

Комплексный учет влияния различных факторов на темп начального разогрева или охлаждения помещения

Рецензия эксперта на статью получена
15.11.2024 [The expert review of the article
was received on November 15, 2024]

Задача расчета изменения температуры воздуха t_v [°C] и поверхностей ограждающих конструкций в помещении при его начальном разогреве или охлаждении в результате скачкообразного изменения теплопотерь или теплопоступлений имеет большое значение, поскольку ее решение может быть использовано в очень многих случаях. В частности, это бывает нужно при исследовании аварийных режимов работы систем теплоснабжения или нестационарных тепловых процессов при обеспечении внутреннего микроклимата автоматизированными климатическими системами. В первом варианте речь обычно идет о достаточно продолжительных интервалах времени, в течение которых температурная волна успевает проникнуть во всю толщу ограждений, и, таким образом, решение обычно получается в экспоненциальной форме [1–3], что соответствует так называемому «регулярному режиму» нагрева или охлаждения [4].

В то же время для целей анализа нестационарного теплового режима помещения и синтеза систем автоматического регулирования тепломассообменного оборудования климатических систем более существенное значение имеет рассмотрение краткосрочных процессов непосредственно после возникновения теплового возмущения. Здесь принципиальным вопросом оказывается именно скорость распространения температурных волн в массиве ограждений, обращенных в помещение.

Однако до настоящего момента подобные режимы рассматривались значительно реже, при этом данные задачи решались либо с такими же упрощениями,

как и для регулярного режима [5–7], либо получаемые зависимости оказывались неявными и формулировались в понятиях теории теплоустойчивости, непосредственно предназначенной для периодических колебаний теплового потока [4].

В публикации [8] и некоторых других работах автором было сформулировано весьма простое аналитическое выражение для избыточной температуры внутреннего воздуха $\theta_v = |t_v - t_{v,0}|$, [K], где $t_{v,0}$ — исходное значение t_v , для относительно малых моментов времени τ [с] (порядка нескольких часов), которое выглядит так:

$$\theta_v = \frac{2Q_{\text{пост}}}{B} \sqrt{\tau}, \quad (1)$$

здесь $Q_{\text{пост}}$ — величина скачка теплопотерь или теплопоступлений, Вт; B — показатель теплоаккумуляционных свойств помещения, Вт·√с/К.

С учетом закономерностей распространения температурных волн в твердой среде его значение вычисляется по формуле [8]:

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

где λ , c и ρ — это теплопроводность [Вт/(м·К)], удельная массовая теплоемкость [Дж/(кг·К)] и плотность [кг/м³], соответственно, материала слоя i -й массивной ограждающей конструкции, обращенной внутрь помещения, например, наружных и внутренних стен, перегородок и междуэтажных перекрытий (тогда двери, окна, а также тонкие слои краски и штукатурки учитывать не требуется); A_m — площадь каждой из таких конструкций [м²], которую можно определить исходя из геометрических размеров помещения.

УДК 697.1:699.86. Научная специальность: 2.1.3.

Комплексный учет влияния различных факторов на темп начального разогрева или охлаждения помещения

О. Д. Самарин, к.т.н., доцент, кафедра теплогазоснабжения и вентиляции, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)

Рассмотрен характер изменения температуры внутреннего воздуха в помещении в начальные моменты времени при скачкообразном изменении теплопотерь или теплопоступлений. Представлены полученные ранее автором зависимости, отражающие влияние на процесс начального разогрева или охлаждения различных факторов, в том числе фонового нерегулируемого воздухообмена, тепловой инерционности объема внутреннего воздуха и преобладания лучистой составляющей в тепловом возмущении. Дан анализ указанных зависимостей и отмечен их общий асимптотический вид, позволяющий построить универсальное соотношение, которое учитывает воздействие всех перечисленных факторов на темп изменения температуры. Показано, что такое воздействие должно иметь мультипликативный вид, в силу чего общий поправочный коэффициент в формуле для избыточной температуры должен равняться произведению всех трех частных, что подтверждается сопоставлением с экспериментальными данными.

Ключевые слова: температура, тепловой режим, начальный разогрев, воздухообмен, тепловая инерционность, лучистый поток.

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

Comprehensive consideration of the influence of various factors on the rate of initial heating or cooling of the room

O. D. Samarina, PhD, Associate Professor, the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU)

The nature of the change in the temperature of the indoor air in the room at the initial time points with an abrupt change in heat loss or heat gain is considered. The dependences obtained earlier by the author are presented, reflecting the influence of various factors on the process of initial heating or cooling, including background unregulated air exchange, thermal inertia of the volume of internal air and the predominance of the radiant component in the thermal disturbance. The analysis of these dependencies is given and their general asymptotic form is noted, which makes it possible to construct a universal relationship that takes into account the effect of all these factors on the rate of temperature change. It is shown that such an effect should have a multiplicative form, which means that the total correction factor in the formula for excessive temperature should be equal to the product of all three quotients, which is confirmed by comparison with experimental data. The presentation is illustrated with numerical and graphical examples.

Keywords: temperature, thermal regime, initial heating, air exchange, thermal inertia, radiant flux.



Однако решение в форме (1) получено для простейшего случая, когда не учитывается влияние на процесс никаких других факторов, так или иначе осложняющих или замедляющих разогрев или охлаждение, а принимается во внимание только поступающий тепловой поток и теплофизические свойства ограждающих конструкций. Между тем достаточно очевидно, что объем находящегося в помещении внутреннего воздуха обладает определенной тепловой инерционностью, кроме того, при наличии фоновой нерегулируемого общеобменного притока (например, вследствие инфильтрации) темп изменения температуры тоже должен снижаться.

Достаточно очевидно, что объем находящегося в помещении внутреннего воздуха обладает определенной тепловой инерционностью, кроме того, при наличии фоновой нерегулируемого общеобменного притока темп изменения температуры тоже должен снижаться

Наконец, если источник теплового возмущения имеет преимущественно лучистый характер, что характерно, в частности, для теплопритоков от солнечной радиации или от технологического оборудования, теплота в первую очередь будет поступать на поверхности в помещении, а уже затем в воздух в результате конвективного теплообмена, что также должно замедлять процесс разогрева на начальном этапе. Данные вопросы по отдельности рассматривались ранее автором в публикациях [8–10].

Так, в работе [8] было исследовано влияние нерегулируемого воздухообмена и установлено, что его можно учесть за счет включения в формулу (1) дополнительного понижающего коэффициента. Однако при этом была использована аналогия с процессом выравнивания температуры в помещении при наличии только

вентиляции без появления дополнительных теплотерь или теплопоступлений, что приводит к не вполне корректным с точки зрения их физического смысла выводам. Поэтому целесообразно получить более точное решение с помощью рассмотрения дифференциального уравнения теплового баланса помещения для данного случая, которое тогда, очевидно, будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{d\theta_{\text{в}}}{d\tau} B\sqrt{\tau} + \frac{G_{\text{п}} c_{\text{в}} \theta_{\text{в}}}{3600} = Q_{\text{пост}}, \quad (3)$$

где $c_{\text{в}}$ — удельная массовая теплоемкость воздуха, $c_{\text{в}} = 1005$ Дж/(кг·К); $G_{\text{п}}$ — массовый расход фоновой притока, кг/ч. Подстановкой $z = \sqrt{\tau}$ уравнение (3) сводится к линейному неоднородному первого порядка, которые всегда интегрируются, по крайней мере в квадратурах, а здесь решение можно довести до конца в элементарных функциях, и тогда искомое выражение для понижающего множителя с учетом (1) и очевидного начального условия $\theta_{\text{в}} = 0$ при $\tau = 0$ будет иметь вид:

$$k_1 = \frac{1}{x_1} [1 - \exp(-x_1)], \quad (4)$$

где $x_1 = \frac{2G_{\text{п}} c_{\text{в}} \sqrt{\tau}}{3600B}$ — безразмерный комплекс, отражающий отношение количества теплоты, ассимилированного вентиляционным воздухом и массивом ограждений помещения. Используя разложение экспоненциальной функции в ряд Тейлора, легко видеть, что при $\tau \rightarrow 0$ величина k_1 стремится к 1, а с ростом τ действительно начинает убывать. Однако его предельное значение для $\tau \rightarrow \infty$ будет составлять $1/x_1$, и, следовательно, избыточная температура воздуха станет приближаться к $3600Q_{\text{пост}}/(G_{\text{п}} c_{\text{в}})$, то есть к уровню, определяемому величиной $Q_{\text{пост}}$ и имеющимся воздухообменом в стационарном режиме. Таким образом, формула (4) получает достаточно прозрачный физический смысл, поскольку выглядит как описание процесса асимптотического затухания отклонения, но не от невозмущенного решения (1), а от стационарных условий.

Тепловая инерционность объема внутреннего воздуха в помещении с точки зрения ее влияния на скорость разогрева или охлаждения изучалась автором в работе [9], где было показано, что соответствующий понижающий множитель для формулы (1) должен выглядеть как:

$$k_2 = 1 - \frac{1}{x_2} \ln(1 + x_2), \quad (5)$$

где $x_2 = \frac{B\sqrt{\tau}}{V_{\text{пом}} c_{\text{в}} \rho_{\text{в}}}$ — некоторый безразмер-

ный параметр, показывающий в данном случае соотношение количества теплоты, поглощенного материалом массивных ограждающих конструкций и объемом воздуха помещения $V_{\text{пом}}$, м³. Здесь $\rho_{\text{в}}$ — плотность этого воздуха, которую при решении задач вентиляции и кондиционирования обычно считают равной 1,2 кг/м³. Отметим, что зависимость (5) имеет несколько иной вид, чем (4), но нетрудно проверить, что она имеет асимптотический характер с постепенным уменьшением отклонения от (1) с течением времени.

Наконец, вопрос об особенностях разогрева или охлаждения помещения в условиях преобладания лучистых тепловых возмущений можно решить, если записать уравнение типа (3), но при $G_{\text{п}} = 0$ и с учетом конвективного теплообмена на внутренних поверхностях, поскольку тогда теплота от источника попадает сначала непосредственно на них, а уже затем от ограждений начинается нагрев воздуха.

При этом получается, что данное обстоятельство тоже можно отразить понижающим коэффициентом, для которого будет справедлива зависимость:

$$k_3 = \frac{2\exp(-y^2)}{y} \int_0^y \exp(y^2) y^2 dy \approx \frac{2}{\pi} \arctg(y^2), \quad (6)$$

где $y = \sqrt{\frac{\Lambda \tau}{V_{\text{пом}} c_{\text{в}} \rho_{\text{в}}}}$ — безразмерный комплекс, отвечающий соотношению между тепловым потоком на поверхностях за счет конвекции и поглощением теплоты в объеме воздуха помещения. Здесь величина Λ [Вт/К] имеет смысл общего показателя конвективного теплообмена для ограждений в помещении:

$$\Lambda = \sum (\alpha_{\text{к},i} A_i), \quad (7)$$

где площади A_i [м²] уже необходимо принимать для всех имеющихся поверхностей, обращенных в помещение, в том числе и для так называемых «легких» конструкций, например, окон и дверей. Параметры $\alpha_{\text{к},i}$ [Вт/(м²·К)] — это коэффициенты конвективного теплообмена между i -й поверхностью и воздухом помещения.

Можно показать, что выражение (6) также является асимптотическим, то есть наблюдаемое расхождение между температурой воздуха и поверхностей ограждающих конструкций в процессе разогрева или охлаждения помещения при наличии преимущественно лучистых теплопоступлений с течением времени затухает, как и влияние других рассмотренных ранее факторов.

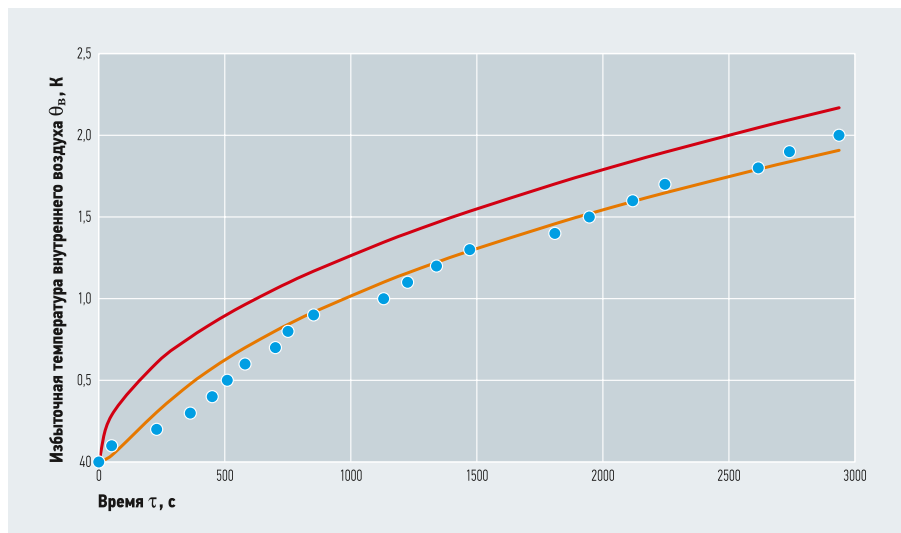
В связи с этим можно поставить задачу объединения зависимостей (4)–(6) для получения универсального соотношения, которое с приемлемой для инженерной практики точностью учитывало бы совместное влияние всех перечисленных обстоятельств на темп изменения температуры воздуха. Разумеется, соответствующая формула будет заведомо носить аппроксимационный характер в силу несоответствия формы (4)–(6), а, кроме того, их нелинейный характер, строго говоря, не

Показано, что совместное действие тепловой инерционности объема воздуха помещения, фонового воздухообмена и лучистого характера теплового возмущения на скорость начального разогрева или охлаждения помещения действительно может быть учтено произведением соответствующих понижающих коэффициентов

позволяет непосредственно применять принцип суперпозиции для такого случая. Однако, если нас интересует в первую очередь инженерный расчет, который подразумевает получение конкретного результата, подобное допущение может быть оправданным.

Из общих соображений можно отметить, что результирующее выражение должно иметь вид, позволяющий наложение влияния рассматриваемых факторов, причем такое наложение должно носить мультипликативный характер. Иначе говоря, полный поправочный коэффициент должен являться произведением всех трех частных: $k = k_1 k_2 k_3$.

На рис. 1 приведено сопоставление результатов вычисления избыточной температуры по формулам (1), (4)–(6) с данными экспериментальных замеров для характерного помещения офисного типа в общественном здании с преимущественно лучистым электронагревателем в качестве источника теплопоступлений [10], отмеченными точками. При этом величина B принималась на уровне 100 тыс. Вт·√с/К



... Рис. 1. Зависимость θ_v от времени для исследуемого помещения в условиях его начального разогрева [красная линия — по выражению (1), оранжевая — то же с понижающими коэффициентами (4)–(6), точки — экспериментальные данные]

в соответствии с теплофизическими характеристиками материалов ограждений и их геометрическими размерами, суммарная площадь их поверхностей $\sum A_i = 81,7 \text{ м}^2$ и объем помещения $V_{\text{пом}} = 45 \text{ м}^3$, а средняя величина $\alpha_{k,i}$ считалась равной $3,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Тогда, если принять кратность воздухообмена около 5,0, получим, что расход притока $G_{\text{п}} = 45 \times 5 \times 1,2 = 270 \text{ кг/ч}$, и в этом случае после вычисления поправочных множителей по выражениям (4)–(6) оказывается, что экспериментальные точки очень хорошо укладываются на теоретическую кривую. Во всяком случае, отклонения в большинстве случаев не превышают погрешности применяемого измерительного прибора — цифрового контактного мини-термометра Testo 0560 1110 с ценой деления 0,1 К.

Таким образом, мы показали, что совместное действие тепловой инерционности

объема воздуха помещения, фонового воздухообмена и лучистого характера теплового возмущения на скорость начального разогрева или охлаждения помещения действительно может быть учтено произведением соответствующих понижающих коэффициентов. Сравнение получаемых при этом данных с результатами эксперимента подтверждает такую возможность и тем самым позволяет использовать предлагаемую методику для инженерных расчетов, поскольку зависимости (4)–(6) весьма просты и требуют минимального количества исходных данных. Кроме того, при реализации рассматриваемого алгоритма можно при необходимости проводить идентификацию построенной математической модели, поскольку сопоставление теоретических и опытных значений позволяет методом подбора определить интересующие нас параметры помещения и системы вентиляции. ●

- Mansurov R., Rafalskaya T., Efimov D. Mathematical modeling of thermal technical characteristics of external protections with air layers. Construction the Formation of Living Environment (FORM-2019): Proc. of XXII International Scientific Conference. April 18–21, 2019. Tashkent, Uzbekistan. In: E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 97. 10 p.
- Rafalskaya T. Safety of engineering systems of buildings with limited heat supply. Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education (IPICSE-2020): Proc. of VII International Scientific Conference. November 11–14, 2020. Tashkent, Uzbekistan. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 1030.
- Рафальская Т.А., Дрепина К.А. Аналитическое решение уравнения теплопроводности для определения времени остывания помещений при отключении теплоснабжения / Инженерные системы и городское хозяйство: Мат. Национальн. (всеросс.) науч.-практ. конф. (20–24.03.2023, г. Санкт-Петербург). — СПб.: Изд-во СПбГАСУ, 2023. 359 с.
- Богословский В.Н. Строительная теплофизика. Изд. 3-е. — СПб.: АВОК Северо-Запад, 2006. 400 с.
- 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.
- Belous A.N., Kotov G.A., Belous O.E., Garanzha I.M. Calculation of heat resistance of external enclosing structures with heat-conducting inclusions. Magazine of Civil Engineering. 2022. Vol. 113. Issue 5.10 p.
- Bilous I.Yu., Deshko V.I., Sukhodub I.O. Building energy modeling using hourly infiltration rate. Magazine of Civil Engineering. 2020. Vol. 96. Issue 4. Pp. 27–41.
- Самарин О.Д. Уточнение расчета начального разогрева помещения с учетом теплоаккумуляционных свойств воздуха // Известия вузов. Строительство, 2023. №1. С. 77–83.
- Самарин О.Д. Учет тепловой инерционности объема внутреннего воздуха при расчете начального разогрева помещения // Известия вузов. Строительство, 2024. №5. С. 101–107.
- Самарин О.Д., Петренко А.Д., Коваленко С.В. Экспериментальная проверка теоретического моделирования начального разогрева помещения // Журнал СОК, 2024. №2. С. 52–54.

References — see page 96.

[Comprehensive consideration of the influence of various factors on the rate of initial heating or cooling of the room. Pp. 48–52.](#)

[Oleg D. Samarin](#), PhD, Associate Professor, the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU)

1. R. Mansurov, T. Rafalskaya, D. Efimov. Mathematical modeling of thermal technical characteristics of external protections with air layers. Construction the Formation of Living Environment (FORM-2019): Proc. of the XXII International Scientific Conference. April 18–21, 2019. Tashkent, Uzbekistan. In: E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 97. 10 p.
2. T. Rafalskaya. Safety of engineering systems of buildings with limited heat supply. Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education (IPICSE-2020): Proc. of the VII International Scientific Conference. November 11–14, 2020. Tashkent, Uzbekistan. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 1030.
3. T.A. Rafal'skaya, K.A. Drepina. *Analiticheskoe reshenie uravneniya teploprovodnosti dlja opredeleniya vremeni ostyvaniya pomeshenij pri otkljuchenii teplosnabzhenija* [Analytical solution of the heat conduction equation for determining the cooling time of premises when the heat supply is disconnected]. *Inzhenernye sistemy i gorodskoe khozjajstvo: Mat. Nats. (vsross.) nauch.-prakt. konf. (20–24.03.2023, g. Sankt-Peterburg)* [Engineering Systems and Urban Economy: Proc. of the National (All-Russian) Scientific and Practical Conference. Mart 20–24, 2023. St. Petersburg]. St. Petersburg. *Izd-vo SPbGASU* [Publishing House of the St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering]. 2023. 359 p. [In Russian]
4. V.N. Bogoslovskij. *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]
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. A.N. Belous, G.A. Kotov, O.E. Belous, I.M. Garanzha. Calculation of heat resistance of external enclosing structures with heat-conducting inclusions. *Magazine of Civil Engineering*. 2022. Vol. 113. Issue 5.10 p.
7. I.Yu. Belous, V.I. Deshko, I.O. Sukhodub. Building energy modeling using hourly infiltration rate. *Magazine of Civil Engineering*. 2020. Vol. 96. Issue 4. Pp. 27–41.
8. O.D. Samarin. *Utochnenie rascheta nachal'nogo razogreva pomeshenija s uchetom teploakkumuljatsionnykh svoystv vozdukhha* [Clarification of the calculation of the initial heating of the room taking into account the heat accumulation properties of air]. *Izvestija vuzov. Stroitel'stvo* [News of universities. Series: Construction]. 2023. No. 1. Pp. 77–83. [In Russian]
9. O.D. Samarin. *Uchet teploinertsionnosti ob'ema vnutrennego vozdukhha pri raschete nachal'nogo razogreva pomeshenija* [Taking into account the thermal inertia of the internal air volume when calculating the initial heating of the room]. *Izvestija vuzov. Stroitel'stvo* [News of universities. Series: Construction]. 2024. No. 5. Pp. 101–107. [In Russian]
10. [O.D. Samarin, A.D. Petrenko, S.V. Kovalenko. *Eksperimental'naja proverka teoreticheskogo modelirovaniya nachal'nogo razogreva pomeshenija* \[Experimental verification of theoretical modeling of the initial heating of the room\]. *Zhurnal Santechnika, otoplenie, konditsionirovanie \(SOK\)* \[Journal of Plumbing, Heating, Ventilation\]. 2024. No. 2. Pp. 52–54. \[In Russian\]](#)