

# Инженерное оборудование зданий и сооружений

УДК 681.52.01

## АДАПТИВНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ ОТОПЛЕНИЯ ЗДАНИЙ

С.В. Панферов, В.И. Панферов

Предложено систему отопления зданий представлять эквивалентным отопительным прибором. Разработаны адаптивные алгоритмы оценки теплотехнических характеристик прибора по экспериментальным данным. Приведены результаты апробации алгоритмов идентификации. Показано, что алгоритмы обладают заметными фильтрующими свойствами и могут быть использованы в составе алгоритмического обеспечения систем управления процессом теплоснабжения.

*Ключевые слова:* адаптивный алгоритм оценки, критерий идентификации, параметры системы отопления, эквивалентный отопительный прибор, коэффициент теплопередачи, температура и расход теплоносителя, влияние помех.

**Введение.** Системы отопления зданий являются сложными техническими устройствами, включающими в реальных условиях, как правило, разнотипные отопительные приборы с различными сроками эксплуатации и, возможно, с неодинаковыми схемами подключения к подводящим и обратным теплопроводам. При этом также следует иметь в виду, что структура и состав этих и так достаточно сложных систем довольно часто меняются, в частности, из-за пожеланий собственников квартир и по другим причинам. В связи с этим непосредственный анализ и отслеживание режимов работы таких систем является весьма трудной задачей. В некоторых случаях, например, при решении задачи синтеза управляющих алгоритмов удобно эту сложную систему представить эквивалентным отопительным прибором. Как это хорошо известно, основными теплотехническими параметрами отопительных приборов являются коэффициент теплопередачи  $k$  и площадь поверхности теплообмена  $F$ . Поэтому для решения задачи эквивалентной замены необходимо разработать процедуры оценки  $k$  и  $F$  по реальным данным. Данная задача рассматривается в настоящей работе.

**Алгоритм оценки параметров первого варианта модели.** Для оценки мощности системы отопления  $W_{CO}$  непосредственно необходимы не отдельные значения параметров  $k$  и  $F$  эквивалентного отопительного прибора, а их произведение  $(kF)_{CO}$ , поэтому рассмотрим задачу оценки именно этого произведения. При этом будем использовать статическую модель системы отопления, представленную следующим уравнением:

$$W_{CO} = (kF)_{CO} (t_{CO} - t_B) / [1 + (kF)_{CO} / (2cG_{CO})], \quad (1)$$

где  $t_{CO}$  – температура воды на входе системы отопления,  $t_B$  – температура внутреннего воздуха,  $c$  – удельная теплоемкость теплоносителя,  $G_{CO}$  – массовый расход воды через систему отопления.

Для упрощения последующих выкладок перепишем это уравнение в виде:

$$(kF)_{CO} = \frac{W_{CO}}{t_{CO} - t_B - \frac{W_{CO}}{2cG_{CO}}}. \quad (2)$$

Нетрудно видеть, что это соотношение может быть записано так:

$$(kF)_{CO} = \frac{cG_{CO} \cdot (t_{CO} - t_{OBR})}{\frac{t_{CO} + t_{OBR}}{2} - t_B}, \quad (3)$$

где  $t_{OBR}$  – температура обратной воды.

Задачу адаптивной идентификации параметра  $(kF)_{CO}$  сформулируем следующим образом. Пусть известна оценка параметра  $(kF)_{COi}$  в  $i$ -й момент времени, пусть, кроме того, для  $(i+1)$ -го момента времени получена новая информация с объекта управления –  $t_{CO(i+1)}, t_{OBR(i+1)}, t_{B(i+1)}, G_{CO(i+1)}$ . Ставится вопрос: как, зная оценку параметра для  $i$ -го момента времени  $(kF)_{COi}$ , по новой информации с объекта управления найти новую улучшенную оценку этого же параметра –  $(kF)_{CO(i+1)}$ ? При этом также понятно, что критерий идентификации должен иметь следующий вид:

$$I_{(i+1)} = \left[ (kF)_{COi} - \frac{cG_{CO(i+1)} \cdot (t_{CO(i+1)} - t_{OBR(i+1)})}{\frac{t_{CO(i+1)} + t_{OBR(i+1)}}{2} - t_{B(i+1)}} \right]^2. \quad (4)$$

## Инженерное оборудование зданий и сооружений

Решая задачу, найдем, что

$$(kF)_{CO(i+1)} = (kF)_{COi} - 2h \cdot [\cdot], \quad (5)$$

где под  $[\cdot]$  понимаются квадратные скобки из (4) со всем своим содержимым, а шаг  $h$  определяется из условия достижения минимума критерия (4) при отсутствии помех, т. е.  $h = 1/2$ .

Если в формулу (5) подставить значение  $h = 1/2$  и раскрыть скобки, то получим, что

$$(kF)_{CO(i+1)} = \frac{cG_{CO(i+1)} \cdot (t_{CO(i+1)} - t_{OBR(i+1)})}{\frac{t_{CO(i+1)} + t_{OBR(i+1)}}{2} - t_{B(i+1)}}, \quad (6)$$

откуда видно, что алгоритм адаптации не имеет памяти, т. е. предыдущие значения параметра  $(kF)_{CO}$  никак не влияют на его последующие значения.

Точно такой же результат был получен и при использовании стандартного подхода [1], когда модель системы отопления представляется следующим образом:

$$W_{CO} = (kF)_{CO} \cdot \left( \frac{t_{CO} + t_{OBR}}{2} - t_B \right). \quad (7)$$

Здесь критерий идентификации записывался так:

$$I_{i+1} = \left[ W_{CO(i+1)} - (kF)_{COi} \times \left( \frac{t_{CO(i+1)} + t_{OBR(i+1)}}{2} - t_{B(i+1)} \right) \right]^2, \quad (8)$$

а последующие значения параметра  $(kF)_{CO(i+1)}$  определялись по соотношению

$$(kF)_{CO(i+1)} = (kF)_{COi} + 2h \cdot [\cdot] \times \left( \frac{t_{CO(i+1)} + t_{OBR(i+1)}}{2} - t_{B(i+1)} \right), \quad (9)$$

только содержимое квадратной скобки уже такое, какое оно в формуле (8), и совсем другое значение шага  $h$ :

$$h = \frac{1}{2 \left( \frac{t_{CO(i+1)} + t_{OBR(i+1)}}{2} - t_{B(i+1)} \right)^2}. \quad (10)$$

Если (10) подставить в (9), то получим тот же результат, что ранее был указан формулой (6), только при этом следует учесть, что  $W_{CO(i+1)} = cG_{CO(i+1)} \cdot (t_{CO(i+1)} - t_{OBR(i+1)})$ , для определения этой величины может быть использован либо теплосчетчик, установленный на тепловом пункте здания, либо нужно использовать показания расходомера и датчиков температуры прямой и обратной воды в системе отопления.

Для уменьшения влияния помех (погрешностей измерения  $t_{CO}, t_{OBR}, t_B, G_{CO}$ ) можно использовать известный прием, т. е. включать перед данным алгоритмом адаптации параметра  $(kF)_{CO}$  алгоритм фильтрации в виде инерционного звена

первого порядка [2]. Однако возможно и применение подхода работы [1]: это за счет введения в формулу для  $h$  некоторого параметра  $\mu$ , уменьшающего размер коррекции идентифицируемого параметра за один шаг, например,  $h$  вычислять по формуле

$$h = \frac{1}{2\mu \left( \frac{t_{CO(i+1)} + t_{OBR(i+1)}}{2} - t_{B(i+1)} \right)^2}, \quad (11)$$

где должно быть, что  $\mu \geq 1$ . В этом случае алгоритм адаптации уже не приводится к виду (6), у него появляется «память», как собственно это и записано в соотношениях (5) и (9). При этом заметим, что дать каких-либо общих рекомендаций по выбору параметра  $\mu$  нельзя, требуется доводка, подгонка адаптивного алгоритма к конкретной статистической обстановке, в которой протекает исследуемый процесс.

Для апробации алгоритма (9)–(11) были использованы экспериментальные данные работы [3]. На рис. 1 приведены результаты оценки параметра  $(kF)_{CO}$  с помощью указанного адаптивного алгоритма: для  $\mu = 1$  – кривая 1; для  $\mu = 1,3$  – кривая 2; для  $\mu = 2$  – кривая 3; для  $\mu = 2,5$  – кривая 4. Там же приведена оценка параметра  $(kF)_{CO}$ , найденная неадаптивным методом наименьших квадратов, по формуле

$$(kF)_{CO} = \frac{\sum_{i=1}^N W_{COi} \times \Delta t_{COi}}{\sum_{i=1}^N (\Delta t_{COi})^2}. \quad (12)$$

Это горизонтальная прямая 5, для нее  $(kF)_{CO} = 12733,19$  Вт/К.

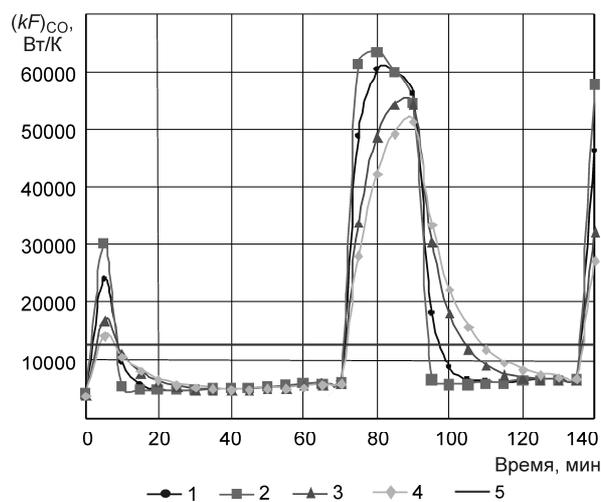


Рис. 1. Отслеживание параметра  $(kF)_{CO}$

Как видно из рис. 1, при  $\mu = 1$  для участков времени, для которых режим работы системы отопления можно отнести к условно стационарному, алгоритм дает, как нам представляется, достаточно правдоподобные оценки. Вместе с тем, для участков времени, когда режим работы становится отчетливо нестационарным, достоверность оценок параметра  $(kF)_{CO}$  не является очевидной. По-видимому, здесь вся причина заключается в том, что используется не динамическая, а статическая модель системы отопления, так как понятно, что при резком изменении мощности системы отопления, в частности, при ее увеличении вследствие инерционности параметр  $\Delta t_{CO} = \frac{t_{CO} + t_{OBR}}{2} - t_B$  не успевает изменяться в соответствии с соотношением (7), поэтому и получаются достаточно неточные, заметно завышенные оценки параметра  $(kF)_{CO}$ . Таким образом, для общего случая необходима разработка динамической модели системы отопления. Разработанные же алгоритмы пригодны для оценки параметра  $(kF)_{CO}$  по данным стационарного или же близкого к нему режимов работы системы отопления. С увеличением численного значения параметра  $\mu$  оценки  $(kF)_{CO}$  начинают меняться заметно медленнее, размеры скачков уменьшаются, все это, в общем-то, и следовало ожидать. Оценка параметра  $(kF)_{CO}$ , найденная неадаптивным методом наименьших квадратов (прямая 5), также не учитывает инерционные свойства системы отопления и получается заметно отличной от того значения, которое следовало бы ожидать для данных стационарного режима. Отметим, однако, что причиной существенной нестационарности рассматриваемого процесса на отдельных его участках являются не столько реальные условия эксплуатации систем отопления, сколько желание автора работы [3] изучить особенности применения двухпозиционных регуляторов, экспериментальные данные получены именно для этих условий.

**Алгоритм оценки параметров второго варианта модели.** Следует заметить, что коэффициент теплопередачи  $k$  как отдельного отопительного прибора, так и, очевидно, и всей системы отопления зависит от температурного напора, который для всей системы отопления, как известно, вычисляется следующим образом:  $\Delta t_{CO} = \frac{t_{CO} + t_{OBR}}{2} - t_B$ . Разработанный адаптивный алгоритм идентификации комплексного параметра  $(kF)_{CO}$  предназначен для отслеживания вообще-то любых изменений этого параметра, в том числе и в зависимости от температурного напора. Нет никаких оснований сомневаться в том, что, в частности, последняя задача будет успешно решаться.

Аргументы для этого следующие: во-первых, тепловой режим зданий имеет достаточно большую инерционность, постоянная времени  $T_B$  зданий составляет порядка 30 и более часов, во-вторых, все-таки нельзя считать, что температура наружного воздуха меняется слишком резко, обычно различают только дневную и ночную температуры наружного воздуха, т. е. считается, что  $t_H$  меняется только два раза за сутки, в-третьих, температура теплоносителя в тепловой сети корректируется только один раз в сутки (как нам представляется, в основном из-за первых двух причин). Поэтому можно утверждать, что в реальных условиях температурный напор системы отопления  $\Delta t_{CO} = \frac{t_{CO} + t_{OBR}}{2} - t_B$  будет меняться достаточно медленно и, вследствие этого  $(kF)_{CO}$  также будет изменяться медленно, что и позволит эффективно отработать это изменение.

Тем не менее, все-таки учтем, что коэффициент теплопередачи эквивалентного отопительного прибора (система отопления здания может быть представлена эквивалентным отопительным прибором) вообще-то зависит от температурного напора  $\Delta t_{CO} = \frac{t_{CO} + t_{OBR}}{2} - t_B$ , в этом случае модель системы отопления будет представляться следующим уравнением:

$$W_{CO} = (mF)_{CO} (\Delta t_{CO})^{n+1}. \quad (13)$$

Применим к уравнению (13) следующее линеаризирующее преобразование: сначала прологарифмируем обе его части, а затем введем нижеуказанные обозначения:

$$\ln(W_{CO}) = \ln(mF)_{CO} + (n+1) \cdot \ln(\Delta t_{CO}); \quad (14)$$

$$y = \ln(W_{CO}); a = \ln(mF)_{CO}; b = (n+1); x = \ln(\Delta t_{CO}).$$

В этом случае уравнение (13) запишется в виде  $y = a + bx$ , задача параметрической идентификации этого уравнения достаточно хорошо проработана, известны как неадаптивный, так и адаптивный алгоритмы идентификации [1]. В частности, адаптивный алгоритм представляется следующими соотношениями:

$$a_{i+1} = a_i + 2h \cdot [\cdot]; \quad (15)$$

$$b_{i+1} = b_i + 2h \cdot [\cdot] \cdot x_{i+1}; \quad (16)$$

$$[\cdot] = y_{i+1} - a_i - b_i x_{i+1}; \quad (17)$$

$$h = \frac{1}{2(1 + x_{i+1}^2)}. \quad (18)$$

Здесь также для уменьшения влияния помех следует ввести параметр  $\mu$  в формулу (18), которая в этом случае запишется уже в следующем виде:

$$h = \frac{1}{2(\mu + x_{i+1}^2)}, \quad (19)$$

где также должно быть, что  $\mu \geq 1$ .

Подчеркнем, однако, что адаптивный алгоритм (15)–(19) может оказаться недостаточно эффективным из-за малой вариабельности (разнообразия) экспериментальных данных для оценки двух параметров  $(mF)_{CO}$  и  $n$  [1], повлиять на эту ситуацию нельзя, так как сбор данных ведется в условиях нормальной эксплуатации системы отопления. Когда же оценивается только один параметр  $(kF)_{CO}$ , то проблема малой вариабельности экспериментальных данных уже не является критической.

На рис. 2 и 3 приведены результаты применения алгоритма (15)–(19) для оценки параметров  $(mF)_{CO}$  и  $n$  соответственно при  $\mu = 1$ . При этом заметим, что оценки параметров  $(mF)_{CO}$  и  $n$ , найденные при  $\mu = 1,3; 2; 2,5$ , оказались практически теми же, что и при  $\mu = 1$ . Произошло это, по всей видимости, из-за того, что в формуле (19)  $x_{i+1}^2 \gg \mu$ , поэтому для использования привычного диапазона изменения параметра  $\mu$  формулу для  $h$  модифицировали и стали использовать в следующем виде:

$$h = \frac{1}{2\mu(1+x_{i+1}^2)}. \quad (20)$$

На рис. 4 и 5 приведены результаты применения алгоритма уже с  $h$ , вычисляемым по формуле (20), для  $\mu = 1$  и для  $\mu = 2$ . Как видно из рис. 4 и 5, фильтрующие свойства алгоритма при  $\mu > 1$  начинают проявляться достаточно заметно.

Вместе с тем, следует, однако, признать, что оценки параметра  $n$  (ее отрицательные значения) не кажутся правдоподобными. Тем не менее, если учесть, что  $(kF)_{CO} = (mF)_{CO} \cdot (\Delta t_{CO})^n$  и подставить в эту формулу при  $\mu = 1$  данные из рис. 4 и 5 и  $\Delta t_{CO}$ , соответствующие данному моменту времени, то полученное значение будет практически совпадать с тем, что приведено на рис. 1, когда параметр  $(kF)_{CO}$  оценивался непосредственно по экспериментальным данным, а не через оценки  $(mF)_{CO}$  и показатель  $n$ . Все это изображено на рис. 6, на котором приведены результаты оценки параметра  $(kF)_{CO}$ : кривая 1 – когда  $(kF)_{CO}$  оценивался непосредственно; кривая 2 – когда

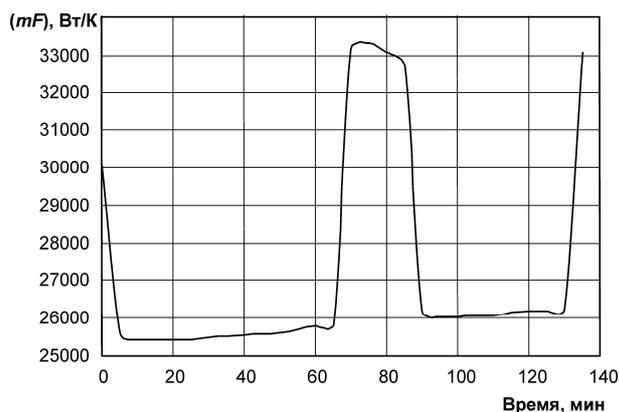


Рис. 2. Отслеживание параметра  $(mF)_{CO}$

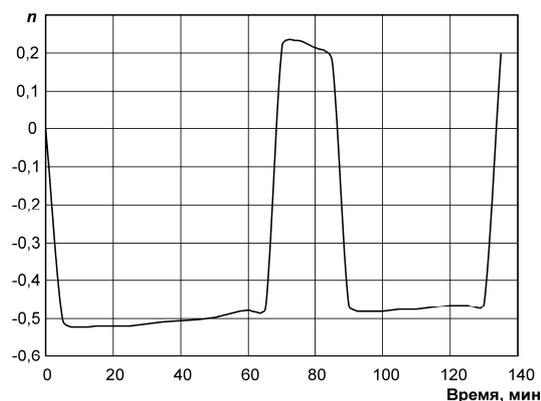


Рис. 3. Отслеживание параметра  $n$

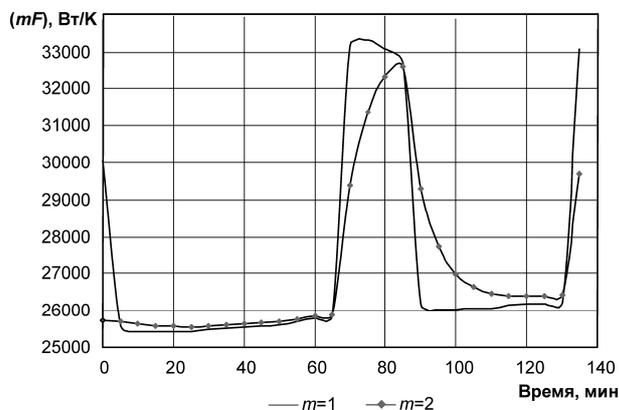


Рис. 4. Отслеживание параметра  $(mF)_{CO}$

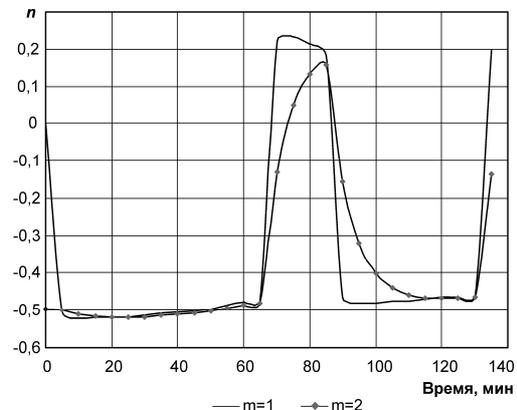


Рис. 5. Отслеживание параметра  $n$

при  $h = \frac{1}{2\mu(1+x_{i+1}^2)}$

при  $h = \frac{1}{2\mu(1+x_{i+1}^2)}$

$(kF)_{CO}$  вычислялся по оценкам параметров  $(mF)_{CO}$  и  $n$ .

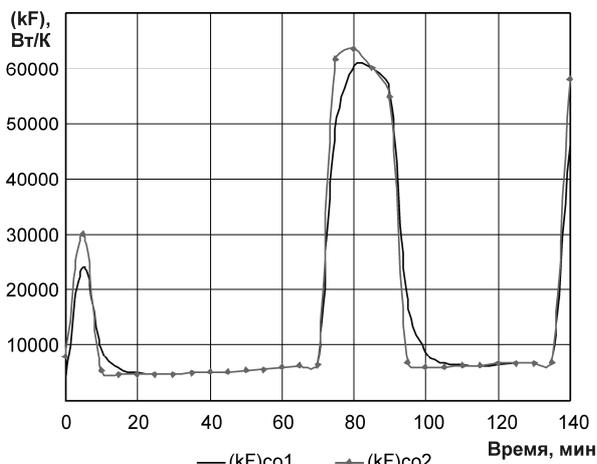


Рис. 6. Оценки параметра  $(kF)_{CO}$

Поэтому, как мы и ожидали, нет большой необходимости в определении отдельных показателей  $(mF)_{CO}$  и  $n$ .

Относительно того, что оценки параметра  $n$  не кажутся правдоподобными можно отметить следующее. Возможно, что таким образом проявляется то, что используются только статические модели системы отопления. Возможно также и то,

что задача оценки не решается однозначно либо кратность «прогонки» экспериментальных данных через адаптивный алгоритм не достаточна. Очевидно, необходимо дополнительное исследование свойств алгоритма совместной оценки параметра  $(mF)_{CO}$  и показателя  $n$ .

**Выводы.** Разработаны и апробированы два варианта алгоритмов оценки теплотехнических характеристик систем отопления, представляемых эквивалентным отопительным прибором, по экспериментальным данным. Установлено, что алгоритмы обладают заметными фильтрующими свойствами и могут быть использованы в составе алгоритмического обеспечения систем управления процессом теплоснабжения.

#### Литература

1. Растринин, Л.А. *Современные принципы управления сложными объектами* / Л.А. Растринин. – М.: Сов. радио, 1980. – 232 с.
2. Панферов, С.В. *Адаптивный алгоритм оценки гидравлических сопротивлений элементов теплоэнергетических систем* / С.В. Панферов, В.И. Панферов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2013. – Т. 13. – № 1. – С. 67–70.
3. Гершкович, В.Ф. *Динамика изменения параметров отопительной системы при позиционном регулировании* / В.Ф. Гершкович // Новости теплоснабжения. – 2002. – № 11. – С. 42–44.

**Панферов Сергей Владимирович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплогасоснабжение и вентиляция», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), tgsiv@mail.ru.

**Панферов Владимир Иванович**, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Теплогасоснабжение и вентиляция», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), tgsiv@mail.ru.

Поступила в редакцию 12 февраля 2014 г.

**Bulletin of the South Ural State University  
Series "Construction Engineering and Architecture"  
2014, vol. 14, no. 2, pp. 33–38**

## ADAPTIVE IDENTIFICATION OF PARAMETERS FOR HEATING SYSTEMS IN BUILDINGS

*S.V. Panferov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, tgsiv@mail.ru,*

*V.I. Panferov, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, tgsiv@mail.ru*

It's proposed to consider a heating system as an equivalent heating appliance. Adaptive algorithms to assess thermal performance of the device according to experimental data are developed. The results of testing of identification algorithms are given in the article. It is shown that algorithms have filtering properties and can be used as part of algorithmic provision of control systems with heat supply.

*Keywords: adaptive algorithm of evaluation, identification criterion, parameters of heating system, equivalent heating appliance, heat transfer coefficient, temperature and coolant flow, interference effect.*

### References

1. Rastrigin L.A. *Sovremennye principy upravlenija slozhnymi ob#ektami* [Modern Principles of Control of Complex Objects]. Moscow, Sov. radio, 1980, 232 p.
2. Panferov S.V., Panferov V.I. [Adaptive Algorithm for Estimation of Hydraulic Resistance of the Elements of Heat Transportation Systems]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*, 2013, vol. 13, № 1, pp. 67–70. (in Russ.)
3. Gershkovich V.F. Dynamics of changes in the parameters of the heating system with position control [Dinamika izmenenija parametrov otopitel'noj sistemy pri pozicionnom regulirovanii]. *Novosti teplosnabzhenija* [News of heat supply]. 2002, № 11, pp. 42–44.

*Received 12 February 2014*