

Расчёт параметров нестационарного теплового режима помещения при интегральном регулировании климатических систем

Рецензия эксперта на статью получена
20.12.2023 [The expert review of the article
was received on December 20, 2023]

В современных условиях требуемая комфортность внутреннего микроклимата в помещениях, как правило, поддерживается за счёт того или иного автоматического управления оборудованием обслуживающих данное помещение климатических систем. Максимальная точность при этом обеспечивается, конечно, в случае реализации регулирования по непрерывному закону, в первую очередь с интегральной составляющей, поскольку это даёт нулевую статическую ошибку.

Оценка происходящих при этом тепловых процессов в общем случае является достаточно сложной, так как обычно требует существенного учёта теплообмена на поверхностях ограждающих конструкций и конвективного теплопереноса в исследуемом объёме, а также нестационарной теплопередачи в массиве наружных и внутренних ограждений. Кроме того, необходимо использование уравнений связи между контролируемой температурой в помещении и величиной компенсационного теплового потока от управляемых систем обеспечения микроклимата.

Поэтому решение подобных задач чаще всего производится с помощью составления систем дифференциальных и алгебраических уравнений, которые затем решаются главным образом численными методами, и результирующие зависимости могут получаться весьма сложными [1–7].

В работах [8, 9] автором были найдены расчётные соотношения для основных параметров, характеризующих нестационарный тепловой режим помещения, обслуживаемого автоматизированной системой кондиционирования воздуха, регулируемой по интегральному закону, при условии, что отсутствует фоновый пере-

Оценка происходящих в климатическом оборудовании тепловых процессов требует учёта теплообмена на поверхностях ограждающих конструкций и конвективного теплопереноса в исследуемом объёме

гулируемый приток, а теплопоступления $Q_{\text{пост}}$ [Вт] меняются скачкообразно от нулевого значения. В первую очередь речь здесь идёт о моменте времени τ_{max} [с], для которого в помещении наблюдается максимальное отклонение температуры воздуха от уставки θ_{max} [K] и о самом уровне этого отклонения:

$$\tau_{\text{max}} = 0,911 \sqrt[3]{\left(\frac{B}{A}\right)^2}; \theta_{\text{max}} = 1,4 \sqrt[3]{\frac{Q_{\text{пост}}}{AB^2}}. (1)$$

В данном случае числовой коэффициент $0,911 = (3,48/4)^{2/3}$, где 3,48 — значение безразмерного времени:

$$y = \frac{4A}{B} \sqrt[3]{\tau^2},$$

являющегося аргументом при вычислении θ_{max} , а $1,4 = 2^{1/3} \times 1\%$, где 1% — наибольшая величина безразмерной избыточной температуры [8, 9]. Величина A [Вт/(K·с)] относится к характеристикам системы автоматического регулирования. Выражение для A по определению записывается следующим образом:

$$A = \frac{G_{\text{п}} c_{\text{в}} K_{\text{пер}}}{3,6}, (2)$$

где $G_{\text{п}}$ — массовый расход приточного воздуха, кг/ч; $c_{\text{в}}$ — его удельная теплоёмкость, $c_{\text{в}} = 1,005$ кДж/(кг·K); $K_{\text{пер}}$ — эквивалентный коэффициент передачи автоматизированной системы по каналу « $t_{\text{в}}$ → производная от $t_{\text{п}}$ », с^{-1} .

УДК 697.1:699.86. Научная специальность: 2.1.3.

Расчёт параметров нестационарного теплового режима помещения при интегральном регулировании климатических систем

О. Д. Самарин, к.т.н., доцент, Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)

Рассмотрен расчёт изменения температуры внутреннего воздуха в помещении при скачкообразном изменении теплоизбытков и интегральном регулировании тепломассообменного оборудования обслуживающей его системы кондиционирования воздуха. Получены зависимости для максимального отклонения данной температуры от уставки и для времени его достижения от величины теплоизбытков и характеристик помещения, не включающие параметры регулятора. Приведены основные соотношения, позволяющие независимым образом вычислять такие параметры, а также значения безразмерного времени, используемого при расчёте безразмерного отклонения внутренней температуры, в которые также входят только исходные данные и требования к качеству поддержания микроклимата помещения. Представлены результаты экспериментального исследования нестационарного теплового режима охлаждаемого помещения при квази-двухпозиционном регулировании системы охлаждения, в целом подтверждающие полученные теоретические зависимости.

Ключевые слова: температура, микроклимат, теплоизбытки, климатическая система, регулирование, интегральный закон.

UDC 697.1:699.86. The number of scientific specialty: 2.1.3.

Calculation of the parameters of the non-stationary thermal regime of the room with integrated regulation of climate systems

O. D. Samarina, PhD, Associate Professor, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU)

The calculation of the change in the temperature of indoor air in a room with a sudden change in heat surpluses and integrated regulation of heat and mass transfer equipment of the air conditioning system serving it is considered. The dependences for the maximum deviation of this temperature from the setpoint and for the time of its achievement on the amount of heat surpluses and characteristics of the room, which do not include the parameters of the regulator, are obtained. The basic relations allowing to independently calculate such parameters are given, as well as the values of the dimensionless time used in calculating the dimensionless deviation of the internal temperature, which also include only the initial data and requirements for the quality of maintaining the microclimate of the room. The results of an experimental study of the non-stationary thermal regime of a cooled room with quasi-two-position regulation of the cooling system are presented, generally confirming the theoretical dependences obtained.

Key words: temperature, microclimate, heat surpluses, climate system, regulation, integral law.

Параметр B [Вт·с^{1/2}/К] в формулах (1) характеризует теплоинерционные свойства помещения и может быть вычислен так:

$$B = \sum (A_m \sqrt{\lambda c \rho})_i, \quad (3)$$

здесь λ — теплопроводность, Вт/(м·К); c — удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К); ρ — плотность материала слоя i -го массивного ограждения, обращённого внутрь помещения, в первую очередь наружных и внутренних стен и перегородок, а также перекрытий между этажами; A_m — площадь каждой из данных конструкций, м² [причём «лёгкие» (безынерционные) ограждения, например, заполнения световых проёмов, при этом не учитываются].

Однако выражения (1) содержат величину A , зависящую от $K_{\text{рег}}$, которая, строго говоря, является определяемым, искомым параметром, поэтому в указанном виде они непосредственно пригодны только для поверочных расчётов при заданных характеристиках регулятора. Следовательно, целесообразно было бы так перестроить полученные соотношения, чтобы они содержали только исходные данные, а именно значения $Q_{\text{пост}}$ и B , а также допустимую динамическую ошибку регулирования, то есть наибольшую величину θ_{max} . Покажем, как это можно сделать, используя исключительно зависимости (1)–(3).

Во-первых, из первой формулы (1) можно независимо найти параметр A :

$$A = \frac{0,87B}{\sqrt{(\tau_{\text{max}})^3}}, \quad (4)$$

где, очевидно, $0,87 = 3,48/4$. Теперь подставляем данное выражение в формулу для θ_{max} из (1):

$$\theta_{\text{max}} = \frac{1,4Q_{\text{пост}}}{\sqrt[3]{\frac{0,87B}{\sqrt{(\tau_{\text{max}})^3}} B^2}} = \frac{1,46Q_{\text{пост}}\sqrt{\tau_{\text{max}}}}{B}, \quad (5)$$

где множитель $1,46 = 1,4/0,87^{1/3}$, откуда, поскольку обычно задаётся именно величина θ_{max} , находим:

$$\tau_{\text{max}} = 0,47 \left(\frac{\theta_{\text{max}} B}{Q_{\text{пост}}} \right)^2. \quad (6)$$

здесь $0,47 = 1/1,462$.

Заметим, что соотношение (6) с точностью до числового коэффициента совпадает по форме с полученной автором в [10] зависимостью для времени включения или отключения системы нагрева/охлаждения, регулируемой двухпозиционно («включено/выключено»), что говорит об общности закономерностей происходящих в обоих случаях процессов и дополнительно подтверждает данный результат. Кроме того, нетрудно объяснить также

Мы получили соотношения для основных параметров нестационарного теплового режима помещения, обслуживаемого автоматизированными климатическими системами

то обстоятельство, что числовой коэффициент в (6) оказывается больше, чем найденный в [10] для двухпозиционного регулирования ($1/4$), поскольку в последнем случае между включениями и выключениями системы фактически имеет место неуправляемый тепловой режим, а в настоящей работе речь идёт о непрерывном регулировании, которое, разумеется, замедляет процесс достижения температурой максимально допустимого отклонения.

Для условий примера из [10], когда $Q_{\text{пост}} = 500$ Вт, $B = 24$ кВт·с^{1/2}/К, а $\theta_{\text{max}} = 1$ К, в соответствии с (6) получаем:

$$\tau_{\text{max}} = 0,47 \left(\frac{1 \times 24\,000}{500} \right)^2 = 1083 \text{ с.}$$

В то же время натурные замеры [10], выполненные в соответствующем помещении с использованием местной системы охлаждения в виде сплит-системы с имитацией скачка теплопоступлений с помощью конвективного электрического тепловентилятора, дают значение $\tau_{\text{max}} = 755$ с или примерно на 30 % меньше. Однако такое расхождение можно объяснить тем, что в действительности для системы охлаждения применялась комбинация непрерывного и позиционного регулирования, поэтому реальное время достижения допустимого отклонения температуры оказалось промежуточным между этими двумя крайними случаями. В то же время, по крайней мере, по порядку величины выражение (6) даёт верные результаты.

После этого, используя формулу (2), для искомой величины $K_{\text{рег}}$ с учётом (4) и (6) имеем:

$$K_{\text{рег}} = \frac{3,6A}{G_{\text{п}} c_{\text{в}}} = \frac{3,6 \times 0,87B}{G_{\text{п}} c_{\text{в}} \sqrt{(\tau_{\text{max}})^3}} = \frac{9,73 Q_{\text{пост}}}{\theta_{\text{max}}^3 B^2}. \quad (7)$$

В полученное выражение, так же, как и в (6), входят только исходные данные для расчёта.

Наконец, для безразмерного времени y при вычислении θ_{max} также из (4) и (6) получаем следующую зависимость:

$$y = 7,3 \tau \left(\frac{Q_{\text{пост}}}{\theta_{\text{max}} B} \right)^2. \quad (8)$$

Здесь числовой коэффициент: $7,3 = (2^{1/3} \times 4)^2 / 3,48$.

Следовательно, теперь можно рассчитать изменение и текущего отклонения температуры воздуха от уставки θ на основе только заданных величин, независимо от характеристик регулятора, например, с помощью видоизменения аппроксимации, приведённой в [8, 9]:

$$\theta = 0,9 \theta_{\text{max}} \sqrt[3]{y} \left(1 - \frac{y}{12,4} + \frac{y^2}{675} \right), \quad (9)$$

где $0,9 = 1/(1^{1/3})$.

Таким образом, мы получили соотношения для основных параметров нестационарного теплового режима помещения, обслуживаемого автоматизированными климатическими системами, управляемыми с применением интегрального закона, позволяющие определять эти параметры с использованием только заранее известных величин и требований к качеству поддержания внутренних метеоусловий. Эти соотношения подтверждаются сравнением разных вариантов аналитических решений, а также сопоставлением с результатами экспериментальных изменений, имеют достаточно простой вид, требуют минимального числа исходных данных и доступны для реализации в инженерной практике. ●

1. Дорошенко А.В. Имитационная термодинамическая модель здания // БСТ, 2017. № 12. С. 42–43.
2. Rafalskaya T. Safety of engineering systems of buildings with limited heat supply. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education: VII International Scientific Conference (IPICSE 2020). 2021. Vol. 1079.
3. Rafalskaya T.A. Simulation of thermal characteristics of heat supply systems in variable operating modes. Journal of Physics: Conference Series. XXXV Siberian Thermophysical Seminar (STS 2019). 2019. Vol. 1382.
4. Serale G., Capozzoli A., Fiorentini M., Bernardini D., Bemporad A. Model predictive control (MPC) for enhancing building and HVAC system energy efficiency: Problem formulation, applications and opportunities. Energies. 2018. Vol. 11. Issue 3. 35 p.
5. Ryzhov A., Ouerdane H., Gryazina E., Bisch A., Turitsyn K. Model predictive control of indoor microclimate: Existing building stock comfort improvement. Energy Conversion and Management. 2019. Vol. 179. Pp. 219–228.
6. Sha H., Xu P., Yang Z., Chen Y., Tang J. Overview of computational intelligence for building energy system design. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019. Vol. 108. Pp. 76–90.
7. Belussi L., Barozzi B., Bellazzi A., Danza L., Devitofrancesco A., Fanciulli C., Ghellere M., Guazzi G., Meroni I., Salamone E., Scamoni F., Scrosati Ch. A review of performance of zero energy buildings and energy efficiency solutions. Journal of Building Engineering. 2019. Vol. 25.
8. Самарин О.Д. Расчёт температуры воздуха в помещении по безразмерным параметрам при интегральном регулировании климатических систем // Вестник МГСУ, 2021. Т. 16. Вып. 4. С. 486–492.
9. Самарин О.Д., Ключко А.К. Численные и приближенные методы в задачах строительной теплофизики и климатологии. — М.: Изд-во МИСИ-МГСУ, 2021. 96 с.
10. Самарин О.Д. Нестационарный тепловой режим помещения при позиционном регулировании системы охлаждения // Журнал СОК, 2023. №1. С. 102–103.

References — see page 112.

Calculation of the parameters of the non-stationary thermal regime of the room with integrated regulation of climate systems. Pp. 92–94.

O.D. Samarin, PhD, Associate Professor, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU)

1. A.V. Doroshenko. *Imitatsionnaya termodinamitseskaya model' zdaniya* [Simulation thermodynamic model of the building]. *BST* ["Bulletin of Construction Equipment" Magazine]. 2017. No. 12. Pp. 42–43.
2. T. Rafalskaya. Safety of engineering systems of buildings with limited heat supply. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education: VII International Scientific Conference (IPICSE 2020). 2021. Vol. 1079.
3. T.A. Rafalskaya. Simulation of thermal characteristics of heat supply systems in variable operating modes. *Journal of Physics: Conference Series*. XXXV Siberian Thermophysical Seminar (STS 2019). 2019. Vol. 1382.
4. G. Serale, A. Capozzoli, M. Fiorentini, D. Bernardini, A. Bemporad. Model predictive control (MPC) for enhancing building and HVAC system energy efficiency: Problem formulation, applications and opportunities. *Energies*. 2018. Vol. 11. Issue 3. 35 p.
5. A. Ryzhov, H. Ouerdane, E. Gryazina, A. Bisch, K. Turitsyn. Model predictive control of indoor microclimate: Existing building stock comfort improvement. *Energy Conversion and Management*. 2019. Vol. 179. Pp. 219–228.
6. H. Sha, P. Xu, Z. Yang, Y. Chen, J. Tang. Overview of computational intelligence for building energy system design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. Vol. 108. Pp. 76–90.
7. L. Belussi, B. Barozzi, A. Bellazzi, L. Danza, A. Devitofrancesco, C. Fanciulli, M. Ghellere, G. Guazzi, I. Meroni, F. Salamone, F. Scamoni, Ch. Scrosati. A review of performance of zero energy buildings and energy efficiency solutions. *Journal of Building Engineering*. 2019. Vol. 25.
8. O.D. Samarin. *Raschet temperatury vozdukh v pomeshhenii po bezrazmernym parametram pri integral'nom regulirovanii klimatitsheskikh sistem* [Calculation of indoor air temperature using dimensionless parameters for integrated climate control systems]. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture (Bulletin of Moscow State University of Civil Engineering)]. 2021. Vol. 16. Issue 4. Pp. 486–492.
9. O.D. Samarin, A.K. Klotshko. *Chislennye i priblizhennyye metody v zadatshakh stroitel'noj teplofiziki i klimatologii* [Numerical and approximate methods in problems of construction thermal physics and climatology]. Moscow. *Izd-vo MISI-MGSU* [Publishing House of Moscow State University of Civil Engineering]. 2021. 96 p.
10. O.D. Samarin. *Nestatsionarnyy teplovoj rezhim pomeshheniya pri pozitsionnom regulirovanii sistemy okhlazhdeniya* [Non-stationary thermal mode of the room with positional regulation of the cooling system]. *Zhurnal Santehnika, otoplenie, konditsionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2023. No. 1. Pp. 102–103.