

Нестационарный тепловой режим помещения при позиционном регулировании системы охлаждения

Рецензия эксперта на статью получена
11.10.2022 [The expert review of the article
was received on October 11, 2022]

Для поддержания температуры внутреннего воздуха t_v [°C] на требуемом уровне при переменных внутренних и внешних тепловых воздействиях обслуживающие помещение системы обеспечения микроклимата оборудуются системами автоматизации, использующими различные законы регулирования. Разумеется, наиболее предпочтительным и обеспечивающим максимальную точность является непрерывное регулирование, особенно с интегральной составляющей, поскольку при этом статическая ошибка становится равной нулю. Однако для простых агрегатов наподобие индивидуальных сплит-систем до сих пор применяется регулирование двухпозиционного типа, когда устройство попеременно включается и выключается при достижении величины t_v верхнего и нижнего пределов, установленных для данного помещения по требованиям комфортности внутреннего микроклимата. При этом тепло- или холодопроизводительность агрегата в течение каждого периода включения оказывается постоянной. Из соображений теплового баланса она, очевидно, определяется значением теплоизбытков и соотношением продолжительности периодов включения и выключения.

Для оценки данной мощности и общих условий функционирования климатического оборудования необходимо найти фактическую частоту его переключений. В общем случае для подобных исследований бывает невозможно обойтись без существенного учёта теплообмена на поверхностях ограждений и конвективного переноса теплоты в рассматриваемом объёме, а также нестационарной

теплопередачи в массиве строительных конструкций, а также без использования уравнений связи между контролируемой температурой в помещении и тепловым потоком от регулируемых климатических систем. Поэтому решение таких задач чаще всего осуществляется за счёт составления систем дифференциальных и алгебраических уравнений, которые впоследствии приходится решать в основном численными методами, и получаемые в результате зависимости могут оказываться достаточно сложными [1–7].

Тем не менее, в нашем случае можно воспользоваться некоторыми существующими решениями и более простыми приёмами. Обозначим интервал времени до момента включения системы охлаждения или до её последующего выключения как Δt [с], а допустимый диапазон колебаний t_v , при выходе за который происходит срабатывание системы автоматизации, как Δt [K]. Тогда искомую функциональную зависимость для Δt можно записать таким образом:

$$\Delta t = f(Q_{\text{пост}}, \Delta t, B), \quad (1)$$

где $Q_{\text{пост}}$ — теплоизбытки в помещении [Вт], а параметр B [Вт·с^{1/2}/K], можно вычислить по формуле:

$$B = \sum (A_m \sqrt{\lambda c \rho})_i, \quad (2)$$

где λ , c и ρ — это, соответственно, теплопроводность [Вт/(м·K)], удельная теплоёмкость [Дж/(кг·K)] и плотность материала [кг/м³] слоя i -го массивного ограждения, обращённого внутрь помещения, например, наружных и внутренних стен и перегородок, а также междуэтажных перекрытий; A_m — площадь каждой из перечисленных ограждающих конструкций, м².

УДК 697.1:699.86. Научная специальность: 2.1.3 (05.23.03).

Нестационарный тепловой режим помещения при позиционном регулировании системы охлаждения

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

Рассмотрен расчёт колебаний температуры воздуха в помещении при постоянных теплоизбытках и двухпозиционном регулировании обслуживающей его системы охлаждения типа сплит-системы. Получен общий вид зависимости для частоты переключений системы от величины теплоизбытков, контролируемого диапазона внутренней температуры и характеристик помещения методом анализа размерностей, и вычислено значение числового коэффициента в данной формуле на основе сопоставления различных вариантов аналитического решения для изменения внутренней температуры при скачкообразных и периодических тепловых возмущениях. Показана эквивалентность результатов, получаемых методом анализа размерностей и непосредственным решением соответствующих систем дифференциальных и алгебраических уравнений. Приведены результаты экспериментального исследования нестационарного теплового режима охлаждаемого помещения при двухпозиционном регулировании системы охлаждения, в целом подтверждающие полученную теоретическую зависимость.

Ключевые слова: температура, микроклимат, теплоизбытки, система охлаждения, регулирование, двухпозиционный.

UDC 697.1:699.86. The number of scientific specialty: 2.1.3 (05.23.03).

Non-stationary thermal mode of the room with positional regulation of the cooling system

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

The calculation of room air temperature fluctuations with constant heat excess and two-position regulation of the split-system type cooling system serving it is considered. A general view of the dependence for the switching frequency of the system on the amount of heat excess, the controlled range of internal temperature and the characteristics of the room is obtained by dimensional analysis, and the value of the numerical coefficient in this formula is calculated based on a comparison of various analytical solutions for changes in internal temperature during intermittent and periodic thermal disturbances. The equivalence of the results obtained by the dimensional analysis method and the direct solution of the corresponding systems of differential and algebraic equations is shown. The results of an experimental study of the non-stationary thermal regime of a cooled room with two-position regulation of the cooling system are presented, generally confirming the obtained theoretical dependence.

Key words: temperature, microclimate, heat excess, cooling system, regulation, two-position.

Общий вид зависимости (1) можно установить, в частности, методом размерностей. Если предположить, что

$$\Delta\tau = Q_{\text{пост}}^a \Delta t^b B^c, \text{ получаем} \\ [c] = [\text{Вт}]^a [\text{К}]^b [\text{Вт} \cdot \text{с}^{1/2} / \text{К}]^c,$$

откуда, очевидно,

$$c = 2, a = -c = -2, b = c = 2,$$

и тогда получаем:

$$\Delta\tau = k \left(\frac{B \Delta t}{Q_{\text{пост}}} \right)^2, \quad (3)$$

где k — некоторый безразмерный числовой коэффициент.

В то же время для избыточной температуры $\theta_b = t_b - t_{b,0}$, где $t_{b,0}$ представляет собой начальное значение t_b , при малых промежутках времени τ [с] с момента появления теплового возмущения можно записать асимптотическое решение [8]:

$$\theta_b = \frac{2Q_{\text{пост}}}{B} \sqrt{\tau}. \quad (4)$$

Заметим, что формула (4), несмотря на её относительную простоту и неучёт ряда других параметров, влияющих на процесс нагрева и охлаждения помещения, например, наличие «лёгких» (безынерционных) конструкций типа окон, вентиляционного воздухообмена и других, достаточно удачно подтверждается экспериментальными данными, в том числе и работами автора [9].

Тогда, если считать $\theta_b = \Delta t$, промежуток времени до включения системы охлаждения из (4) можно выразить следующим образом:

$$\Delta\tau = \left(\frac{B \Delta t}{2Q_{\text{пост}}} \right)^2, \quad (5)$$

то есть числовой коэффициент k в выражении (2) равен 0,25.

С целью экспериментального подтверждения полученной теоретической величины k были выполнены натурные замеры для тех же условий, в которых проводились исследования, приведённые в [9]. Это необходимо было сделать, поскольку соотношения (4) и, следовательно, (5) всё же были получены при использовании достаточно существенных упрощений и допущений. Как и ранее, для имитации скачка теплопоступлений осуществлялось включение источника конвективной теплоты в виде электрического тепловентилятора, мощность которого составляла в данном случае $Q_{\text{пост}} = 500$ Вт, а величина B была вычислена с использованием реальных теплотехнических показателей материалов ограждающих конструкций здания и размеров помещения. В частности, его площадь была равна

Получена зависимость, определяющая частоту переключений системы охлаждения помещения при постоянных теплоизбытках и её двухпозиционном регулировании. Эта зависимость подтверждается аналитически и экспериментально

14 м², высота от пола до потолка 3 м, глубина от наружной стены 6 м. Внутренние конструкции выполнены из железобетона плотностью 1200 кг/м³ и общей площадью 64 м², которую необходимо учитывать целиком, так как в условиях данного эксперимента распространение температурной волны в ограждениях будет происходить только в одну сторону, наружная стена из лёгкого бетона плотностью 500 кг/м³ и площадью 7 м² с окном площадью 1,8 м². Тогда значение B оказывается равным около 24 кВт·с^{1/2}/К.

С целью компенсации теплоизбытков применялся внутренний блок сплит-системы, поэтому, что касается диапазона Δt , его естественно принять совпадающим с шагом уровней t_b , автоматически поддерживаемых системой регулирования блока, то есть 1 К.

Измеренная величина $\Delta\tau$ при этом составила в среднем около 755 с. Подстановка соответствующих исходных данных в (5) даёт $[24\,000 \times 1/(2 \times 500)]^2 = 576$ с, что примерно на $\frac{1}{4}$ ниже экспериментальной, но, с учётом отмеченной грубости первоначальных предположений при выводе (5), данное совпадение можно признать удовлетворительным, так что формула (5) даёт достаточно достоверную оценку $\Delta\tau$, по крайней мере, по порядку величины.

Заметим, что к рассматриваемому вопросу можно подойти и с использованием теории тепловой устойчивости [10], разработанной для исследования периодических тепловых процессов в помещениях и ограждениях, в первую очередь при гармонических колебаниях $Q_{\text{пост}}$ и t_b . И, хотя в нашем случае изменение теплоизбытков и компенсационного воздействия системы охлаждения происходит скачкообразно, а температура воздуха изменяется в первом приближении пропорционально $\sqrt{\tau}$ [см. формулу (4)], в соответствии с [10] при имеющихся допущениях можно записать выражение:

$$A_{t_b} = \frac{0,9 A_Q}{B \sqrt{\frac{2\pi}{T}}}, \quad (6)$$

где 0,9 — поправочный коэффициент, учитывающий отставание по фазе изменения t_b относительно $Q_{\text{пост}}$; параметры

A_{t_b} [К] и A_Q [Вт] представляют собой амплитуды колебаний t_b и $Q_{\text{пост}}$, соответственно; T — период колебаний, с.

Поскольку в рассматриваемом режиме переключение системы охлаждения за время T происходит два раза, очевидно, что $\Delta\tau = T/2$, а кроме того, по физическому смыслу амплитуды имеем $A_{t_b} = \Delta t/2$.

В то же время, наоборот, $A_Q = 2Q_{\text{пост}}$, потому что для компенсации теплоизбытков в среднем за период необходимо, чтобы во время включения системы её холодильная нагрузка составляла именно $2Q_{\text{пост}}$, откуда следует, что применение аппарата данной теории также приводит к соотношению типа (3), но с

$$k = \pi/(4 \times 0,9)^2 \approx 0,24,$$

то есть практически совпадает с (5). В то же время сопоставление с экспериментальными данными требует некоторой корректировки коэффициента k , который можно принимать в размере около $\frac{1}{4}$.

Таким образом, получена зависимость, определяющая частоту переключений системы охлаждения помещения при постоянных теплоизбытках и её двухпозиционном регулировании. Эта зависимость подтверждается сопоставлением различных вариантов аналитического решения, а также экспериментальными данными, имеет достаточно простой вид, требует минимального числа исходных данных и доступна для использования в инженерной практике. ●

1. Дорошенко А.В. Имитационная термодинамическая модель здания // БСТ, 2017. №12. С. 42–43.
2. Tarasova (Andreeva) D.S., Petritchenko M.R. Building quasi-stationary thermal behavior. Magazine of Civil Engineering. 2017. No. 4. Pp. 28–35.
3. Елисеев В.Н., Товстоног В.А., Боровкова Т.В. Алгоритм решения обобщённой задачи нестационарной теплопроводности в телах простой геометрической формы // Вестник МГТУ. Серия: Машиностроение, 2017. №1. С. 112–128.
4. Latif M., Nasir A. Decentralized stochastic control for building energy and comfort management. Journal of Building Engineering. 2019. Vol. 24.
5. Seralle 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.
6. Ryzhov A., Ouerdane H., Gyzazina E., Bischi A., Turitsyn K. Model predictive control of indoor microclimate: Existing building stock comfort improvement. Energy Conversion and Management. 2019. Vol. 179. Pp. 219–228.
7. 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.
8. Самарин О.Д. Расчёт теплового режима помещения при автоматическом регулировании климатических систем // Вестник МГСУ, 2020. Т. 15. Вып. 4. С. 585–591.
9. Самарин О.Д. Экспериментальное подтверждение теоретических зависимостей для температуры воздуха в помещении при автоматическом регулировании климатических систем // Известия вузов. Серия: Строительство. 2021. №1. С. 37–42.
10. Богословский В.Н. Строительная теплофизика. 3-е изд. — СПб.: АВОК Северо-Запад, 2006. 400 с.

References — see page 109.

Non-stationary thermal mode of the room with positional regulation of the cooling system. Pp. 102–103.

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

1. A.V. Doroshenko. *Imitatsionnaja termodinamicheskaja model' zdanija* [Simulation thermodynamic model of the building]. *BST* [Building Machinery Bulletin]. 2017. No. 12. Pp. 42–43. [In Russian]
2. D.S. Tarasova (Andreeva), M.R. Petritchenko. Building quasi-stationary thermal behavior. *Magazine of Civil Engineering*. 2017. No. 4. Pp. 28–35.
3. V.N. Eliseev, V.A. Tovstonog, T.V. Borovkova. *Algoritm reshenija obobshhennoj zadachi nestatsionarnoj teploprovodnosti v telah prostoj geometricheskoj formy* [Algorithm for solving the generalized problem of non-stationary heat conduction in bodies of a simple geometric shape]. *Vestnik MGTU. Serija: Mashinostroenie* [Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Engineering]. 2017. No. 1. Pp. 112–128. [In Russian]
4. M. Latif, A. Nasir. Decentralized stochastic control for building energy and comfort management. *Journal of Building Engineering*. 2019. Vol. 24.
5. G. Serale, A. Capozzoli, M. Fiorentini, D. Bernardini, A. Bemporad. Model predictive control (MPC) for enhancing building and heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) system energy efficiency: Problem formulation, applications and opportunities. *Energies*. 2018. Vol. 11. Issue 3.
6. 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.
7. 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.
8. O.D. Samarin. *Raschet teplovogo rezhima pomeschenija pri avtomaticheskom regulirovanii klimaticheskikh sistem* [Calculation of the thermal regime of the room with automatic control of climate systems]. *Vestnik MGSU* [Bulletin of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2020. Vol. 15. Issue 4. Pp. 585–591. [In Russian]
9. O.D. Samarin. *Jeksperimental'noe podtverzhenie teoreticheskikh zavisimostej dlja temperatury vozduha v pomeschenii pri avtomaticheskom regulirovanii klimaticheskikh sistem* [Experimental confirmation of theoretical dependencies for indoor air temperature with automatic control of climate systems]. *Izvestija vuzov. Serija: Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Series: Construction]. 2021. No. 1. Pp. 37–42. [In Russian]
10. V.N. Bogoslovskij. *Stroitel'naja teplofizika* [Building thermal physics]. 3rd edition. St. Petersburg. *Izd-vo "AVOK Severo-Zapad"* [Publishing House of the Russian Association of Engineers for Heating, Ventilation, Air-Conditioning, Heat Supply and Building Thermal Physics of north-west regions of Russia ("ABOK North-West")]. 2006. 400 p. [In Russian]