

Исследование регулируемых параметров в автоматизированных климатических системах в целях энергосбережения

К.т.н., доцент О.Д. Самарин;
аспирант И.И. Тищенкова,*

ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет»

Ключевые слова: энергосбережение; тепловой баланс помещения; автоматизированная климатическая система; коэффициент передачи регулятора; режим работы регулятора; энергопотребление

Энергосбережение для России и многих других стран уже давно является чрезвычайно важной проблемой. В настоящее время мы нередко сталкиваемся с дефицитом энергии и ограничениями ее потребления, и в будущем дефицит будет только расти, поэтому вопросы экономии и рационального использования энергетических ресурсов приобретают все большую актуальность и являются приоритетными направлениями в развитии российской экономики.

В конце 2009 года был принят закон №261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты РФ», призванный на федеральном уровне контролировать энергопотребление [1]. Говоря о целях энергосбережения, следует иметь в виду, что оно в любой сфере сводится к уменьшению объема используемых энергетических ресурсов при сохранении соответствующего полезного эффекта от их использования [1, 2].

На сегодняшний день методы энергосбережения отличаются значительным разнообразием, каждая отрасль разрабатывает свои ключевые задачи и решения, направленные на повышение энергетической эффективности. При этом реальными путями сокращения потребления энергии в гражданских зданиях по-прежнему остаются: создание энергосберегающих технологий; применение малозатратных и быстрокупаемых технических решений; совершенствование технологических схем и конструкций систем обеспечения микроклимата; автоматизация систем и инженерного оборудования [3, 4]. Обратим внимание на тот факт, что проблему энергосбережения нужно решать комплексными методами и способами, подобные мероприятия необходимо предусматривать уже на стадии проектирования, применяя новейшие разработки [5 – 7].

Вклад в развитие энергетической эффективности в зданиях и сооружениях строительного комплекса внесли многие ученые. Среди исследований последних лет следует выделить работы [8 – 11]. Очевидно, что в современных условиях необходимо уделять внимание проектированию автоматизированных климатических систем. Следует иметь в виду, что здесь, прежде всего, должны осуществляться меры по снижению тепловой годовой нагрузки на системы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. Такие мероприятия связаны с исследованием вопросов о тепловом режиме помещения и с регулированием мощности систем автоматики.

Рассмотрим в связи с этим совокупность факторов, определяющих тепловую обстановку в помещении, и ряд обстоятельств, которые играют существенную роль в поддержании относительного постоянства температуры при периодически изменяющихся теплоступлениях.

Как известно [12, 13], дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности для одномерного случая выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}. \quad (1)$$

Здесь a , $\text{м}^2/\text{с}$ – коэффициент температуропроводности материала ограждения;
 $a = \lambda/c\rho$, где λ , $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ – теплопроводность материала;
 c , $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ и ρ , $\text{кг}/\text{м}^3$ – соответственно его удельная теплоемкость и плотность.

Чтобы дать полное математическое описание явлениям теплопроводности, к дифференциальному уравнению необходимо добавить условия, которые содержат геометрические, физические, временные и граничные условия [12, 14].

С учетом наблюдающегося в помещениях сочетания конвективного и лучистого теплообмена необходимо использовать смешанные условия II и III рода, характеризующие связь интенсивности теплообмена на поверхности ограждения с градиентом температуры в его массиве. В частности, для внутренней поверхности, если ось x направлена внутрь конструкции, соответствующее выражение можно записать так:

$$-\lambda_{\epsilon} \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)_{\epsilon} = q_{л.\epsilon} + \alpha_{к.\epsilon} (t_{\epsilon} - t_{нов}). \quad (2)$$

Здесь $t_{нов}$ – температура внутренней поверхности ограждения, °С;
 λ_{ϵ} , Вт/(м·К), и $\alpha_{к.\epsilon}$, Вт/(м²·К) – теплопроводность материала у этой поверхности и коэффициент конвективного теплообмена на ней;

t_{ϵ} – температура воздуха в помещении, °С;

$q_{л.\epsilon}$ – плотность лучистого теплового потока, падающего на внутреннюю поверхность, Вт/м². Аналогичное соотношение можно составить и для наружной поверхности, но в этом случае индексы «в» у используемых переменных следует заменить на «н».

Граничное условие IV рода, выражающее непрерывность температурного поля и плотности потока теплоты на стыке материальных слоев внутри конструкции, формулируется следующим образом:

$$t_1(x) = t_2(x); \lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial x}. \quad (3)$$

Здесь t_1 и t_2 – температуры материалов на стыке слоев в точке с координатой x , °С;

λ_1 и λ_2 – теплопроводности материалов соприкасающихся слоев, Вт/(м·К).

Рассматривать процессы теплообмена, осложненные массообменом, в многослойных ограждениях аналитическим путем сложно, поэтому в практике распространены инженерные способы решения задач нестационарной теплопередачи методом конечных разностей и расчеты с использованием ЭВМ [15, 16]. При этом авторами используется смешанная явно-неявная схема повышенной точности [12], позволяющая аппроксимировать порядок $h^4 + \Delta t^2$, где h и Δt – соответственно размер шага по пространственной координате и по времени. В результате чего получены значения температуры по сечению каждой ограждающей конструкции для следующего, $j+1$ -го, временного слоя. После этого новая величина t_{ϵ} определена авторами по формуле (4), следующей из общего уравнения теплового баланса помещения [17]:

$$t_{\epsilon, j+1} = \frac{Q_{к} + Q_{к.кв} + \sum \alpha_{к.\epsilon} F_{м} t_{1, j+1} + (\sum K F_{л} + L c_{\epsilon} \rho_{\epsilon}) t_{н}}{\sum K F_{л} + \sum \alpha_{к.\epsilon} F_{м} + L c_{\epsilon} \rho_{\epsilon}}. \quad (4)$$

Здесь $t_{н}$ – температура наружного воздуха, °С;

L – неорганизованный воздухообмен в помещении, м³/с, т.е. расход инфильтрующегося наружного воздуха;

c_{ϵ} и ρ_{ϵ} – соответственно удельная теплоемкость, Дж/(кг·К) и плотность этого воздуха, кг/м³;

$\sum K F_{л}$, Вт/К – сумма произведений коэффициентов теплопередачи $K_{л}$, Вт/(м²·К), наружных легких ограждений помещения (условно безынерционных, например, окон) на их площади $F_{л}$, м²;

$F_{м}$ – площади массивных ограждений, м²;

$Q_{к}$ и $Q_{к.кв}$ – текущее значение конвективного теплового потока, Вт, от внутренних теплоисточников в помещении и от автоматически регулируемой системы обеспечения микроклимата соответственно. Если данная система создает лучистый тепловой поток, его плотность учитывается в условии (2) дополнительно к потоку от внутренних источников.

Похожие подходы к анализу процессов теплообмена в помещениях среди зарубежных исследований можно встретить, например, в источнике [18]. Отдельные выводы представлены в работах [19–20].

Основным уравнением, связывающим регулируемый параметр – температуру воздуха с возмущающими и регулирующими тепловыми воздействиями, для $Q_{кв}$ (как конвективного, так и лучистого) является [15]:

$$Q_{кв} = -K_{рег} (t_{\epsilon, j} - t_{\epsilon, 0}). \quad (5)$$

По своему физическому смыслу коэффициент передачи $K_{рег}$, Вт/К, показывает в данном случае, на сколько ватт нужно изменять величину $Q_{кв}$ при отклонении t_{ϵ} от уставки $t_{\epsilon, 0}$ на 1 К. Самарин О.Д., Тищенко И.И. Исследование регулируемых параметров в автоматизированных климатических системах в целях энергосбережения

Такое изменение и должна обеспечивать соответствующим образом подобранная система автоматического регулирования.

Если весь тепловой поток от системы обеспечения микроклимата является конвективным, например, когда речь идет о вентиляции, кондиционировании воздуха или воздушном отоплении, после подстановки зависимости (5) в формулу (4), принимая во внимание, что (5) справедливо как для момента времени j , так и для $j+1$, авторы работы [15] получили несколько более простое и прозрачное по форме соотношение:

$$t_{в,j+1} = \frac{Q_{к} + K_{рег} t_{в,0} + \sum \alpha_{к,в} F_{м} t_{1,j+1} + B t_{н}}{K_{рег} + A + B}. \quad (5)$$

Здесь $A = \sum \alpha_{к,в} F_{м}$; $B = \sum K F_{л} + L c_{в} \rho_{в}$, Вт/К.

Иначе говоря, температура воздуха в помещении на шаге $j+1$ получается как средневзвешенная из составляющих, которые отражают влияние всех тепловых потоков, поступающих в помещение и уходящих из него. Это влияние оказывается конвективной частью теплопоступлений $Q_{к}$, а также характеризует остальные тепловые воздействия температурами уставки $t_{в,0}$ (регулирование), поверхностей $t_{1,j+1}$ (конвективный теплообмен) и наружного воздуха $t_{н}$ (теплопередача через «легкие» ограждения и теплопотери на нагрев инфильтрующегося воздуха).

Целесообразно отметить, что задача обеспечения в помещениях здания определенного теплового режима представляет собой организацию взаимодействующих и взаимосвязанных тепловых потоков в сложной архитектурно-конструктивной системе с многообразием составляющих ее элементов ограждающих конструкций и инженерного оборудования, каждый из которых является энергоносителем и энергопередатчиком. При решении задач эффективного использования энергии необходимо уделять внимание не только повышению теплозащитных характеристик конструкций здания, но и техническим решениям, касающимся процесса кондиционирования микроклимата, который неизбежно связан с расходом энергии.

В связи с этим обозначим, что в условиях периодического характера колебаний теплового возмущения из формулы (5) следует:

$$A_{Q_{скв}} = K_{рег} A_{тв}. \quad (6)$$

Здесь $A_{Q_{скв}}$ и $A_{тв}$ – соответственно амплитуды колебаний $Q_{скв}$ и $t_{в}$.

Поэтому, если известна необходимая величина $A_{Q_{скв}}$, требуемое значение $K_{рег}$ может быть вычислено как отношение:

$$K_{рег} = A_{Q_{скв}} / A_{тв}. \quad (7)$$

Здесь $A_{тв}$ принимается по условиям комфортности по ГОСТ 30494-96 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях» или по технологическим требованиям.

По определению [3]:

$$A_{Q_{скв}} = A_{Q_{возм}} K_{асс}. \quad (8)$$

Здесь

$$K_{асс} = A(1 - B \cdot R_{дин}) B_o. \quad (10)$$

Здесь $A_{Q_{возм}}$ – суммарная амплитуда колебаний возмущающего теплового воздействия, Вт, как конвективного, так и лучистого;

$K_{асс}$ – коэффициент ассимиляции переменных теплопоступлений (безразмерный).

$$R_{дин} = \frac{A_{тв} P_{ном}}{A_{Q_{возм}}}, \quad (11)$$

где $R_{дин}$ – динамический коэффициент регулирования систем вентиляции или кондиционирования воздуха (безразмерный);

$P_{ном}$ – показатель теплопоглощения помещения, Вт/К;

A и B – параметры, зависящие в общем случае от применяемого закона регулирования и некоторых других условий.

Самарин О.Д., Тищенко И.И. Исследование регулируемых параметров в автоматизированных климатических системах в целях энергосбережения

При П-законе регулирования можно ориентировочно принимать: при $R_{дин} > 0.75$ $A=1.15$, $B=1$; при $R_{дин} < 0.75$ $A=1$, $B=0.9$. Величина B_o – поправочный коэффициент (также безразмерный) к $K_{асс}$, учитывающий, что доля конвективной составляющей в возмущающем тепловом воздействии $q_k < 1$.

Сопоставление выражений (8) и (9) позволяет установить:

$$K_{рег} = \frac{A_{Q_{ске}}}{A_{тв}} = \frac{A_{Q_{возм}} A (1 - B \cdot R_{дин}) B_o}{A_{тв}} = A \left(\frac{A_{Q_{возм}}}{A_{тв}} - B P_{ном} \right) B_o. \quad (12)$$

Вследствие этого можно предположить, что если по выражению (10) получается $K_{рег} < 0$, это означает, что собственной теплоустойчивости помещения достаточно для поддержания внутренней температуры в заданных пределах и специального автоматического регулирования по отклонению t_b не требуется.

На основе описанного алгоритма были проведены расчеты для П-закона регулирования с помощью созданной программы для ЭВМ на языке программирования Fortran. Соответственно, были получены численные данные и построены графические зависимости, позволяющие проиллюстрировать выводы. Исследования производились для рядового помещения площадью 14 м^2 , теплофизические параметры материальных слоев массивных ограждений которого принимались с учетом рекомендаций СНиП 23-02-2003 «Строительная теплотехника».

Анализ результатов показал, что в помещении действительно наблюдаются нестационарный тепловой режим и определенная динамика тепловых процессов. При этом вследствие работы систем автоматики при различных значениях коэффициента передачи $K_{рег}$ основной параметр – коэффициент ассимиляции переменных тепlopоступлений $K_{асс}$ – возрастает из-за относительного увеличения доли регулирующего воздействия (рисунок 1).

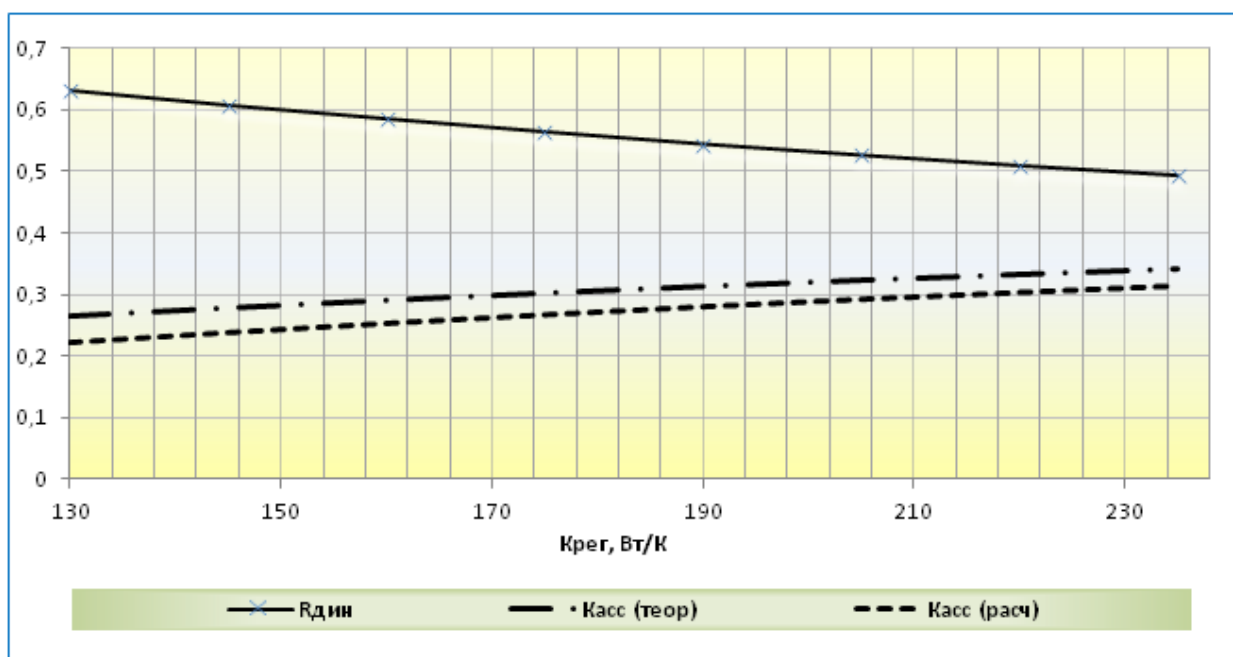


Рисунок 1. Зависимость коэффициентов $R_{дин}$ и $K_{асс}$ от параметра $K_{рег}$

Здесь штрихпунктирной линией изображены данные, полученные по результатам использования численной модели. Пунктирные линии характеризуют результаты аналитического расчета, исходя из заданной амплитуды возмущающего воздействия $A_{Q_{возм}}$ и регулирующего воздействия $A_{Q_{рег}}$ при переходных процессах, происходящих в помещении, с учетом его объемной нелинейности. Погрешность вычисления максимального отклонения при этом не превышает 5-10%, что вполне достаточно для инженерных целей.

Однако с целью снижения расхода энергии в системах обеспечения микроклимата возникает необходимость в выборе оптимального варианта режима работы регулятора и, соответственно, суммарного энергопотребления системами обеспечения микроклимата $Q_{\text{вент}}$, Дж/г. Исходя из этих соображений, можно решить основную задачу энергосбережения – подобрать такой коэффициент передачи регулятора, который позволит снизить энергоемкость систем инженерного оборудования.

Оптимизация данного критерия по параметрам настройки регулятора может быть выполнена численно или при помощи построения приближенного графика. На рисунке 2 показаны результаты расчета для исследуемого нами помещения. За счет соизмерения величин $K_{\text{рег}}$ и $Q_{\text{вент}}$ можно подобрать наиболее приемлемый режим работы оборудования СКМ (системы кондиционирования микроклимата) с установленной мощностью.

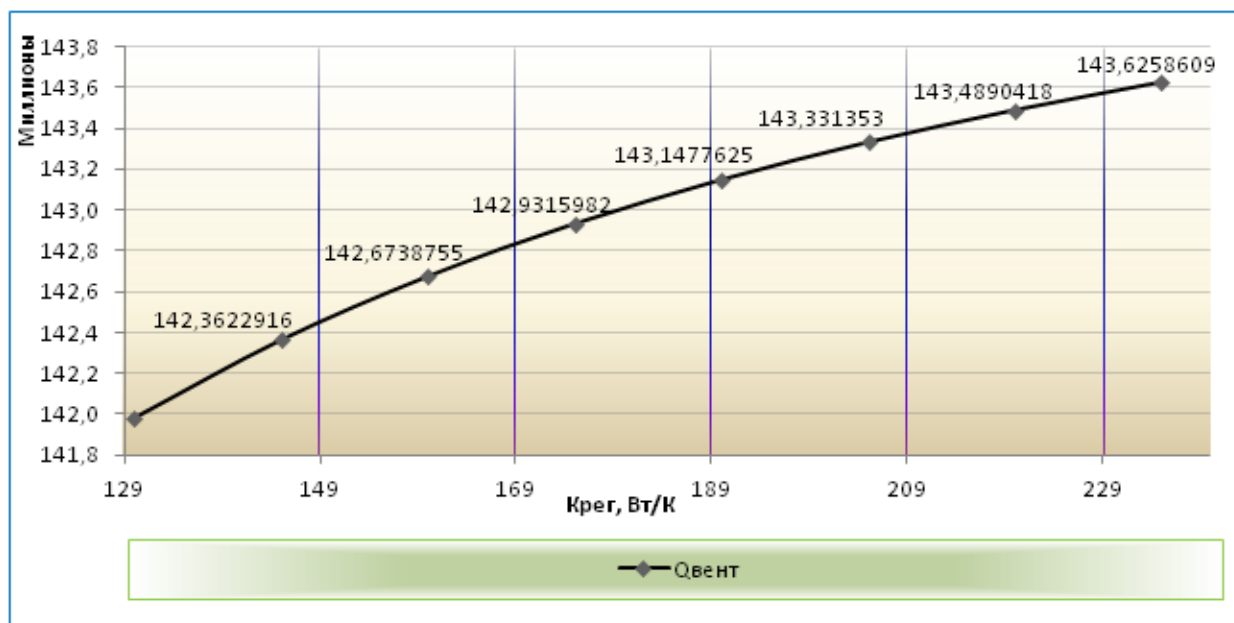


Рисунок 2. Зависимость коэффициента $Q_{\text{вент}}$ от параметра $K_{\text{рег}}$

Легко видеть, что численный расчет дает выбор диапазона по уровню регулируемых параметров, воздействующих на объект управления. Здесь сплошная основная линия демонстрирует экспериментальные точки и поведение переходной функции, учитывающей влияние коэффициента передачи регулятора на суммарное энергопотребление системами обеспечения микроклимата. Объективным решением энергоэффективных задач может служить, например, процесс демпфирования нагрузки регулируемой переменной с целью подбора адаптивной системы кондиционирования и вентиляции.

Таким образом, получить реальную экономию энергоресурсов можно не только с помощью утепления ограждающих стеновых конструкций объектов управления в целом или отдельных их элементов, но и в результате совершенствования существующих систем инженерного обеспечения зданий. В работе представлена приближенная методика, позволяющая оценить воздействие динамических свойств обслуживаемого помещения, как звена контура регулирования, на требуемое значение коэффициента передачи $K_{\text{рег}}$, а также влияние режима работы регулятора на суммарное энергопотребление системы кондиционирования и вентиляции. Вышеуказанный алгоритм имеет достаточно простой вид и при дальнейшем развитии позволит разработать инженерные рекомендации по подбору оптимальных регулируемых параметров для автоматизированных климатических систем в эксплуатационных условиях.

Литература

1. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: федеральный закон РФ от 23.11.2009 №261-ФЗ // Собрание законодательства РФ. 2009. №48. Ст. 5711.
2. Energy Policy Act of 2005, Pub. L. No. 109-58, 119 Stat 594.
3. Самарин О.Д. Оптимизация мощности и параметров управления систем кондиционирования микроклимата в условиях переменных нагрузок: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М.: МГСУ, 1999. 21 с.
4. Самарин О.Д. Теплофизика. Энергосбережение. Энергоэффективность. 2-е изд. М.: Изд-во АСВ, 2011. 296 с.
5. Кнатько М.В., Ефименко М.Н., Горшков А.С. К вопросу о долговечности и энергоэффективности современных ограждающих стеновых конструкций жилых, административных и производственных зданий // Инженерно-строительный журнал. 2008. №2. С. 50-53.
6. Горшков А.С. Энергоэффективность в строительстве: вопросы нормирования и меры по снижению энергопотребления зданий // Инженерно-строительный журнал. 2010. №1. С. 9-13.
7. Гагарин В.Г., Козлов В.В. О комплексном показателе тепловой защиты оболочки здания // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2010. №4. С. 52-61.
8. Geller H., Harrington P., Rosenfeld A.H., Tanishima S., Unander F. Policies for increasing energy efficiency: Thirty years of experience in OECD countries // Energy Policy. 2006. No.34(5). Pp. 556-573.
9. Dounis A.I., Caraiscos C. Advanced control systems engineering for energy and comfort management in a building environment // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2009. No.13(6). Pp. 1246-1261.
10. Chang N., Rivera B.J., Wanielist M.P. Optimal design for water conservation and energy savings using green roofs in a green building under mixed uncertainties // Journal of Cleaner Production. 2011. No. 19 (11). Pp. 1180-1188.
11. Dylewski R., Adamczyk J. Economic and ecological indicators for thermal insulating building investments // Energy and Buildings. 2012. No. 54. Pp. 88-95.
12. Исаев С.И., Кожин И.А., Кофанов В.И. Теория теплообмена: учеб. для вузов / Под ред. А.И. Леонтьева. М.: Высшая школа, 1979. 495 с.
13. Carslaw H.S., Jaeger J.C. Conduction of heat in solids. 2nd edition. New York: Oxford University Press, 1986. 520 p.
14. Беляев Н.М., Рядно А.А. Методы нестационарной теплопроводности: учеб. пособие. М.: Высшая школа, 1978. 328 с.
15. Самарин О.Д., Азизов С.С. Принципы расчета нестационарного теплового режима помещения, обслуживаемого автоматизированными системами обеспечения микроклимата // Известия вузов. Строительство. 2011. №1. С. 59-62.
16. Самарин О.Д., Федорченко Ю.Д. Влияние регулирования систем обеспечения микроклимата на качество поддержания внутренних метеопараметров // Вестник МГСУ. 2011. №7. С.124-128.
17. Богословский В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха): учеб. для вузов. 2-е изд. М.: Высшая школа, 1982. 415 с.
18. Khashan S.A., Al-Amiri A.M., Pop I. Numerical simulation of natural convection heat transfer in a porous cavity heated from below using a non-Darcian and thermal non-equilibrium model // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2006. No.49(5). Pp. 1039-1049.
19. Wang J., Zhai Z., Jing Y., Zhang C. Influence analysis of building types and climate zones on energetic, economic and environmental performances of BCHP systems // Applied Energy. 2011. No.88(9). Pp. 3097-3112.
20. Carli M., Scarpa M., Tomasi R., Zarrella A. DIGITHON: A numerical model for the thermal balance of rooms equipped with radiant systems // Building and Environment. 2012. No.57. Pp. 126-144.

**Олег Дмитриевич Самарин, Москва, Россия*

Тел. раб.: +7(499)188-36-07; эл. почта: samarin1@mtu-net.ru

© Самарин О.Д., Тищенко И.И., 2013

doi: 10.5862/MCE.37.2

Research of adjustable parameters in the automated climatic systems at the aim of energy saving

**O.D. Samarin;
I.I. Tishchenkova,**

*Moscow State Building University, Moscow, Russia
+7(499)188-36-07; e-mail: samarin1@mtu-net.ru*

Key words

energy saving; thermal balance of a room; automated climatic system; controller gain; controller operating mode; energy consumption

Abstract

In modern conditions the special attention should be given to the automated climatic systems with a view of energy saving. In this work processes of non-stationary heat exchange in the room served by automated climatic systems are considered.

Modern methods of calculation of a thermal mode of a room are stated. The interrelation between separate parameters of thermal stability of a room and automatic control of microclimate providing systems is investigated. Expression for calculation of controller gain is received. The end result is defined on the basis of receiving the approximate technique, allowing estimating the influence of a controller operating mode on total energy consumption by microclimate providing systems.

This technique has a quite simple appearance and at further development allows development of engineering recommendations about the selection of optimum option of a controller operating mode for the engineering equipment. The statement is illustrated with numerical calculations by means of the created computer program and graphic examples.

References

1. *Sobraniye zakonodatelstva Rossiyskoy Federatsii* [Collection of the legislation of the Russian Federation]. 2009. No.48. Paper 5711. (rus)
2. *Energy Policy Act of 2005*, Pub. L. No.109-58, 119 Stat 594.
3. Samarin O.D. *Optimizatsiya moshchnosti i parametrov upravleniya system konditsionirovaniya mikroklimate v usloviyakh peremennykh nagruzok* [Optimization of the power and control parameters of microclimate conditioning systems under variable thermal load]. Abstract of a PhD thesis. Moscow: MSUCE, 1999. 19 p. (rus)
4. Samarin O.D. *Teplofizika. Energoberezheniye. Energoeffektivnost* [Thermal physics. Energy conservation. Energy efficiency]. Second edition. Moscow: ASV, 2011. 296 p. (rus)
5. Knatko M.V., Yefimenko M.N., Gorshkov A.S. *Magazine of Civil Engineering*. 2008. No.2. Pp. 50–53. (rus)
6. Gorshkov A.S. *Magazine of Civil Engineering*. 2010. No.1. Pp. 9–13. (rus)
7. Gagarin V.G., Kozlov V.V. AVOK: Ventilatsiya, otopleniye, konditsionirovaniye vozdukh, teplosnabzheniye i stroitel'naya teplofizika. 2010. No.4. Pp. 52–61. (rus)
8. Geller H., Harrington P., Rosenfeld A.H., Tanishima S., Unander F. Policies for increasing energy efficiency: Thirty years of experience in OECD countries. *Energy Policy*. 2006. No.34(5). Pp. 556–573.
9. Dounis A.I., Caraiscos C. Advanced control systems engineering for energy and comfort management in a building environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009. No.13(6). Pp. 1246–1261.
10. Chang N., Rivera B.J., Wanielista M.P. Optimal design for water conservation and energy savings using green roofs in a green building under mixed uncertainties. *Journal of Cleaner Production*. 2011. No.19(11). Pp. 1180–1188.
11. Dylewski R., Adamczyk J. Economic and ecological indicators for thermal insulating building investments. *Energy and Buildings*. 2012. No.54. Pp. 88–95.

Samarin O.D., Tishchenkova I.I. Research of adjustable parameters in the automated climatic systems at the aim of energy saving

12. Isayev S.I., Kozhinov I.A., Kofanov V.I. *Teoriya teplomassoobmena* [Theory of heat and mass transfer]. Moscow: Vysshaya shkola, 1979. 495 p. (rus)
13. Carslaw H.S., Jaeger J.C. *Conduction of heat in solids*. 2nd edition. New York: Oxford University Press, 1986. 520 p.
14. Belyayev N.M., Ryadno A.A. *Metody nestatsionarnoy teploprovodnosti* [Methods of non-stationary heat conductivity]. Moscow: Vysshaya shkola, 1978. 328 p. (rus)
15. Samarin O.D., Azivskaya S.S. *Izvestiya vuzov. Stroitelstvo*. 2011. No.1. Pp. 59–62. (rus)
16. Samarin O.D., Fedorchenko Yu.D. *Vestnik MGSU*. 2011. No.7. Pp. 124–128. (rus)
17. Bogoslovskiy V.N. *Stroitel'naya teplofizika (teplofizicheskiye osnovy otopeniya, ventilyatsii i konditsionirovaniya vozdukha)* [Construction thermophysics (heatphysical bases of heating, ventilation and air conditioning)]. Moscow: Vysshaya shkola, 1982. 415 p. (rus)
18. Khashan S.A., Al-Amiri A.M., Pop I. Numerical simulation of natural convection heat transfer in a porous cavity heated from below using a non-Darcian and thermal non-equilibrium model. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2006. No.49(5). Pp. 1039–1049.
19. Wang J., Zhai Z., Jing Y., Zhang C. Influence analysis of building types and climate zones on energetic, economic and environmental performances of BCHP systems. *Applied Energy*. 2011. No.88(9). Pp. 3097–3112.
20. Carli M., Scarpa M., Tomasi R., Zarrella A. DIGITHON: A numerical model for the thermal balance of rooms equipped with radiant systems. *Building and Environment*. 2012. No.57. Pp. 126–144.

Full text of this article in Russian: pp. 13–18