Располагая небольшим земельным участком, пользователь стремится к максимальному использованию его площади: разместить жилой дом, гараж, хозяйственные постройки, сад, огород. Под землей, на этой же территории, устанавливаются грунтовые теплообменники. При этом, желая достичь максимальной экономии эксплуатационных затрат, пользователь по возможности увеличивает их размеры и количество (рис. 2).

Вместе с тем скорость притока тепловой энергии из недр земли ограничена. При всей неисчерпаемости геотермальных ресурсов теплопроводящие свойства грунта не позволяют использовать эти ресурсы сколь угодно быстро. В результате таких попыток тепловой баланс нарушается, температура грунта быстро падает, и возникают следующие проблемы:

- не выдерживается экологическое равновесие, следствием чего является снижение численности микроорганизмов, населяющих поверхностный слой грунта и участвующих в формировании почвы;
- повышается риск гибели деревьев и других растений, произрастающих в месте расположения грунтовых теплообменников в зимний период, по-

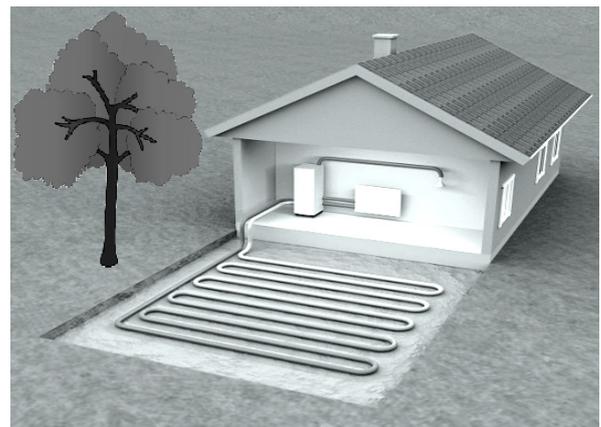


Рис. 2. Пример расположения грунтовых теплообменников в составе теплонасосной отопительной системы

скольку корневая система вынуждена функционировать в экстремальном режиме;

- неестественное промерзание грунта требует проведения реконструкции фундаментов и дренажных сооружений ранее построенных зданий;
- чрезмерное уменьшение температуры грунта, а вместе с ней – температуры низкопотенциального теплоносителя в грунтовых теплообменниках – влечет за собой снижение эффективности отопительной системы; при значительном уменьшении температуры низкопотенциального теплоносителя работоспособность системы может быть утрачена.

Уменьшение потребления теплоты за счет сокращения расхода теплоносителя не всегда приво-

дит к желаемому результату, поскольку в этом случае мощность грунтового теплообменника используется неполностью. Кроме того, снижение расхода низкопотенциального теплоносителя определяет режим теплопередачи при относительно постоянной пониженной температуре, в то время как наибольшей эффективности теплопередачи от грунта к низкопотенциальному теплоносителю внутри грунтового теплообменника можно было бы достичь при более высоких температурах.

Решение проблемы может быть достигнуто за счет размещения в грунте нескольких (двух, трех и более) теплообменников на достаточном расстоянии друг от друга. Отбор теплоты от этих теплообменников следует осуществлять не одновременно, а с определенной периодичностью. Управление отбором теплоты легко реализуется поочередным подключением теплообменников к промежуточному контуру прогрева хладагента теплового насоса.

Рассмотрим последовательность работы теплонасосной отопительной системы, содержащей три грунтовых теплообменника. В начальный момент к теплому насосу подключен один (первый) грунтовый теплообменник. По мере отбора тепловой энергии температура грунта в окрестности первого теплообменника будет уменьшаться, а температура теплоносителя – расти. При этом два других (второй и третий) теплообменника остаются в отключенном состоянии. Через некоторое время происходит отключение первого теплообменника и подключение второго. Очень важно, чтобы за время подключения первого теплообменника температура циркулирующего в нем теплоносителя не достигла установившегося значения. Далее происходит уменьшение температуры грунта в окрестности второго теплообменника, а в окрестности первого теплообменника она начинает естественным образом увеличиваться. После некоторого снижения температуры в окрестности второго теплообменника он отключается, а третий теплообменник подключается. Далее цикл повторяется. Интересно, что при работе отопительной системы по описанному принципу удастся не только предотвратить переохлаждение грунта, но также снять большее количество тепловой энергии с тех же теплообменников за то же время, чем при традиционном способе.

Докажем справедливость этого предположения на основе анализа уравнения динамики нагрева теплоносителя [4]. В общем случае это уравнение имеет вид:

$$dQ_1 = dQ_2 + dQ_3, \quad (1)$$

где dQ_1 – подводимая теплота, Дж; dQ_2 – теплота, затраченная на изменение температуры теплоносителя, Дж; dQ_3 – потери теплоты в окружающую среду, Дж.

Поскольку теплообменник находится под землей, то собственно у него потерь в окружающую среду нет – окружающая среда (т.е. грунт), наоборот, нагревает теплообменник. Но под слагаемым

dQ_3 мы понимаем потери теплоты в той части трубопровода с низкопотенциальным теплоносителем, которая находится вне грунта.

Слагаемые уравнения (1) можно представить так:

$$dQ_1 = Pdt,$$

где P – подводимая тепловая мощность, Вт; dt – интервал времени, с;

$$dQ_2 = mcdv,$$

где m – масса нагреваемого теплоносителя, кг; c – теплоемкость теплоносителя, Дж/кг·град; v – текущая температура теплоносителя, град;

$$dQ_3 = kF(v - v_0)dt,$$

где k – коэффициент теплопередачи, Вт/м²·град; F – поверхность теплопередачи (поверхность труб вне грунта), м²; v_0 – температура окружающей среды, град.

Тогда уравнение (1) может быть представлено как:

$$Pdt = mcdv + kF(v - v_0)dt. \quad (2)$$

После несложных преобразований это уравнение запишется следующим образом:

$$\frac{mc}{kF} \cdot \frac{dv}{dt} - \left[\frac{P}{kF} - (v - v_0) \right] = 0. \quad (3)$$

Введем параметр постоянной времени, обозначив $\frac{mc}{kF} = T$.

Тогда

$$T \cdot \frac{dv}{dt} - \left[\frac{P}{kF} - (v - v_0) \right] = 0$$

или

$$T \cdot \frac{dv}{dt} - \frac{P}{kF} + v - v_0 = 0. \quad (4)$$

С учетом обозначения суммы $v_0 + \frac{P}{kF}$ символом $v_{уст}$ выражение (4) можно записать в виде

$$T \frac{dv}{dt} + v - v_{уст} = 0. \quad (5)$$

Символ $v_{уст}$ обозначает установившееся значение температуры теплоносителя, достигаемое при прекращении изменения, т.е. при выполнении условия

$$\frac{dv}{dt} = 0.$$

Выражение (5) представляет собой дифференциальное уравнение первого порядка, решением которого является $v = v_{нач} e^{-t/T} + v_{уст} (1 - e^{-t/T})$, (6)

где $v_{нач}$ – начальная температура теплоносителя (температура в начале процесса нагрева при $t = 0$).

Графическое изображение этого решения представлено на рисунке 3. Граничные значения температуры теплоносителя могут быть записаны в виде условий: $v = v_{нач}$ при $t = 0$ и $v = v_{уст}$ при $t \rightarrow \infty$.

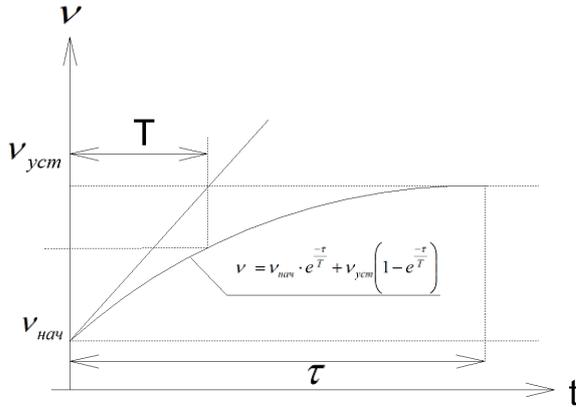


Рис. 3. Графическое представление зависимости температуры теплоносителя от времени

Вернемся к выражению (1). Для дальнейшего доказательства нас будет интересовать слагаемое dQ_2 . Как было указано выше, $dQ_2 = mcdv$. Но теперь у нас есть выражение (6) для расчета значений текущей температуры в функции времени. Для получения сомножителя dv продифференцируем выражение (6) по dt :

$$dv = d \left[v_{нач} \cdot e^{-\frac{t}{T}} + v_{уст} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \right] = \left[-\frac{1}{T} e^{-\frac{t}{T}} \cdot v_{нач} - \left(-\frac{1}{T} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T}} \cdot v_{уст} \right] \cdot dt = \frac{1}{T} \cdot e^{-\frac{t}{T}} (v_{уст} - v_{нач}) \cdot dt. \quad (7)$$

Таким образом,

$$dQ_2 = mc \cdot \frac{1}{T} \cdot e^{-\frac{t}{T}} (v_{уст} - v_{нач}) \cdot dt. \quad (8)$$

Для определения количества теплоты Q_2 найдем первообразную функцию от выражения (8):

$$Q_2 = \int mcdt = \frac{mc}{T} (v_{уст} - v_{нач}) \cdot \int e^{-\frac{t}{T}} dt = \frac{mc}{T} (v_{уст} - v_{нач}) \cdot (-T) \cdot e^{-\frac{t}{T}} = mc (v_{нач} - v_{уст}) \cdot e^{-\frac{t}{T}}. \quad (9)$$

Произведем сравнение количества тепловой энергии, переданной низкопотенциальному теплоносителю по традиционному непрерывному нагреву от начальной $v_{нач}$ до установившейся $v_{уст}$ температуры за время от 0 до τ , и количество теплоты, переданное по рекомендуемому способу импульсного нагрева от начальной температуры $v_{нач}$ до температуры, которую примет теплоноситель в

результате нагрева за время от 0 до $1/3\tau$. Обозначим первое количество теплоты символом $Q_2^{(1)}$, второе – символом $Q_2^{(2)}$.

В результате расчета будем иметь:

$$Q_2^{(1)} = \int_0^{\tau} dQ_2 = mc (v_{нач} - v_{уст}) \cdot \left(e^{-\frac{\tau}{T}} - 1 \right). \quad (10)$$

$$Q_2^{(2)} = 3 \int_0^{\frac{\tau}{3}} dQ_2 = 3mc (v_{нач} - v_{уст}) \cdot \left(e^{-\frac{\tau}{3T}} - 1 \right). \quad (11)$$

Для сравнения значений $Q_2^{(1)}$ и $Q_2^{(2)}$, полученных по выражениям (10) и (11), соответственно найдем их разность:

$$Q_2^{(2)} - Q_2^{(1)} = 3mc (v_{нач} - v_{уст}) \cdot \left(e^{-\frac{\tau}{3T}} - 1 \right) - mc (v_{нач} - v_{уст}) \cdot \left(e^{-\frac{\tau}{T}} - 1 \right) = mc (v_{нач} - v_{уст}) \cdot \left(3e^{-\frac{\tau}{3T}} - 3 - e^{-\frac{\tau}{T}} + 1 \right) = mc (v_{нач} - v_{уст}) \cdot \left(3e^{-\frac{\tau}{3T}} - e^{-\frac{\tau}{T}} - 2 \right). \quad (12)$$

Сомножители $mc > 0$ и $v_{нач} - v_{уст} < 0$. Для справедливости неравенства $Q_2^{(2)} > Q_2^{(1)}$ необходимо, чтобы $Q_2^{(2)} - Q_2^{(1)} > 0$. Последнее неравенство будет соблюдаться при условии $\left(3e^{-\frac{\tau}{3T}} - e^{-\frac{\tau}{T}} - 2 \right) < 0$.

Обозначим $e^{-\frac{\tau}{3T}} = x$, тогда $e^{-\frac{\tau}{T}} = x^3$.

Запишем последнее неравенство с учетом принятых обозначений: $3x - x^3 - 2 < 0$, или $x^3 - 3x + 2 > 0$. Поскольку $x_1 = 1$ является корнем сформированного кубического многочлена, то можно записать:

$$(x-1) \cdot (x^2 + x - 2) > 0 \text{ или } (x-1) \cdot (x-1) \cdot (x-2) > 0.$$

Произведение первых двух скобок можно свернуть:

$$(x-1)^2 \cdot (x-2) > 0. \quad (13)$$

Решением неравенства (13) служит множество $x \in (-2; 1) \cup (1; \infty)$.

Исключая значение $x \neq 1$ и принимая во внимание, что $x = e^{-\frac{\tau}{3T}}$, запишем:

$$e^{-\frac{\tau}{3T}} \neq 1, e^{-\frac{\tau}{3T}} \neq e^0, -\frac{\tau}{3T} \neq 0 \text{ и } \tau \neq 0.$$

Так как $e^{-\frac{\tau}{3T}} > -2$, то при любом действительном значении τ (кроме $\tau = 0$) и с учетом того, что τ (время) всегда положительно, можно сделать вывод о выполнении неравенства $Q_2^{(2)} > Q_2^{(1)}$.

Полученное доказательство позволяет утверждать, что подключение теплообменников в теплонасосной отопительной системе в импульсном режиме с энергетической точки зрения более рационально. Объем тепловой энергии, снятой с трех поочередно подключаемых грунтовых теплообменников, оказывается большим, чем при использовании одного теплообменника в течение того же времени [5]. Если традиционный способ нагрева теплоносителя происходил в соответствии с графиком на рисунке 3, то импульсный режим предполагает нагрев трех независимых порций теплоносителя от начальной температуры $v_{нач}$ до значения в конечный момент подключения теплообменника. Графически нагрев теплоносителя в импульсном режиме проиллюстрирован на рисунке 4.

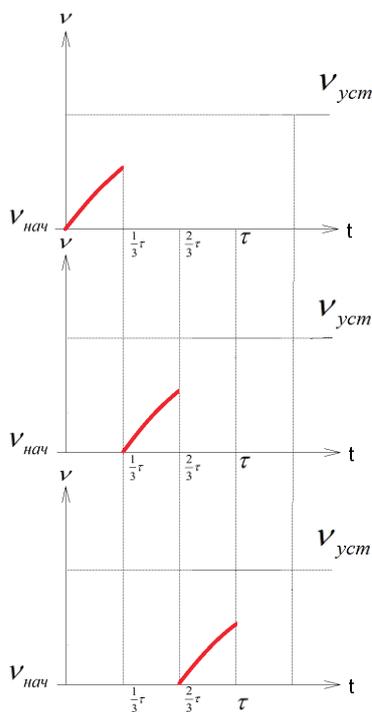


Рис. 4. Динамика нагрева теплоносителя при подведении тепловой энергии в импульсном режиме

Кроме того, ввиду ограничения продолжительности нагрева теплоносителя грунт в окрестности теплообменников не успевает охладиться до недопустимо низкой температуры. Последнее обстоятельство способствует сохранению работоспособности отопительной системы в зимний период и снижает риск появления экологических проблем.

Выводы

1. Во избежание утраты работоспособности теплонасосной отопительной системы в холодное время года, а также с целью исключения нарушения экологического равновесия вследствие чрезмерного переохлаждения грунта отбор теплоты от грунтовых теплообменников целесообразно осуществлять поочередно в импульсном режиме.
2. Продолжительность подключения каждого грунтового теплообменника в импульсном режиме не должна достигать продолжительности переходного процесса нагрева теплоносителя при традиционном способе отбора теплоты.

Библиографический список

1. Протосевич А.М. Энергосбережение в системах теплоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха: Учеб. пособие // А.М. Протосевич. Минск: Новое знание; М.: ИНФРА-М, 2015. 286 с.
2. Воздушные тепловые насосы. М.: Издательский центр «Аква-Терм», 2012. 92 с.
3. Рекомендации по оценке эффективности сбора низкопотенциального тепла грунта для целей теплоснабжения зданий. М.: Стройиздат, 1988.
4. Брюханов Ю.Н., Коробко В.И., Мелик-Аракелян А.Т. Основы гидравлики, теплотехники и аэродинамики. М.: ИНФРА-М, 2014. 254 с.
5. Андреев С.А. и др. Система автономного обогрева помещений / Патент РФ на полезную модель № 140455, F24D3/08 (2006/01), заявка № 2013147025 от 22.10.2013, опублик. 10.05.2014, бюлл. № 13.

Андреев Сергей Андреевич – к.т.н., доцент кафедры автоматизации и роботизации технологических процессов имени академика И.Ф. Бородина РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 123557, Москва, Большой Тишинский переулок, д. 2, кв. 61; тел.: 8-906-783-71-60; e-mail: asa-finance@yandex.ru.

Загинайлов Владимир Ильич – д.т.н., профессор кафедры электроснабжения и электротехники имени академика И.А. Будзко РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, Москва, Дмитровское шоссе, д. 22, кв. 34; тел.: 8-903-108-37-37; e-mail: energo-viz@mail.ru.

Иванова Татьяна Владимировна – ст. преподаватель кафедры высшей математики Академии Государственной противопожарной службы МЧС России; 125222, Москва, ул. Дубравная, д. 35, кв. 443; тел.: 8-903-168-19-63; e-mail: drok2@mail.ru.

Флегонтов Евгений Александрович – аспирант кафедры автоматизации и роботизации технологических процессов имени академика И.Ф. Бородина РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 123592, Москва, ул. Маршала Каткуова, д. 20, кв. 339; тел.: 8-926-503-35-76; e-mail: evgeniflegontov@mail.ru.

Статья поступила 5.10.2015

PULSE MODE OF USING GROUND HEAT EXCHANGERS IN PUMP HEATING SYSTEMS

S.A. ANDREYEV, V.I. ZAGINAILOV, E.A. FLEGONTOV

Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev

T.V. IVANOVA

Academy of State Fire Protection Service of Russian Ministry for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (EMERCOM)

The use of heat pumps in the autonomous heating systems is a progressive step towards fuel and power economy. Such systems successfully apply heat earth as a primary energy source. This heat is extracted with the help of ground heat exchangers. Intensive use of pump heating systems may result in ground overcooling causing environmental problems. To prevent this effect the authors suggest extracting heat energy of the Earth with multiple heat exchangers. The heat exchangers are connected to the evaporative heat pump circuit alternately. This heat extraction method allows not only avoiding ground overcooling but also improving the process performance. The efficiency of heat exchanger pulse mode utilization was proved by the analysis of a heat-transfer agent heating dynamics equation. The suggested method implies heating of the next coolant portion in conditions of the greatest temperature difference. This provides for significant intensification of the process. It is proved that the pulse mode efficiency is possible if at least two or more heat exchangers are employed. It is found that the length of each ground heat exchanger connection in a pulse mode should not exceed the length of a transition process of heating a heat-transfer agent in a conventional method of heat extraction.

Key words: heating system, heat pump, ground heat exchangers, pulse connection mode.

References

1. Protosevich A.M. Energoberezhnie v sistemakh teplosnabzheniya, ventilyatsii i konditsionirovaniya vozdukh: Ucheb. posobie (Energy savings in heating, ventilation and air conditioning: Study manual) // A.M. Protosevich. Minsk: New knowledge; M.: INFRA-M, 2015. 286 p.
2. Vozdushnye teplovye nasosy (Air heat pumps). M.: Publishing center «Aqua-Therm». 2012. 92 p.
3. Rekomendatsii po otsenke effektivnosti sbora nizkopotentsial'nogo tepla grunta dlya tseyey teplokhladosnabzheniya zdaniy (Recommendations for

the evaluation of the effectiveness of collecting the heat of low potential la soil for the purpose of building heat and cold). M.: Stroyizdat, 1988.

4. Bryukhanov Y.N., Korobko V.I., Melik-Arakelyan A.T. Osnovy gidravliki, teplotekhniki i aerodinamiki (Basics of hydraulics, heat engineering and aerodynamics). M.: INFRA-M, 2014. 254 p.

5. Andreyev S.A. and others. System of independent space heating / RF patent for utility model number 140455, F24D3 / 08 (2006/01), application number 2013147025 from 10.22.2013, publ. 05.10.2014, Bull. № 13.

Sergey A. Andreyev – PhD (Eng), Associate Professor, Technology Automation and Robotics Department named after academics I.F. Borodin, Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev; 123557, Moscow, Bolshoy Tishinskiy per., 2, apt. 61; phone: 8-906-783-71-60; e-mail: asa-finance@yandex.ru.

Vladimir I. Zaginailov – PhD (Eng), Professor, Power Supply and Electrical Engineering Department named after academics I.A. Budzko, Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev; 127550, Moscow, Dmitrovskoye shosse, 22, apt. 34; phone: 8-903-108-37-37; e-mail: energoviz@mail.ru.

Tatiana V. Ivanova – Senior Lecturer, Higher Mathematics Department, Academy of State Fire Protection Service of Russian Ministry for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (EMERCOM); 125222, Moscow, Dubravnyaya ul., 35, apt. 443; phone: 8-903-168-19-63; e-mail: drok2@mail.ru.

Evgeny A. Flegontov – Postgraduate Student, Technology Automation and Robotics Department named after academics I.F. Borodin, Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev; 123592, Moscow, Marshala Katukova ul., 20, apt. 339; phone: 8-926-503-35-76; e-mail: evgeniflegontov@mail.ru.

Received on October 5, 2015