

**ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ
ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ
НАСЕЛЕННЫХ МЕСТ,
ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ.
ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ
БЕЗОПАСНОСТЬ
СТРОИТЕЛЬСТВА**



УДК 697.112.2.001.24

О.Д. САМАРИН

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ
ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ
ДЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В ПОМЕЩЕНИИ
ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОМ РЕГУЛИРОВАНИИ
КЛИМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Представлены полученные ранее автором теоретические выражения для изменения температуры внутреннего воздуха в помещении, обслуживаемом автоматизированными системами обеспечения микроклимата при использовании интегральных регуляторов. Описано экспериментальное исследование для подтверждения данных зависимостей в условиях выбранного помещения в гражданском здании. Исследованы режимы начального разогрева помещения при автоматическом регулировании местной системы охлаждения, компенсирующей скачкообразные тепlopоступления. Показано, что в пределах погрешности измерений их результаты достаточно хорошо согласуются с теоретическими соотношениями для тех же условий и тем самым подтверждают их обоснованность.

Ключевые слова: микроклимат, температура, регулирование, интегральный закон, тепlopоступления, измерение, термометр.

DOI 10.32683/0536-1052-2021-745-1-37-42

Задача исследования нестационарного теплового режима помещений, обслуживаемых автоматизированными системами обеспечения микроклимата, является весьма актуальной, поскольку она непосредственно связана с обеспечением комфортной и безопасной среды жизнедеятельности человека. При этом в настоящее время в связи с появлением климатического оборудования, имеющего иные динамические характеристики и использующего более сложные алгоритмы управления по сравнению с применяемыми ранее, в ряде случаев требуются новые подходы к данной проблеме. В качестве наиболее интересных работ в этой области, опубликованных в нашей стране и за рубежом в последние годы, можно назвать [1–8]. В них приводятся решения, полученные как аналитическими, так и численными методами, но, как правило, они отличаются либо определенной громоздкостью и трудностью

для использования в инженерной практике, хотя и имеют комплексный характер [1, 3–5, 7, 8], либо, наоборот, учитывают только часть факторов, влияющих на исследуемые процессы в помещении и климатических системах [2, 6].

Ранее автором в публикациях [9, 10] на основе аналитического решения общего уравнения баланса конвективной теплоты в помещении в сочетании с выражением обратной связи, отражающим используемый закон регулирования, были найдены теоретические выражения, описывающие изменение температуры внутреннего воздуха $t_{в}$, °С, с течением времени, при интегральном регулировании климатических систем для скачкообразного изменения теплоступлений, и их некоторые частные случаи при постоянстве или равенстве нулю тех или иных параметров.

Так, если считать, что $Q_{\text{пост}}$ – величина скачка поступлений явной теплоты в воздух помещения от конвективных источников, Вт, а τ – промежуток времени, с, с момента начала переменного теплового воздействия, тогда для избыточной температуры $\theta_{в} = t_{в} - t_{в,0}$, где $t_{в,0}$ представляет собой начальное значение $t_{в}$, при малых значениях времени τ можно записать асимптотическое решение [9]:

$$\theta_{в} = \frac{2Q_{\text{пост}}}{B} \sqrt{\tau}. \quad (1)$$

Параметр B в выражении (1) можно определить по формуле

$$B = \Sigma [A_{м} \sqrt{\lambda c \rho}]_i. \quad (2)$$

Здесь λ , c и ρ – соответственно коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К), удельная теплоемкость, Дж/(кг · К), плотность материала слоя i -го массивного ограждения, обращенного внутрь помещения, например, наружных и внутренних стен и перегородок, а также междуэтажных перекрытий; $A_{м}$ – площадь каждой из перечисленных ограждающих конструкций, м².

Представляется целесообразным, однако, осуществление экспериментальной проверки справедливости соотношения (1), поскольку предположения, использованные при его выводе, лежат в основе также и других решений для более сложных случаев и уже с учетом автоматического регулирования климатического оборудования. На рис. 1 точками показаны результаты такого исследования для одного помещения. Замеры осуществлялись термометром Testo 0560 1110 с ценой деления температурной шкалы 0,1° в центре помещения на высоте 1 м от пола. При этом скачок теплоступлений имитировался включением конвективного электрообогревателя соответствующей мощности, в данном случае равной $Q_{\text{пост}} = 500$ Вт, а величина B определена с учетом действительных теплотехнических характеристик строительных материалов в здании и геометрии помещения. Площадь помещения составляет 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, которая учитывается полностью, так как температурная волна в ограждениях будет распространяться только в одну сторону, наружная стена из легкого бетона плотностью 500 кг/м³ и площадью 7 м²

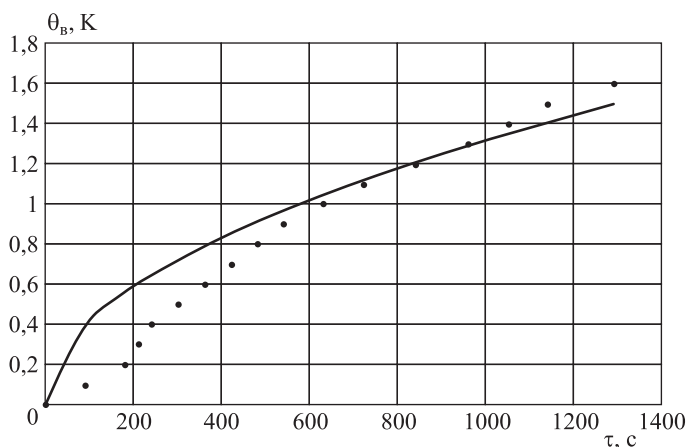


Рис. 1. Зависимость θ_v от времени для расчетного помещения при его начальном прогреве (сплошная линия – по выражению (1), точки – эксперимент)

с окном площадью 1,8 м². В этом случае значение B можно принять равным 24 000 Вт · с^{1/2}/К. Расчетная кривая, вычисленная по формуле (1), изображена сплошной линией.

Легко видеть, что в пределах погрешности измерения совпадение между экспериментальными и теоретическими данными оказывается весьма хорошим, особенно при достаточно больших значениях $\tau > 500$ с, когда уже перестают сказываться начальные эффекты, связанные с теплоинерционностью массы воздуха в помещении и нагревателя, которые не принимались в расчет при выводе формулы (1). Одновременно убеждаемся в правильности принятого значения параметра B для исследуемого помещения и справедливости для него выражения (2). При этом можно заметить, что сопоставление результатов замеров t_v с теоретической кривой может быть использовано и для идентификации используемой математической модели, а именно для определения фактического значения B , участвующего в зависимостях, описывающих нестационарный тепловой режим помещения при автоматизации климатических систем.

Рассмотрим экспериментальное подтверждение одного из таких соотношений, относящегося к использованию местной системы охлаждения, регулируемой по интегральному закону, при одновременном наличии фонового нерегулируемого притока для подачи санитарной нормы наружного воздуха. Для компенсации теплоизбытков использовался внутренний блок сплит-системы, регулируемый позиционно, но из-за большой частоты включений и отключений такое регулирование приближается к интегральному. Как известно, оно характеризуется параметром $K_{\text{пер}}$ – эквивалентным коэффициентом передачи автоматизированной системы, Вт/(К · с), по каналу « $t_v \rightarrow$ производная по времени от $Q_{\text{пер}}$ », где $Q_{\text{пер}}$ представляет собой величину регулируемого теплового потока, Вт, от местных систем охлаждения, который и предназначен для компенсации тепlopотуплений.

Тогда, если использовать подстановку $z = \sqrt{\tau}$, можно записать:

$$\theta(z) = \frac{2Q_{\text{пост}}z}{B} \left[1 - Cz + \frac{2}{3}C^2z^2 - \frac{1}{3}(C^3 + D)z^3 + \frac{1}{15}C(2C^3 + D)z^4 - \right. \\ \left. - \frac{1}{45}C^2(2C^3 + 3D)z^5 + \frac{1}{315}(4C^6 + 16C^3D + 10D^2)z^6 - \dots \right]. \quad (3)$$

Это решение представляет собой дальнейшее развитие полученного в [10] для условий наличия фоновой нерегулируемой общеобменной вентиляции. При не слишком больших τ данный ряд сходится достаточно быстро. В эксперименте величина $K_{\text{рег}}$ в данном случае составила 2,5 Вт/(К · с), поэтому используемый в (3) параметр $D = K_{\text{рег}}/B$, $\text{с}^{-3/2}$, оказывается равным $1,04 \cdot 10^{-4}$, $\text{с}^{-3/2}$, а другой необходимый коэффициент C , $\text{с}^{-1/2}$, здесь можно определить по формуле

$$C = \frac{G_{\text{п}}c_{\text{в}}}{3,6B}, \quad (4)$$

где $G_{\text{п}}$ – массовый расход приточного воздуха, кг/ч, который обычно считается равным величине расхода вытяжного $G_{\text{в}}$ из-за практически мгновенной стационарности воздушного баланса помещения по сравнению с тепловым; $c_{\text{в}}$ – удельная теплоемкость воздуха, равная 1,005 кДж/(кг · К). При проведении измерений расход $G_{\text{п}}$ был равен 430 кг/ч, тогда $C = 0,005 \text{ с}^{-1/2}$, а величина $Q_{\text{пост}}$ в данном режиме была равна 1000 Вт. Результаты замеров показаны точками на рис. 2, а сплошной линией изображена теоретическая кривая, рассчитанная по формуле (3).

Можно заметить, что и здесь совпадение достаточно хорошее, причем наилучшим оно оказывается, если экспериментальные данные поместить со сдвигом влево на 11 мин, т.е. 660 с, что и сделано на рис. 2. Очевидно, это и есть величина запаздывания, связанная с упоминавшимися начальными эффектами. Заметим, что она полностью соответствует моменту, начиная с которого наблюдается наибольшее совпадение и в режиме первичного разогрева (см. рис. 1). Ориентировочно ее можно оценить как $1,6 \cdot 3600V\rho_{\text{в}}/G_{\text{п}} = 1,6 \cdot 3600/n_{\text{а}}$, где V – объем помещения, равный в данном случае $14 \cdot 3 = 42 \text{ м}^3$;

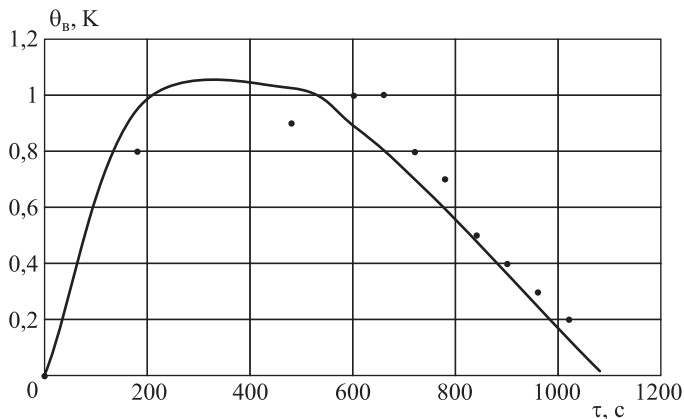


Рис. 2. Зависимость $\theta_{\text{в}}$ от времени для расчетного помещения при автоматическом поддержании $t_{\text{в}}$ (сплошная линия – по выражению (3), точки – эксперимент)

$\rho_v = 1,2 \text{ кг/м}^3$ – плотность воздуха; $n_a = G_n/(V\rho_v)$ – кратность воздухообмена, ч^{-1} , тогда $1,6 \cdot 3600 \cdot 42 \cdot 1,2/430 = 675 \text{ с}$.

Закключение. На основе сопоставления теоретических результатов с экспериментальными данными показано, что ранее полученные аналитические соотношения для избыточной температуры θ_v при начальном разогреве помещения и при интегральном регулировании обслуживающих его систем охлаждения достаточно удачно подтверждаются при учете запаздывания, связанного с теплоинерционностью воздуха помещения, и поэтому могут быть использованы для расчетов в процессе проектирования климатических систем.

Отмечено, что сопоставление теоретических и опытных данных позволяет идентифицировать разработанную математическую модель и экспериментально определять ее параметрические характеристики, необходимые для вычисления θ_v в конкретном помещении с заданным климатическим оборудованием.

Подтверждено, что ориентировочное время запаздывания изменения θ_v по отношению к скачку теплового воздействия обратно пропорционально кратности воздухообмена в помещении.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Rafalskaya T.A.* Reliability and controllability of systems of centralized heat supply // Eastern European Scientific Journal. 2016. No. 2. P. 228–235.
2. *Малявина Е.Г.* Расчет темпа остывания помещения после отключения теплоснабжения // Пром. и граждан. стр.-во. 2015. № 2. С. 55–58.
3. *Дорошенко А.В.* Имитационная термодинамическая модель здания // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2017. № 12. С. 42–43.
4. *De Rosa M., Bianco V., Scarpa F., Tagliafico L.A.* Modelling of energy consumption in buildings: an assessment of static and dynamic models // Russian Journal of Construction Science and Technology. 2016. Vol. 2. No. 1. P. 12–24.
5. *Liu C.-S.* An integral equation method to recover non-additive and non-separable heat source without initial temperature // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2016. Vol. 97. P. 943–953.
6. *Tarasova (Andreeva) D.S., Petrichenko M.R.* Building quasi-stationary thermal behavior // Magazine of Civil Engineering. 2017. No. 4 (72). P. 28–35.
7. *Bilous I.Yu., Deshko V.I., Sukhodub I.O.* Building inside air temperature parametric study // Magazine of Civil Engineering. 2016. No. 8 (68). P. 65–75.
8. *Faouzi D., Bibi-Triki N., Draoui B., Abène A.* Modeling a fuzzy logic controller to simulate and optimize the greenhouse microclimate management using Matlab Simulink // International Journal of Mathematical Sciences and Computing. 2017. Vol. 3. No. 3. P. 12–27.
9. *Самарин О.Д.* Расчет теплового режима помещения при автоматическом регулировании климатических систем // Вестн. МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 4. С. 585–591.
10. *Самарин О.Д.* Расчет теплового режима помещения при использовании интегральных регуляторов для климатических систем // Изв. вузов. Строительство. 2020. № 2. С. 28–35.

Самарин Олег Дмитриевич, канд. техн. наук, доц.

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Получено после доработки 10.12.2020

Samarin Oleg Dmitrievich, PhD, Ass. Professor
National Research Moscow State University of Civil Engineering, Russia

EXPERIMENTAL CONFIRMATION OF THEORETICAL DEPENDENCES FOR INDOOR AIR TEMPERATURE UNDER AUTOMATIC CONTROL OF CLIMATE SYSTEMS

The theoretical expressions obtained earlier by the author for changes in the internal air temperature in a room serviced by automated micro-climate systems using integrated controllers are presented. An experimental study is considered to confirm these dependencies in the conditions of the selected room in a civil building. The modes of initial heating of the room with automatic control of the local cooling system that compensates for heat surges. It is shown that within the measurement error, their results are in good agreement with the theoretical relations for the same conditions and thus confirm their validity.

Key words: microclimate, temperature, regulation, integral algorithm, heat gain, measurement, thermometer.

REFERENCES

1. *Rafalskaya T.A.* Reliability and controllability of systems of centralized heat supply. Eastern European Scientific Journal. 2016. No. 2. Pp. 228–235.
2. *Malyavina E.G.* Raschet tempa ostyvaniya pomescheniya posle otklyucheniya teplosnabzheniya [Calculation of the rate of cooling of a room after turning off the heat supply]. Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering]. 2015. No. 2. Pp. 55–58. (in Russian)
3. *Doroshenko A.V.* Imitatsionnaya termodinamicheskaya model' zdaniya [Simulation thermodynamic model of the building]. BST: Byulleten' stroitel'noy tekhniki [Bulletin of construction equipment]. 2017. No. 12. Pp. 42–43. (in Russian)
4. *De Rosa M., Bianco V., Scarpa F., Tagliafico L.A.* Modelling of energy consumption in buildings: an assessment of static and dynamic models. Russian Journal of Construction Science and Technology. 2016. Vol. 2. No. 1. Pp. 12–24.
5. *Liu C.-S.* An integral equation method to recover non-additive and non-separable heat source without initial temperature. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2016. Vol. 97. Pp. 943–953.
6. *Tarasova (Andreeva) D.S., Petrichenko M.R.* Building quasi-stationary thermal behavior. Magazine of Civil Engineering. 2017. No. 4 (72). Pp. 28–35.
7. *Bilous I.Yu., Deshko V.I., Sukhodub I.O.* Building inside air temperature parametric study. Magazine of Civil Engineering. 2016. No. 8 (68). Pp. 65–75.
8. *Faouzi D., Bibi-Triki N., Draoui B., Abène A.* Modeling a fuzzy logic controller to simulate and optimize the greenhouse microclimate management using Matlab Simulink. International Journal of Mathematical Sciences and Computing. 2017. Vol. 3. No. 3. Pp. 12–27.
9. *Samarin O.D.* Raschet teplovogo rezhima pomescheniya pri avtomaticheskom regulirovanii klimaticheskikh sistem [The calculation of the thermal mode of a room with automatic regulation of climate systems]. Vestnik MGSU [Bulletin MGSU]. 2020. Vol. 15. Iss. 4. Pp. 585–591. (in Russian)
10. *Samarin O.D.* Raschet teplovogo rezhima pomescheniya pri ispol'zovanii integral'nykh regulyatorov dlya klimaticheskikh sistem [The calculation of the thermal mode of a room using the integral controllers for climate control systems]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2020. No. 2. Pp. 28–35. (in Russian)