

А.А. ЦЫНАЕВА**Е.А. ЦЫНАЕВА****ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОПОТРЕБЛЕНИЕМ**

RESEARCH OF AUTOMATIC HEAT CONTROL SYSTEMS

Работа посвящена исследованию систем автоматизированного управления теплопотреблением зданий. В качестве метода исследования применен расчетно-теоретический метод с использованием теории дифференциальных уравнений, теории автоматического регулирования, методов анализа и синтеза, в том числе численный эксперимент. Проведено сравнение характеристик системы автоматизированного управления теплопотреблением зданий, использующих тепловой насос от низкопотенциального источника теплоты, а также традиционные системы, получающие тепловую энергию от ТЭЦ по тепловым сетям. Численное исследование выполнено для условий осенне-весеннего периода, так как при исследовании системы теплопотребления с тепловым насосом в качестве низкопотенциального источника теплоты выбрана окружающая среда. Проведен анализ климатических условий начала отопительного периода в 2014 и 2015 гг. для Самары. На основании проведенного численного исследования выявлено, что для осенне-весеннего периода автоматизированная система теплопотребления здания с тепловым насосом имеет меньшую инерционность, чем традиционная система.

Ключевые слова: системы управления теплопотреблением, теория автоматического регулирования, моделирование, тепловой насос

Введение

В период экономического кризиса и действия ограничивающих санкций актуальным вопросом является разработка оригинальных энергосберегающих эффективных решений при производстве [1, 2], потреблении энергоресурсов [3-6]. Так как значительная доля теплоты, вырабатываемая на тепловых станциях, направляется на отопительные нужды, важной задачей является использование эффективных решений в области систем производства и потребления тепловой энергии, теплопотребления зданий, в том числе с использованием низкопотенциальных источников теплоты или возобновляемых источников энергии [7-11]. Изменение температуры

This paper deals with automatic control systems of heat consumption of buildings. As a method of study we used computational and theoretical method using the theory of differential equations, control theory, methods of analysis and synthesis, including the numerical experiment. In this paper, a comparison of the characteristics of an automated heat control system in buildings, using the heat pump from the low-grade heat source, as well as conventional systems, receiving heat from the CHP for heat networks. Numerical study carried out for conditions of autumn-spring period, as during the research of heat system, the environment is selected as the low-grade heat source. Moreover, It is analysed climatic conditions start of the heating period in 2014 and 2015. for the city of Samara. Based on the numerical investigation revealed that for the autumn-spring period automated heat system with a heat pump has a lower inertia than a conventional system with.

Keywords: heat consumption control system, automatic control theory, modeling, heat pump

окружающей среды имеет динамический характер [12], поэтому одним из энергосберегающих решений для сокращения потребления теплоты на нужды теплоснабжения жилых и общественных зданий может быть использование автоматизированных систем теплопотребления. Такие системы открывают возможности эффективного использования поступающей на нужды отопления теплоты, позволяют реализовывать режимы переменного теплопотребления в выходные и праздничные дни. Особый интерес вызывают системы автоматизированного управления теплопотреблением [5] с тепловым насосом [8-11], использующим низкопотенциальные источники теплоты (теплота грунта, воздуха, сбро-

сов и стоков) [6-8, 13]. Поэтому в статье рассмотрены автоматизированные системы управления теплоснабжением зданий с традиционным и низкопотенциальным источником теплоты.

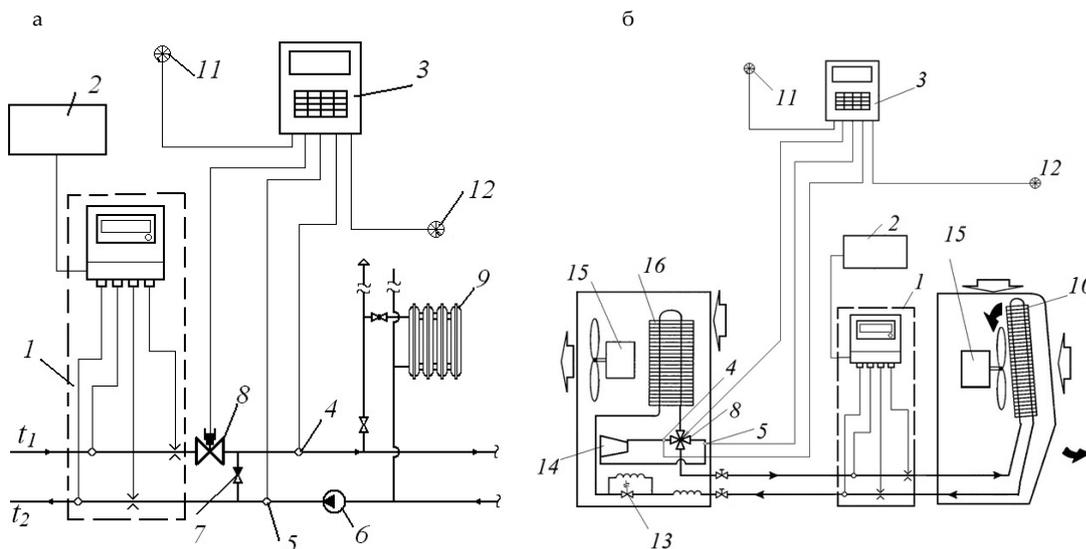
Автоматизированные системы управления теплоснабжением и условия их эксплуатации

Для разработки математической модели с целью исследования различных систем теплоснабжения необходимо рассмотреть их внутреннюю структуру. Рис. 1 иллюстрирует схемные решения для автоматизированных систем управления теплоснабжением зданий. Здесь приведены два основных типа систем: 1) автоматизированные системы управления теплоснабжением зданий от традиционного источника теплоты [5-7] через тепловые сети; 2) автоматизированные системы управления теплоснабжением зданий от низкопотенциального источника теплоты (теплота наружного воздуха) через тепловой насос.

Система (см. рис. 1, а) работает следующим образом. Теплоноситель (горячая вода) поступает из подающей магистрали централизованной системы теплоснабжения с температурой t_1 . Далее производится смешение теплоносителя с температурой t_1 и теплоносителя из обратной магистрали с температурой t_2 . Полученный теплоноситель направляется в отопительную систему здания. Регулирование параметров теплоносителя для подачи в систему отопле-

ния осуществляется регулирующим устройством 8. В традиционной отопительной системе используются конвективные отопительные приборы. В осенний и весенний периоды применение системы наиболее экономически целесообразно, так как температура окружающей среды, как правило, не достигает отрицательных значений. Однако экономия теплоты осуществляется в основном у потребителя тепловой энергии, при этом на ТЭЦ сохраняются затраты на водоподготовку и подогрев сетевой воды. В этой связи возникает необходимость использования весной и осенью других источников теплоты, в том числе низкопотенциальных.

В системе (см. рис. 1, б) на нужды отопления используется теплота от низкопотенциального источника, в качестве которого использована теплота окружающей среды. Рабочим телом (теплоносителем) в такой системе является низкотемпературный хладагент (например, фреон R410A). Подогрев воздуха в помещении осуществляется за счет прокачки воздуха вентилятором через теплообменник поверхностного типа, в котором греющим агентом выступает фреон. Система работает как тепловой насос, передающий теплоту от низкопотенциального источника к потребителю (в помещение). Особенность системы заключается в том, что для снижения давления низкотемпературного хладагента используется не дроссельный клапан, а капиллярная трубка. При этом регулирование работы системы осуществляется регулирующим устройством 8, в качестве кото-

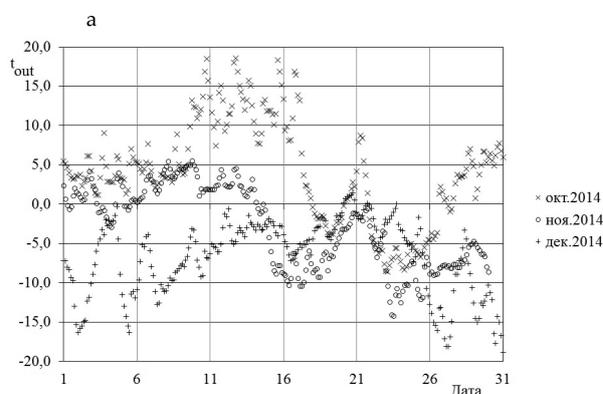


рого применен четырехходовой клапан. Работоспособность автоматизированной системы управления теплотреблением с тепловым насосом зависит от характеристик низкотемпературного хладагента и параметров низкопотенциального источника теплоты (температуры окружающей среды). Из-за особенностей конструкции система функционирует в качестве теплового насоса при температуре наружного воздуха до минус 5 °С. То есть ее применение ограничивается осенним или весенним периодами. Таким образом, наибольший интерес при эксплуатации систем теплотребления вызывают осенний и весенний периоды.

В качестве внешних воздействий при эксплуатации автоматизированных систем управления теплотреблением (см. рис. 1) следует рассматривать температуру наружного воздуха и параметры теплоносителя (в системе с тепловым насосом характеристики хладагента), поступающего от источника теплоты.

Отопительный период можно разделить по уровню температур окружающего воздуха на два этапа: период с достаточно высокими температурами (от плюс 5 до минус 5 °С), период с низкотемпературными температурами окружающей среды (от минус 5 до минус 30 °С для г. Самары). Климатические условия за октябрь, ноябрь и декабрь 2014 и 2015 гг. приведены на рис. 2 по данным архива погоды [12].

Анализируя архив климатических условий (см. рис. 2), следует отметить достаточно высокую неравномерность распределения температуры по времени суток и в течение месяца. При этом температура наружного воздуха оказалась достаточно низкой и требует наличия отопления. Среднемесячная температура наружного воздуха в октябре 2014 г. в Самаре составила плюс 4,3 °С, в ноябре – минус 2,6 °С, в декабре – минус 6,7 °С; для 2015 г. в октябре среднемесячная температура достигла плюс 3,5 °С, в ноябре – минус 0,4 °С.



Численное исследование

Неравномерность колебаний температуры наружного воздуха, непрерывное изменение температуры греющего теплоносителя требует решения задачи моделирования автоматизированных систем теплотребления в динамической постановке. Система теплотребления здания с автоматизированной системой управления, использующая тепловую энергию от централизованной системы теплоснабжения или от низкопотенциального источника теплоты, состоит из звеньев с различной инерционностью. Для проведения анализа необходимо отразить взаимодействие наиболее инерционных элементов системы: здания, отопительной установки, регулирующего устройства.

Поэтому разработана математическая модель для моделирования динамических режимов работы. Здание рассматривается в виде объекта с сосредоточенными параметрами, принято допущение, что коэффициент теплопередачи ограждающих конструкций величина постоянная. Математическая модель включает в себя уравнения по расчету температуры теплоносителя в централизованной системе теплоснабжения (при использовании ТЭЦ), уравнения характеристик работы теплового насоса (при использовании низкопотенциального источника теплоты), уравнения амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристики автоматизированной системы управления теплотреблением, динамическое уравнение взаимодействия инерционных элементов системы. Последнее уравнение получено на основании энергетического баланса отапливаемого помещения для двух случаев: 1) при использовании теплоты от централизованного источника теплоснабжения; 2) за счет теплоты низкопотенциального источника, передаваемой тепловым насосом.

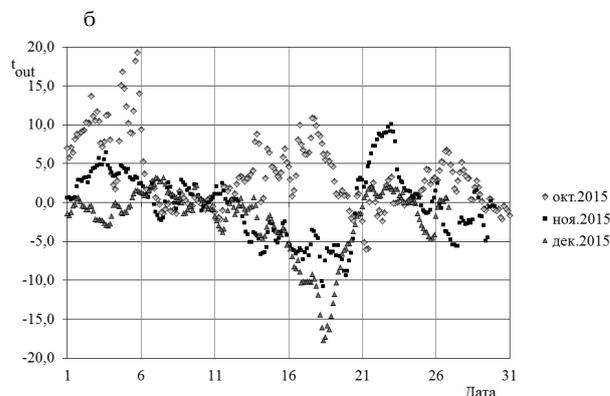


Рис. 2. Внешние климатические условия: а – 2014 г.; б – 2015 г.

Динамическое уравнение отапливаемого помещения записывается в виде (1). Вид уравнения (1) соответствует ситуации поступления теплоты от централизованного источника теплоты [13–15]:

$$\rho_{in} \cdot c_p V \frac{dt_{in}}{d\tau} = k_h \cdot F_h (1 - k_v - k_{fl}) \cdot [(t_1 g + t_2 (1 - g)) - t_{in}] - k \cdot F \cdot (t_{in} - t_{out}) - c_p \cdot G_{inf} \cdot (t_{in} - t_{out}) + Q_s v \zeta \beta_h, \quad (1)$$

где ρ_{in} , c_p — плотность, кг/м³, удельная изобарная теплоемкость воздуха, кДж/(кг·К), соответственно; V — объем помещения, м³; t_{in} , t_{out} — температура воздуха внутри и снаружи помещения соответственно, °С; τ — время, с; k_v — компенсационный коэффициент; k_h — коэффициент теплопередачи для приборов отопления, Вт/(м²·К); F_h — характеристика приборов отопления, м²; t_1 , t_2 — температура теплоносителя в магистралях тепловой сети, в подающей и обратной соответственно, °С; k — коэффициент теплопередачи наружных стен здания, Вт/(м²·К); F — площадь наружных ограждений м²; g — коэффициент подмешивания теплоносителя; G_{inf} — максимальный расход инфильтрующегося воздуха, кг/с; k_{fl} — компенсационный коэффициент теплопотерь через пол; Q_s — теплоступления от солнечной радиации, Вт; v — коэффициент инерционности ограждающих конструкций; ζ — коэффициент эффективности авторегулирования; β_h — коэффициент компенсации дополнительного теплотребления системы отопления.

Динамическое уравнение для системы с тепловым насосом [14,16] запишется в виде:

$$\rho_{in} \cdot c_p V \frac{dt_{in}}{d\tau} = c_p \cdot G_h \cdot (t_h - t_{in1}) \cdot (1 - k_v - k_{fl}) - k \cdot F \cdot (t_{in} - t_{out}) - c_p \cdot G_{inf} \cdot (t_{in} - t_{out}) + Q_s v \zeta \beta_h, \quad (2)$$

где G_h , t_h — расход и температура поступающего в помещение подогретого воздуха °С соответственно; t_{in1} — температура направляемого на подогрев воздуха, °С.

При использовании теплоты от централизованного источника использовались уравнения для расчета температуры теплоносителя:

$$t_1 = t_{in} + \Delta t' \cdot \left(\frac{t_{in} - t'_{out}}{t_{in} - t_{out}} \right)^{0,8} + (\Delta t'_i - 0,5 \Theta') \cdot \left(\frac{t_{in} - t'_{out}}{t_{in} - t_{out}} \right), \quad (3)$$

где $\Delta t'$ — температурный напор в отопительном приборе; t'_{out} — текущая температура наружного воздуха, °С; $\Delta t'_i$ — разница температур между температурой в подающей и обратной магистрали при температуре наружного воздуха $t_{out'}$ °С; $\Theta' = t_3 - t_2$ —

температурный напор отопительного прибора, °С; t_2 — температура теплоносителя в магистрали по возврату воды в источник теплоснабжения, °С.

Температура теплоносителя в магистрали возврата теплоносителя в централизованный источник теплоты определяется по выражению

$$t_2 = t_{in} + \Delta t' \cdot \left(\frac{t_{in} - t'_{out}}{t_{in} - t_{out}} \right)^{0,8} - 0,5 \cdot \Theta' \cdot \left(\frac{t_{in} - t'_{out}}{t_{in} - t_{out}} \right). \quad (4)$$

Переходные характеристики автоматизированной системы управления теплотреблением с централизованным источником теплоты определяются на основе аналитического решения уравнения (1) относительно температуры воздуха в помещении при единичном ступенчатом воздействии температуры окружающей среды. Для системы с тепловым насосом переходные характеристики определяются решением уравнения (2). Единичное изменение температуры наружного воздуха определялось в соответствии с выражением

$$t_{out}(\tau) = (1 - \exp^{-100 \cdot \tau}) \cdot (t_{out} - t_{out1}) + t_{out1} \quad (5)$$

где $t_{out}(\tau)$ — единичное изменение температуры наружного воздуха, °С; τ — время, с; t_{out1} — температура наружного воздуха при пуске отопительного периода, °С.

Постоянная времени T_{01} переходного процесса для автоматизированной системы управления теплотреблением здания (см. рис. 1, а) с теплоснабжением от централизованного источника определяется преобразованием (1) в (6) и записывается в виде

$$\frac{\rho_{in} \cdot c_p V}{k_h F_h (1 - k_v - k_{fl}) + kF + c_p G_{inf} + Q_s v \zeta \beta_h} \frac{dt_{in}}{d\tau} + t_{in} = \frac{\left(\frac{k_h F_h (1 - k_v - k_{fl}) (t_1 g + t_2 (1 - g))}{t_{out}} + kF + c_p G_{inf} + Q_s v \zeta \beta_h \right)}{k_h F_h (1 - k_v - k_{fl}) + kF + c_p G_{inf} + Q_s v \zeta \beta_h}. \quad (6)$$

$$T_{01} = \frac{\rho_{in} \cdot c_p V}{k_h F_h (1 - k_v - k_{fl}) + kF + c_p G_{inf} + Q_s v \zeta \beta_h}. \quad (7)$$

Для автоматизированной системы управления теплотреблением (см. рис. 1,б) с подачей теплоты от теплового насоса постоянная времени T_{02} определяется преобразованием уравнения (2) в выражение

$$T_{02} = \frac{\rho_{in} \cdot c_p \cdot V}{c_p \cdot G_h \cdot (1 - k_v - k_{fl}) + k \cdot F + c_p \cdot G_{inf} + Q_s \cdot v \cdot \zeta \cdot \beta_h}. \quad (8)$$

Относительная температура воздуха внутри помещения при единичном воздействии для систем (см. рис. 1) определяется выражением

$$\tilde{t}_{in} = \frac{t_{in}(\tau) - t_{in}(0)}{t_{in}(\tau') - t_{in}(0)}, \quad (9)$$

где $t_{in}(0)$ – температура внутри помещения в начальный момент времени; $t_{in}(\tau)$ – температура внутри помещения в текущий момент времени τ ; $t_{in}(\tau')$ – температура внутри помещения в момент времени τ' стабилизации температуры соответственно.

Верификация математической модели

Для верификации математической модели использовались исходные данные, аппроксимирующие данные о климатических параметрах наружного воздуха в виде синусоиды с использованием генератора случайных чисел для сохранения случайного характера изменения температуры наружного воздуха. Результаты моделирования температуры воздуха внутри помещения для системы (см. рис. 1, а) показаны на рис. 3.

При проведении тестового эксперимента относительная погрешность по измерениям температуры воздуха в помещении составила $\varepsilon_{in} = \pm 2\%$.

Относительная погрешность для температуры наружного воздуха $\varepsilon_{out} = \pm 1,7\%$. Анализ представленных на рис. 3 результатов показывает адекватность разработанной математической модели. Результаты моделирования в пределах суммарной погрешности эксперимента и расчета достаточно хорошо согласуются с данными эксперимента.

С использованием разработанной математической модели (1) – (9) [17] получены данные, представленные на рис. 4, по переходным характеристикам автоматизированных систем теплоснабжения (см. рис. 1).

Анализ результатов численного моделирования, представленных на рис. 4, показывает, что время переходного процесса в различных системах отличается. При этом из результатов (см. рис. 4) видно, что в системе с тепловым насосом реакция на входное воздействие до 25% меньше, чем в системе, работающей от централизованного источника теплоты.

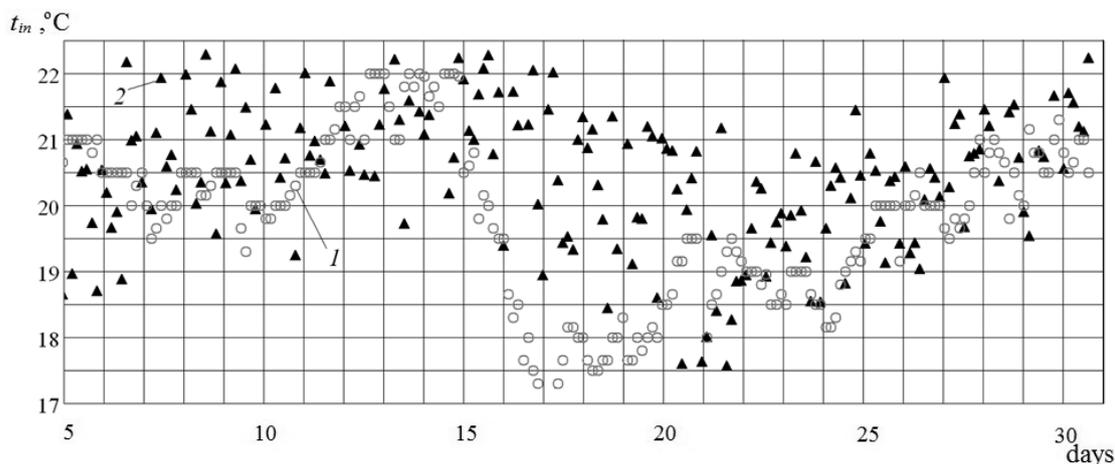


Рис. 3. Результаты сравнения численного и натурального эксперимента с целью верификации математической модели: 1 – экспериментальные данные по температуре внутреннего воздуха в помещении; 2 – результаты моделирования

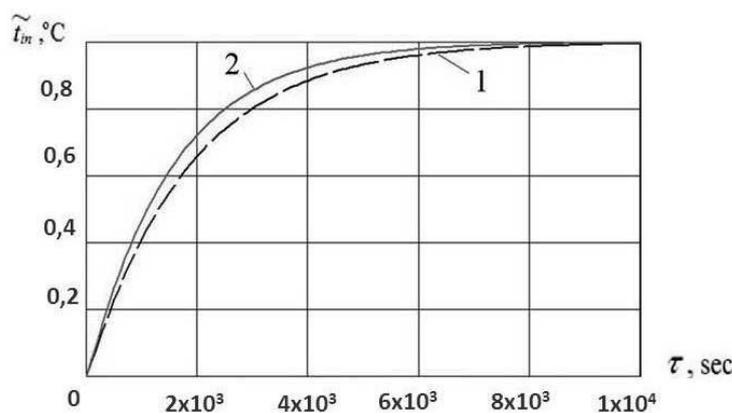


Рис. 4. Переходные характеристики автоматизированных систем управления теплоснабжением: 1 – система с подачей теплоты от централизованного источника; 2 – система с подачей теплоты от теплового насоса

Однако применение системы теплопотребления с тепловым насосом, действующим от теплоты наружного воздуха, ограничивается климатическими условиями (см. рис. 2) и может быть оправдано только для осеннего и весеннего периодов года.

Вывод. Реакция автоматизированной системы теплопотребления с тепловым насосом оказывается до 25 % ниже в условиях эксплуатации при температурах наружного воздуха от плюс 5 до минус 5 °С по сравнению с системой, подключенной к тепловым сетям.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жуховицкий Д.Л., Цынаева А.А., Цынаева Е.А. Пат. 2334912 (2008) Котельная установка.
2. Жуховицкий Д.Л., Цынаева А.А., Цынаева Е.А. Пат. 2334912 (2008) Котельная установка.
3. Цынаева А.А., Орехова Е.В. Пат. 2504723 (2014) Теплообменник типа «труба в трубе».
4. Ковальногов В.Н., Цынаева А.А., Школин Е.В. 2509959 (2014) Система обеспечения микроклимата.
5. Ковальногов В.Н., Цынаева А.А., Цынаева Е.А. 2340834 (2008) Способ выбора места установки регулирующего устройства в автоматизированных системах управления отоплением.
6. Ковальногов В.Н., Ртищева А.С., Цынаева Е.А. Автоматизированная система оптимального управления отоплением учебного заведения // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2007. № 3-4. С. 100–107.
7. Ковальногов В.Н., Цынаева Е.А. Автоматизированная система управления теплопотреблением общежитий УлГТУ // Вестник Ульяновского государственного технического университета. 2006. № 1 (33). С. 56–59.
8. Information on <http://apps1.eere.energy.gov/buildings> (дата обращения: 20.12.2015).
9. Rick T. Olson, Curtis O. Pedersen & Judith S. Lieberman: submitted to Journal of Engineering Optimization (1993) DOI:10.1080/03052159308940968
10. Natthaphon Roonprasang, Pichai Namprakai, Naris Pratinthong: submitted to Journal of Applied Thermal Engineering 29 (2009)
11. Information on <http://infohouse.p2ric.org/ref/19/18986.pdf> (дата обращения: 20.12.2015).
12. URL: <http://tp5.ru/> (дата обращения: 20.12.2015).
13. Ковальногов В.Н., Цынаева Е.А. Влияние параметров температурного графика центрального регулирования отпуска теплоты на эффективность использования автоматизированных систем управления теплопотреблением // Вестник Ульяновского государственного технического университета. 2007. № 1 (37). С. 55–58.
14. Карташова А.О., Кортяева Д.О., Кулясова К.Е., Цынаева А.А. Исследование работы сплит-системы в режиме подогрева (тепловой насос) // Вестник СГА-СУ. Градостроительство и архитектура. 2015. № 1(18). С. 90–99. DOI:10.17673/Vestnik.2015.01.14
15. Цынаева А.А., Цынаева Е.А. Автоматизированные системы управления теплопотреблением // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительные технологии: сборник статей / под ред. М.И. Бальзанникова, К.С. Галицкова, А.К. Стрелкова; СГАСУ. Самара, 2015. С. 321–326.
16. Цынаева А.А., Инчин В.В., Менялкина Е.Н., Шейна В.Ю. Исследование параметров микроклимата помещения при работе сплит-системы в режиме теплового насоса // Вестник Ульяновского государственного технического университета. 2015. № 1 (69). С. 60–64.
17. Цынаева Е.А. Математическое моделирование автоматизированных систем управления теплопотреблением зданий // Порядковый анализ и смежные вопросы математического моделирования: Тезисы докладов XII Международной научной конференции / Владикавказский научный центр Российской академии наук, Южный математический институт, Северо-Осетинский государственный университет имени К.Л. Хетагурова, Южный федеральный университет. 2015. С. 235–236.

Об авторах:

ЦЫНАЕВА Анна Александровна

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции Самарский государственный архитектурно-строительный университет
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194
E-mail: a.tsinaeva@rambler.ru

ЦЫНАЕВА Екатерина Александровна

кандидат технических наук, доцент кафедры тепловой и топливной энергетики Ульяновский государственный технический университет
432027, Россия, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32, тел. 8(8422)77-81-06, 8(8422)77-81-37
E-mail: tsinaeva-kate@rambler.ru

TSYNAEVA Anna A.

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Heat and Gas Supply and Ventilation Chair Samara State University of Architecture and Civil Engineering
443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya st., 194
E-mail: a.tsinaeva@rambler.ru

TSYNAEVA Ekaterina A.

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Department of Thermal and Fuel Energy Ulyanovsk State Technical University
432027, Russia, Ulyanovsk, Severnyi Venets st., 32, tel. 8(8422)77-81-06, 8(8422)77-81-37
E-mail: tsinaeva-kate@rambler.ru

Для цитирования: Цынаева А.А., Цынаева Е.А. Исследование систем автоматизированного управления теплопотреблением // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2016. №2(23). С. 129–134. DOI: 10.17673/Vestnik.2016.02.23.
For citation: Tsinaeva A.A., Tsinaeva E.A. Research of automatic heat control systems // Vestnik SGASU. Town Planning and Architecture. 2016. №2(23). Pp. 129–134. DOI: 10.17673/Vestnik.2016.02.23.