



Экспериментальная оценка температуры в помещении при интегральном регулировании климатических систем

Рецензия эксперта на статью получена
10.02.2025 [The expert review of the article
was received on February 10, 2025]

Автоматическое поддержание параметров внутреннего микроклимата в рабочей зоне помещений является обязательным признаком кондиционирования воздуха в соответствии с СП 60.13330.2020 «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха» [1]. В условиях нестационарного режима при наличии переменных тепло- и влагопоступлений это означает необходимость автоматического управления обслуживаемыми помещением климатическими системами и соответствующего регулирования их тепломассообменного оборудования, используемого для обработки притока. Такое регулирование может осуществляться по различным алгоритмам, простейшим из которых является пропорциональный (П-), для которого характерна непосредственная зависимость компенсационного воздействия системы от текущего отклонения контролируемого параметра (например, температуры) по сравнению с заданным значением (уставкой). Подобные регуляторы просты по конструкции и обла-

дают наибольшим быстродействием, но их недостатком является ненулевая статическая ошибка регулирования — контролируемый параметр не возвращается точно к уставке.

Поэтому применяются и более сложные алгоритмы, в первую очередь интегральный (И-), при котором текущему отклонению пропорциональна производная по времени от компенсационного воздействия, то есть само воздействие пропорционально всему накопленному отклонению с момента появления тепловлажностного возмущения. Следовательно, И-регулирование продолжится вплоть до полной ликвидации отклонения, хотя и требует более сложных технических средств по сравнению с использованием П-закона, а также характеризуется увеличенным временем регулирования.

Однако в ряде случаев эти недостатки не имеют принципиального значения, а, кроме того, они могут быть частично устранены применением комбинаций различных алгоритмов.

УДК 697.1:699.86. Научная специальность: 2.1.3.

Экспериментальная оценка температуры в помещении при интегральном регулировании климатических систем

О. Д. Самарин, к.т.н., доцент; **А. Д. Петренко**, обучающийся по программе бакалавриата; **С. В. Коваленко**, обучающийся по программе бакалавриата, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)

Рассмотрена зависимость температуры внутреннего воздуха в помещении от времени при скачкообразном тепловом возмущении в условиях автоматического регулирования климатических систем по интегральному закону. Представлена ранее полученная теоретическая формула для данной зависимости, учитывающая характеристику теплоаккумуляционных свойств помещения и отражающая закономерности распространения температурной волны в материале массивных ограждающих конструкций в сочетании с уравнением, описывающим отклик автоматизированного тепломассообменного оборудования на тепловое воздействие. Приведены результаты натурных измерений температуры для характерного помещения в режиме его разогрева при известной мощности теплоисточника, а также заданных геометрических и теплофизических характеристиках ограждений и параметрах местной системы охлаждения, подтверждающие справедливость указанной формулы. Дана оценка погрешности полученных данных и проведено её сопоставление с обычной точностью инженерного расчёта. Изложение проиллюстрировано числовыми и графическими примерами, отражающими результаты проведённых экспериментальных исследований.

Ключевые слова: температура, микроклимат, тепловой режим, теплопоступления, регулирование, интегральный алгоритм.

UDC 697.1:699.86. Scientific specialty number: 2.1.3.

Experimental assessment of indoor temperature under integrated control of climate systems

O. D. Samarin, PhD, Associate Professor; **A. D. Petrenko**, undergraduate student; **S. V. Kovalenko**, undergraduate student, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU)

The dependence of indoor air temperature on time during a sudden thermal disturbance under conditions of automatic regulation of climate systems according to the integral law is considered. The previously obtained theoretical formula for this dependence is presented, which takes into account the characteristics of the heat storage properties of the room and reflects the patterns of propagation of a temperature wave in the material of massive enclosing structures in combination with an equation describing the response of automated heat and mass transfer equipment to thermal effects. The results of field temperature measurements for a typical room in its heating mode with a known heat source power, as well as the specified geometric and thermophysical characteristics of the fences and the parameters of the local cooling system, confirming the validity of the specified formula, are presented. The error of the data obtained is estimated and compared with the usual accuracy of engineering calculations. The presentation is illustrated with numerical and graphical examples reflecting the results of the conducted experimental studies.

Key words: temperature, microclimate, thermal regime, heat supply, regulation, integral algorithm.

Расчёт нестационарного теплового режима помещения, обслуживаемого автоматизированными климатическими системами, позволяет связать между собой его теплотехнические характеристики с величиной скачка теплопоступлений, требованиями к качеству поддержания микроклимата и параметрами регулятора. Данный вопрос в той или иной степени рассматривался в ряде работ отечественных и зарубежных авторов, в частности, [2–8]. Однако, например, публикации [2–4] посвящены главным образом регулированию наружных систем теплоснабжения, в работе [5] изложение ведётся преимущественно с позиций теории теплоустойчивости без увязки с классической теорией автоматического регулирования, а исследования [6–8] используют в основном численные методы, что приводит к получению результатов, мало пригодных для инженерной практики.

В монографии [9] на основе решения основного дифференциального уравнения теплового баланса помещения с учётом обратной связи, вносимой регулятором в систему, одним из авторов было получено выражение для изменения избыточной температуры внутреннего воздуха $\theta_v = |t_v - t_{v,0}|$ [K] при И-регулировании в зависимости от интервала времени τ [с] с момента появления теплового возмущения $Q_{\text{пост}}$ [Вт], где t_v — действительная текущая температура воздуха, $t_{v,0}$ — её начальное контролируемое значение (уставка), °C. В безразмерном виде с некоторыми упрощениями с учётом [10] оно может быть записано следующим образом:

$$\theta_v = 0,9 \theta_{\text{max}} x^{1/3} \left(1 - \frac{x}{12,4} + \frac{x^2}{675} \right), \quad (1)$$

здесь θ_{max} — наибольшее значение θ_v или динамическая ошибка регулирования; x — безразмерное время:

$$x = 10,98 \left(\frac{Q_{\text{пост}} \sqrt{\tau}}{\theta_{\text{max}} B} \right)^3;$$

B — показатель теплоаккумуляционных свойств помещения, Вт·с^{1/2}/K.

Формула (1) достаточно удачно подтверждается некоторыми экспериментальными данными, приведёнными в том числе в уже упомянутой публикации [9]. Однако целесообразно произвести более расширенное экспериментальное обоснование данной зависимости, что позволит также дополнительно подтвердить базовые математические соотношения, лежащие в основе исходного уравнения. Ранее авторами была выполнена подобная работа применительно к режиму начального разогрева помещения, то есть при неработающей системе кондиционирования



воздуха [11]. Тем не менее, основные методологические подходы, использованные в указанном исследовании, могут быть реализованы также и для рассматриваемого случая.

Как и в [11], замеры производились в характерном помещении-представителе, расположенном в общественном здании офисного назначения. Для максимального снижения погрешности, связанной с влиянием инфильтрации наружного воздуха и неорганизованных воздушных потоков внутри здания эксперимент осуществлялся при закрытых окнах, форточках и дверях. Для проведения замеров применялся проникающий цифровой мини-термометр Testo (артикул: 05601110) с ценой деления 0,1 K. С целью исключения влияния всех прочих факторов, не связанных непосредственно с исследуемой зависимостью, прибор был установлен около центра помещения на высоте примерно 1 м от пола таким образом, чтобы на него не попадали холодные конвективные потоки от окон и непосредственное излучение от электрического обогревателя, который играл роль источника теплового возмущения, а также приточные струи общеобменной вентиляционной системы. Кроме того, была проверена холодильная мощность внутреннего блока обслуживающей помещение

сплит-системы (охладитель) — для полной компенсации теплопоступлений она должна быть не ниже мощности нагревателя, в противном случае нужно было отрегулировать одно или второе устройство (в зависимости от возможности), чтобы данное соотношение выполнялось.

В ходе проведения замеров изначально было снято и записано исходное значение

Целесообразно произвести расширенное экспериментальное обоснование зависимости (1), что позволит подтвердить базовые математические соотношения, лежащие в основе исходного уравнения. Ранее авторами была выполнена подобная работа применительно к режиму начального разогрева помещения [11]

температуры воздуха $t_{v,0}$, а затем включались обогреватель и охладитель и фиксировался соответствующий момент времени. Затем записывались моменты, когда текущая температура t_v по показаниям термометра сначала увеличивалась, а потом снижалась на каждые следующие 0,1 °C в соответствии с ценой деления его температурной шкалы.



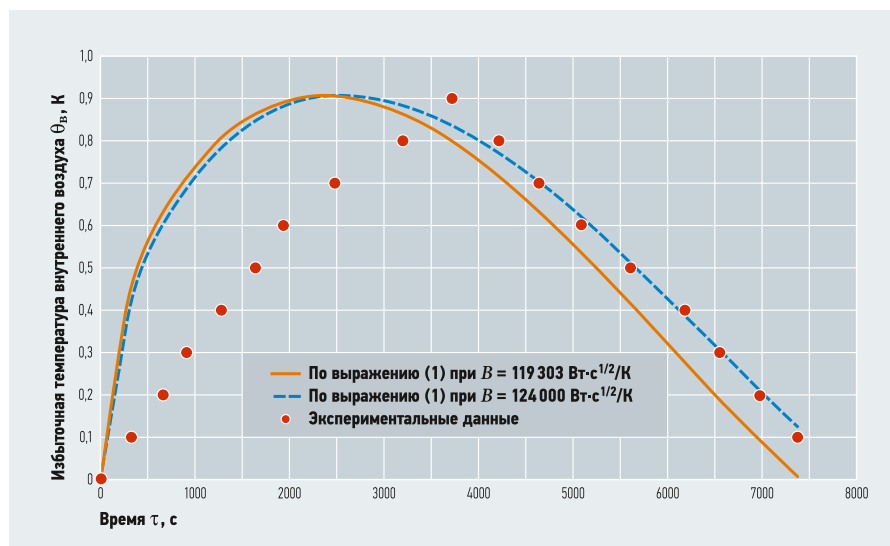


Рис. 1. Зависимость θ_v от времени для исследуемого помещения при работе нагревателя и автоматически регулируемой сплит-системы охлаждения

Эксперимент по программе должен был проводиться до тех пор, пока температура воздуха не вернётся к первоначальной $t_{в,0}$ (при наличии достаточного времени) или, по крайней мере, отклонение температуры не уменьшится примерно в три раза по сравнению с максимальным, чтобы чётко был виден максимум на графике изменения t_v . После этого для каждого замера рассчитывались текущая избыточная температура $\theta_v = t_v - t_{в,0}$ и интервал времени τ [с] от текущего момента до начала опыта.

Результаты измерений изображены на рис. 1 точками.

Для сравнения с теоретической зависимостью (1) было определено значение $Q_{\text{пост}}$ [Вт] — мощность нагревателя по паспорту с учётом последующей настройки, если она производилась. В условиях эксперимента она была равна 1500 Вт. При дальнейшей обработке результатов замеров из них было выбрано значение θ_{max} , которое оказалось равным 0,9 К (рис. 1), а также вычислена теоретическая величина B по выражению (2) [9]:

$$B = \sum_{i=1}^n (A_m \sqrt{\lambda c \rho})_i,$$

где λ , c и ρ — это, соответственно, теплопроводность [Вт/(м·К)], удельная теплоёмкость [Дж/(кг·К)], и плотность [кг/м³] материала слоя i -го массивного ограждения, обращённого внутрь помещения; A_m — площадь каждой из перечисленных ограждающих конструкций, м². Параметры λ , c и ρ в данном случае определялись по Приложению М СП 50.13330.2024 «Тепловая защита зданий» [12] для условий эксплуатации «Б». С учётом размеров помещения и материала его ограждений (наружная стена из кирпичной кладки площадью 6,37 м² — $\lambda = 0,81$ Вт/(м·К), $c = 880$ Дж/(кг·К) и $\rho = 1800$ кг/м³; внутренние стены из гипсокартона сум-

марной площадью 58,75 м² — $\lambda = 0,36$ Вт/(м·К), $c = 840$ Дж/(кг·К) и $\rho = 1050$ кг/м³; пол и потолок из железобетонных пустотных панелей с площадью по 31,8 м² и ориентировочным коэффициентом сплошности 0,6 — $\lambda = 2,04$ Вт/(м·К), $c = 840$ Дж/(кг·К) и $\rho = 2500$ кг/м³) было получено $B = 119\,303$ Вт·с¹/²/К.

С использованием найденных $Q_{\text{пост}}$, θ_{max} и B были вычислены теоретические значения θ_v по формуле (1). Соответствующий график показан на рис. 1 сплошной линией. Легко видеть, что общий характер действительного изменения θ_v со временем достаточно близок к рассчитанному по (1), причём именно при величине B , определённой в соответствии с выражением (2), во всяком случае при t , соответствующем снижению θ_v после достижения уровня θ_{max} . Более медленное нарастание θ_v до этого момента можно объяс-

нить влиянием тепловой инерционности объёма внутреннего воздуха, наличием остаточного воздухообмена и другими факторами, отмеченными в [9]. При этом разброс полученных экспериментальных точек и их отклонение от теоретической кривой в основном лежат в пределах погрешности измерительного прибора, поэтому их можно считать статистически незначимыми.

Впрочем, наиболее точное совпадение для правой ветви кривой имеет место при несколько скорректированном $B = 124$ тыс. Вт·с¹/²/К (пунктир на рис. 1), однако данное значение отличается от вычисленного всего на 4%, что тоже заведомо находится в пределах точности обычного инженерного расчёта.

Таким образом, результаты проведённых натурных замеров дополнительно подтверждают аналитические соотношения (1)–(2) [9] с имеющимися в них числовыми коэффициентами, а также данные, ранее полученные в работах [10, 11], что позволяет их применять для расчётного обоснования принимаемых проектных решений на основании ч. 6 ст. 15 Федерального закона №384-ФЗ «Технический регламент...» [13] в массовом порядке в силу простоты используемых зависимостей. Кроме того, они демонстрируют возможность идентификации построенной математической модели, поскольку позволяют определить действительную величину показателя теплоаккумуляционных свойств помещения B с помощью её подбора для достижения наибольшего совпадения сопоставления теоретических и экспериментальных данных. ●

- СП 60.13330.2020. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха [СНиП 41-01-2003] (с Попр., с Изм. №1–4) / Дата введ.: 01.07.2021.
- Gamayunova O., Petrichenko M., Mottaeva A. Thermo-technical calculation of enclosing structures of a standard type residential building. Proc. of the 21st International Scientific Conference “Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies” (EMMFT-2019). December 10–13, 2019. Voronezh, Russia. Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1614.
- Rafalskaya T. Safety of engineering systems of buildings with limited heat supply. Proc. of the VII International Scientific Conference “Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education” (IPICSE-2020). November 11–12, 2020. Tashkent, Republic of Uzbekistan. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 1030.
- Rafalskaya T., Filatova T. Determination of the temperature graph of heat supply with minimal heat losses. Proc. of the II International Scientific Conference on Intelligent Information Technologies and Mathematical Modeling (IIT-MM-2021). May 30 — June 6, 2021. Divnomorskoe, Russia. Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2131.
- Богословский В.Н. Строительная теплофизика. 3-е изд. — СПб.: АВОК Северо-Запад, 2006. 400 с.
- Торопов А.Л. Гидравлическая и тепловая устойчивость работы автономных систем квартирного теплоснабжения // Вестник МГСУ, 2022. Т. 17. №7. С. 944–953.
- Ryzhov A., Ouerdane H., Gryazina 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.
- Bilous I.Yu., Deshko V.I., Sukhodub I.O. Building energy modeling using hourly infiltration rate. Magazine of Civil Engineering. 2020. Issue 4 (96). Pp. 27–41.
- Самарин О.Д., Ключко А.К. Решение задач нестационарной теплопередачи, энергосбережения и управления климатическими системами. — М.: Изд-во МИСИ-МГСУ, 2022. 93 с.
- Самарин О.Д. Расчёт параметров нестационарного теплового режима помещения при интегральном регулировании климатических систем // Журнал СОК, 2024. №1. С. 92–94.
- Самарин О.Д., Петренко А.Д., Коваленко С.В. Экспериментальная проверка теоретического моделирования начального разогрева помещения // Журнал СОК, 2024. №2. С. 52–54.
- СП 50.13330.2024. Тепловая защита зданий [СНиП 23-02-2003] / Дата введ.: 15.06.2024.
- Технический регламент о безопасности зданий и сооружений: Федеральный закон от 30.12.2009 №384-ФЗ (посл. ред.).

References — see page 79.

Experimental assessment of indoor temperature under integrated control of climate systems. Pp. 33–35.

Oleg D. Samarin, PhD, Associate Professor; **Andery D. Petrenko**, undergraduate student; **Sergey V. Kovalenko**, undergraduate student, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU)

1. SP 60.13330.2020 [The Code of Practice on Design and Construction (The Code of Practice of Russia) No. 60.13330.2020]. *Otoplenie, ventiljatsija i konditsionirovanie vozdukh* [SNiP 41-01-2003] (s Popr., s Izm. No. 1–4) [Heating, ventilation and air conditioning {The Building Rules & Regulations (National Codes and Standards of Russia) No. 41-01-2003} (with Amendment, with Amendments No. 1–4)]. Date of impl.: July 1, 2021. [In Russian]
2. O. Gamayunova, M. Petrichenko, A. Mottaeva. Thermotechnical calculation of enclosing structures of a standard type residential building. Proc. of the 21st International Scientific Conference “Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies” (EMMFT-2019). December 10–13, 2019. Voronezh, Russia. Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1614.
3. T.A. Rafalskaya. Safety of engineering systems of buildings with limited heat supply. Proc. of the VII International Scientific Conference “Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education” (IPICSE-2020). November 11–12, 2020. Tashkent, Republic of Uzbekistan. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 1030.
4. T. Rafalskaya, T. Filatova. Determination of the temperature graph of heat supply with minimal heat losses. Proc. of the II International Scientific Conference on Intelligent Information Technologies and Mathematical Modeling (IITMM-2021). May 30 — June 6, 2021. Divnomorskoe, Russia. Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2131.
5. V.N. Bogoslovsky. *Stroitel'naja teplofizika* [Construction thermal physics]. 3rd edition. St. Petersburg. AVOK Severo-Zapad [Publishing House of the Russian Association of Engineers for Heating, Ventilation, Air-Conditioning, Heat Supply and Building Thermal Physics of the north-west part of Russia (“ABOK North-West”)]. 2006. 400 p. [In Russian]
6. A.L. Toropov. *Gidravlicheskaja i teplovaja ustojchivost' raboty avtonomnykh sistem pokvar-tirnogo teplosnabzhenija* [Hydraulic and thermal stability of autonomous apartment heating systems]. *Vestnik MGSU* [Bulletin of Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU)]. 2022. Vol. 17. No. 7. Pp. 944–953. [In Russian]
7. 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.
8. I.Yu. Bilous, V.I. Deshko, I.O. Sukhodub. Building energy modeling using hourly infiltration rate. *Magazine of Civil Engineering*. 2020. Issue 4 (96). Pp. 27–41.
9. O.D. Samarin, A.K. Klochko. *Reshenie zadach nestatsionarnoj teploperedachi, jenergosber-ezhenija i upravlenija klimaticheskimi sistemami* [Solution of problems of non-stationary heat transfer, energy saving and control of climate systems]. Moscow. *Izd-vo MISI-MGSU* [Publishing House of the National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU)]. 2022. 93 p. [In Russian]
10. O.D. Samarin. *Raschet parametrov nestatsionarnogo teplovogo rezhima pomeschenija pri integral'nom regulirovanii klimaticheskikh sistem* [Calculation of parameters of non-stationary thermal regime of premises with integral regulation of climate systems]. *Zhurnal Sankhnik, Otoplenie, Konditsionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2024. No. 1. Pp. 92–94. [In Russian]
11. O.D. Samarin, A.D. Petrenko, S.V. Kovalenko. *Jeksperimental'naja proverka teoreticheskogo modelirovanija nachal'nogo razogreva pomeschenija* [Experimental verification of the-oretical modeling of initial heating of a room]. *Zhurnal Sankhnik, Otoplenie, Kondit-sionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2024. No. 2. Pp. 52–54. [In Russian]
12. SP 50.13330.2012 [The Code of Practice on Design and Construction (The Code of Practice of Russia) No. 50.13330.2012]. *Teplovaja zashchita zdaniy. Aktualiz. red. SNiP 23-02-2003 (s Izm. No. 1, 2)* [Thermal protection of buildings. Updated version of the Building Rules & Regulations (National Codes and Standards of Russia) No. 23-02-2003 (with Amendments No. 1, 2)]. Date of impl.: July 1, 2013. [In Russian]
13. *Tekhnicheskij reglament o bezopasnosti zdaniy i sooruzhenij* [Technical regulations on the safety of buildings and structures]. *Federal'nyj zakon ot 30.12.2009 No. 384-FZ (posl. red.)* [Federal Law No. 384-FZ of December 30, 2009 (latest version)]. [In Russian]