



Экспериментальная проверка теоретической зависимости для начального разогрева или охлаждения ограждающих конструкций

Рецензия эксперта на статью получена
04.02.2026 [The expert review of the article
was received on February 4, 2026]

Оценка поведения климатических параметров в помещении при переменных теплоступлениях и теплопотерях имеет большое значение, поскольку непосредственно связана с обеспечением безопасности жизнедеятельности людей и конструктивных элементов здания в соответствии с требованиями Федерального закона №384-ФЗ [1]. Знание закономерностей такого режима является основой для последующего синтеза систем автоматизации тепломассообменного оборудования, обслуживающего данное помещение. Конечно, с точки зрения практических потребностей поддержания комфортности внутреннего микроклимата нас в первую очередь интересует величина температуры воздуха $t_{\text{в}}$ [°C], тем более что только $t_{\text{в}}$ входит в основную часть уравнений, описывающих нестационарный тепловой режим всего помещения в рассматриваемых условиях, а кроме того, датчики систем автоматического регулирования в подавляющем большинстве случаев реагируют именно на данный параметр. Иначе говоря, с чисто технической точки зрения температура воздуха

более доступна для измерения и контроля, и этим преимущественно объясняется то обстоятельство, что в ранее выполненных экспериментальных работах [2, 3] выполнялась проверка теоретических зависимостей, касающихся только её.

Однако, разумеется, радиационная температура тоже имеет значение, и её оптимальные и допустимые диапазоны также косвенно нормируются в ГОСТ 30494–2011 [4] через эквивалентную температуру помещения $t_{\text{п}}$ [°C]. При этом температура внутренних поверхностей ограждающих конструкций $t_{\text{пов}}$ [°C] непосредственно связана с плотностью теплового потока через данные поверхности, входящей в качестве одной из составляющих в общий тепловой баланс помещения. В то же время в большинстве существующих исследований в этой области либо рассматриваются исключительно аварийные режимы [5, 6], характеризующиеся достаточно продолжительным интервалом времени с момента теплового возмущения, причём зачастую не делается чёткого различия между поведением $t_{\text{в}}$ и $t_{\text{пов}}$, либо речь идёт о перио-

УДК 697.1:699.86. Научная специальность: 2.1.3.

Экспериментальная проверка теоретической зависимости для начального разогрева или охлаждения ограждающих конструкций

Олег Дмитриевич Самарин, к.т.н., доцент, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); **Дарья Алексеевна Колесник**, студент (бакалавриат), НИУ МГСУ; **Александр Алексеевич Круглов**, студент (бакалавриат), НИУ МГСУ

Рассмотрена зависимость температуры на внутренней поверхности ограждений помещения от времени при скачкообразном изменении теплоступлений или теплопотерь. Приведена ранее полученная теоретическая формула для такой зависимости, включающая теплофизические характеристики материала ограждений и основанная на закономерностях распространения в нём температурной волны для массивных конструкций. Представлены результаты натурных замеров температуры на поверхностях внутренних стен в характерных помещениях для условий их начального разогрева при известной тепловой мощности нагревателя, а также заданных геометрических и теплофизических параметрах ограждений, свидетельствующие о справедливости указанной формулы. Дана статистическая оценка погрешности полученных данных и выявлен интервал времени с момента возникновения теплового возмущения, когда можно использовать рассматриваемую зависимость с учётом обычной точности инженерного расчёта.

Ключевые слова: температура, микроклимат, тепловой режим, теплоступления, ограждения, начальный разогрев, температурная волна.

UDC 697.1:699.86. Scientific specialty number: 2.1.3.

Experimental verification of the theoretical dependence for the initial heating or cooling of enclosing structures

Oleg D. Samarin, PhD (Engineering), Associate Professor, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU); **Daria Al. Kolesnik**, undergraduate student, NRU MGSU; **Alexander Al. Kruglov**, undergraduate student, NRU MGSU

The dependence of the temperature on the inner surface of the fences of the room on time with a sudden change in heat supply or heat loss is considered. The previously obtained theoretical formula for this dependence is given, which includes the thermal characteristics of the fence material and is based on the patterns of propagation of a temperature wave in it for massive structures. The results of full-scale temperature measurements on the surfaces of internal walls in typical rooms for the conditions of their initial heating at a known thermal power of the heater, as well as the specified geometric and thermal parameters of the fences, indicating the validity of the specified formula, are presented. A statistical estimate of the error of the data obtained is given and the time interval from the moment of the occurrence of a thermal disturbance is revealed, when the dependence under consideration can be used, taking into account the usual accuracy of engineering calculations.

Key words: temperature, microclimate, thermal regime, heat gain, enclosing structures, initial heating, temperature wave.

дических колебаниях с соответствующим использованием аппарата теории теплоустойчивости [7], или же решение получается в достаточно сложном виде, мало пригодном для использования в инженерной практике [8–10].

Поэтому представляется целесообразным, несмотря на определённые затруднения, связанные с организацией выполнения соответствующих замеров, произвести экспериментальное подтверждение полученного в [2] выражения для $t_{\text{пов}}$ при скачкообразном изменении теплоступлений в помещение, в первую очередь для проверки обнаруженного отличия в числовом коэффициенте от значения, приводимого в существующих работах [11, 12].

Речь идёт о следующей зависимости для осреднённой избыточной температуры $\theta_{\text{пов}} = |t_{\text{пов}} - t_{\text{пов},0}|$ [K] (фактически — избыточной радиационной температуры помещения), где $t_{\text{пов},0}$ — начальное значение $t_{\text{пов}}$, для малых моментов времени, которое выглядит следующим образом:

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

Здесь $Q_{\text{пост}}$ — величина скачка теплопотерь или теплоступлений, Вт; B — показатель теплоаккумуляционных свойств помещения, Вт·с^{1/2}/K; τ — интервал времени с момента начала разогрева или охлаждения, с. Строго говоря, в [2, 3] выражение (1) непосредственно записывается не для $\theta_{\text{пов}}$, а для избыточной температуры воздуха, но можно показать [2], что из-за малой теплоаккумулирующей способности воздушного объёма их разницей можно пренебречь. Закономерности распространения тепловых возмущений в твёрдых средах дают для значения B формулу [2, 3]:

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

где λ , c и ρ — это, соответственно, теплопроводность [Вт/(м·K)], удельная теплоёмкость [Дж/(кг·K)] и плотность [кг/м³] материала i -го слоя массивного ограждения, обращённого внутрь помещения, например, наружных и внутренних стен и перегородок, а также междуэтажных перекрытий (при этом окна и двери, а также тонкие слои краски и штукатурки не учитываются); A_m — площадь каждой из указанных ограждающих конструкций в соответствии с размерами помещения, м². Тем не менее, из решений, представленных в [11, 12], следует, что числовой коэф-

Особенностью рассматриваемого случая по сравнению с исследованным в [2, 3] является то обстоятельство, что здесь измеряется температура на поверхности конкретной ограждающей конструкции, причём каждая из них может иметь различные теплофизические свойства

фициент в формуле (1) должен равняться не 2,0, а $2/\sqrt{\pi} \approx 1,13$.

Однако особенностью рассматриваемого случая по сравнению с исследованным в [2, 3] является то обстоятельство, что здесь измеряется температура на поверхности конкретной ограждающей конструкции, причём каждая из них может иметь различные теплофизические свойства. Поскольку помещение образует замкнутый тепловой контур, а используемый теплоисточник является близким к точечному и диффузному, в рамках модели с сосредоточенными параметрами [2] допустимо считать, что тепловой поток $Q_{\text{пост}}$ распределяется между всеми ограждениями пропорционально их площадям. Следовательно, в данном режиме общей для всех конструкций будет плотность теплового потока $q = Q_{\text{пост}}/\sum A_m$ [Вт/м²], и тогда формулы (1)–(2) можно переписать таким образом:

$$\theta_{\text{пов},i} = \frac{2q\sqrt{\tau}}{\sqrt{\lambda c \rho}}, \quad (3)$$

где λ , c и ρ принимаются уже непосредственно для ограждения, для которого производятся замеры.

При проведении эксперимента вначале были закрыты все окна, форточки и двери для обеспечения стабильных условий и исключения влияния инфильтрационных воздушных потоков на процесс разогрева. Затем была выбрана точка измерения около центра внутренней стены на высоте не ниже 1 м от пола вне зон воздействия нагретого воздуха от теплоисточника и приточных струй, если они имеются в помещении. В процессе выполнения замеров чувствительный элемент термометра плотно прикладывается к поверхности стены. При этом сначала было зафиксировано исходное значение температуры поверхности $t_{\text{пов},0}$. После этого был включён нагреватель и отмечен момент начала опыта.



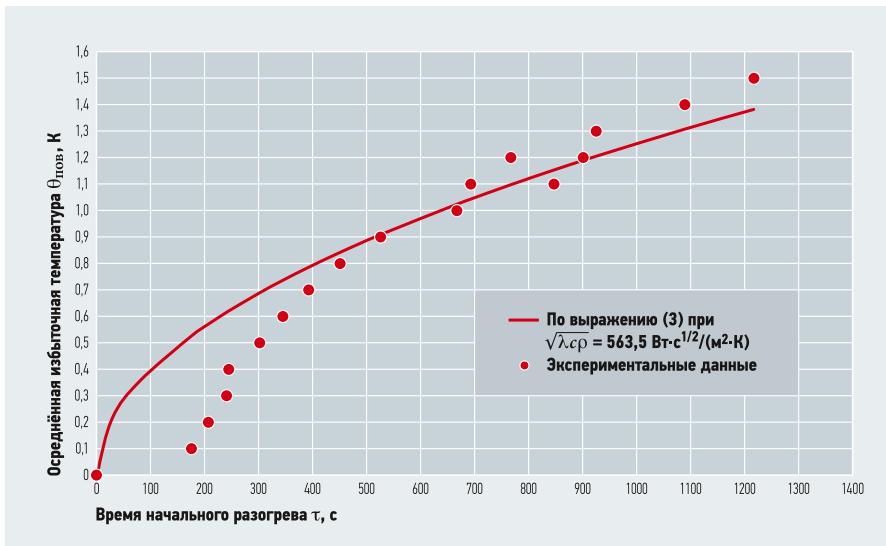


Рис. 1. Зависимость осреднённой избыточной температуры $\theta_{\text{пов}}$ от времени для внутренней стены исследуемого помещения при его начальном разогреве

В течение эксперимента записывалось время, когда величина $t_{\text{пов}}$ увеличивается на каждые последующие $0,1^\circ\text{C}$ в соответствии с точностью измерительного прибора, в качестве которого применялся цифровой термометр Testo 0560 1110. Измерения продолжались до достижения суммарного повышения температуры примерно на $1,5^\circ\text{C}$, чтобы получить не менее 16 точек измерений. Каждому замеру сопоставляем расчёт избыточной температуры $\theta_{\text{пов}} = t_{\text{пов}} - t_{\text{пов},0}$ и определяем интервал времени τ с начала эксперимента до данного момента.

Результаты измерений показаны на рис. 1 точками.

Для сопоставления с теоретической зависимостью (3) используем паспортную мощность нагревателя $Q_{\text{пост}} = 1500$ Вт. Площади ограждающих конструкций $A_{\text{м},i}$ находим по размерам помещения, они составляют 15,0 и 21,2 м^2 для наружных стен и столько же для противоположащих им внутренних, и по 31 м^2 для пола и потолка. Таким образом, значение:

$$q = Q_{\text{пост}} / \sum A_{\text{м}} = 1500 / 134,4 = 11,16 \text{ Вт/м}^2.$$

При этом мы так подбираем величину $\sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho}$, чтобы график теоретического значения $\theta_{\text{пов,теор}}$, изображённый сплошной линией на рис. 1, был максимально близок к экспериментальным точкам, за исключением малых τ , когда эти точки могут располагаться ниже теоретической кривой из-за тепловой инерции объёма воздуха. Так получается при:

$$\sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho} \approx 560 \text{ Вт} \cdot \text{с}^{1/2} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Далее сравниваем подобранное значение $\sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho}$ с расчётным, которое определяем по теплофизическим параметрам материала выбранной стены, принятым

согласно нормативам СП 50.13330.2024 [13] для условий эксплуатации «Б». Для $\lambda = 0,36$ Вт/(м·К), $c = 840$ Дж/(кг·К) и $\rho = 1050$ кг/м³ (гипсокартон) находим

$$\sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho} = 563,5 \text{ Вт} \cdot \text{с}^{1/2} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

с отклонением от подобранного менее чем на 1 %. График зависимости (3) с данным $\sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho}$ совпадает со сплошной линией на рис. 1 в пределах её толщины, поэтому отдельно не приводится.

Для оценки точности эксперимента рассчитываем среднеквадратическое отклонение σ результатов измерений [14]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\theta_{\text{пов,теор},i} - \theta_{\text{пов},i})^2}{n(n-1)}}, \quad (4)$$

где n — общее число замеров, равное в данном случае 17.

Полученное значение $\sigma = 0,084$ является величиной того же порядка, что и погрешность прибора, которая составляет $0,1^\circ\text{C}$. Аналогичные измерения с подобными же результатами были получены и для второй внутренней стены.

Это, в сочетании с практическим совпадением экспериментального и расчётного $\sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho}$, позволяет утверждать о доказанности соотношения (3) с числовым

Выражения (3) и (1) действительно могут быть применены в инженерной практике для анализа нестационарного теплового режима различных объектов, а все выводы, следующие из этих зависимостей и приведённые в [2], сохраняют свою силу

коэффициентом, равным именно 2,0. Различие с данными [9, 10] может быть объяснено тем, что в силу (3) каждая поверхность в помещении будет характеризоваться собственной величиной $\theta_{\text{пов}}$, и поэтому внутри помещения будет происходить непрерывный взаимный теплообмен, как лучистый, так и конвективный, что и приводит к увеличению эффективной величины q .

Поэтому выражения (3) и, следовательно, (1) действительно могут быть применены в инженерной практике для анализа нестационарного теплового режима различных объектов, а все выводы, следующие из этих зависимостей и приведённые в [2], сохраняют свою силу. ●

1. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений: Федеральный закон от 30.12.2009 №384-ФЗ (посл. ред.).
2. Самарин О.Д., Ключко А.К. Решение задач нестационарной теплопередачи, энергосбережения и управления климатическими системами. — М.: Изд-во МИСИ-МГСУ, 2022. 93 с.
3. Самарин О.Д., Петренко А.Д., Коваленко С.В. Экспериментальная проверка теоретического моделирования начального разогрева помещения // Журнал СОК. 2024. №2. С. 52–54.
4. ГОСТ 30494–2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях (с Попр., с Изм. №1) / Дата введ.: 01.01.2013.
5. Rafalskaya T. Safety of engineering systems of buildings with limited heat supply. Proc. of the VII International Scientific Conference on Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education (IPICSE-2020) [November 11–14, 2020; Tashkent, Republic of Uzbekistan]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1030. No. 012049.
6. Malyavina E., Akhverdshvili R. Calculation of room temperature drop after an emergency shutdown of heating. Proc. of the International Scientific Conference on Biotechnology and Food Technology (BFT-2023). E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 460. No. 07006.
7. Malyavina E., Zdoronok A., Ozerchuk D. Comparison of heating loads in residential, public and industrial build-

- ings. Proc. of the XXII International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies (EMMFT-2020). E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 144. No. 05028.
8. Торопов А.Л. Гидравлическая и тепловая устойчивость работы автономных систем поквартирного теплоснабжения // Вестник МГСУ, 2022. Т. 17. №7. С. 944–953.
9. 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.
10. 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.
11. Carslaw H.S., Jaeger J.C. Conduction of heat in solids. Oxford University Press. Oxford, UK. 1986. 520 p.
12. Мазо А.Б. Основы теории и методы расчёта теплопередачи: учеб. пособие. — Казань: Изд-во КФУ, 2013. 144 с.
13. СП 50.13330.2024. Тепловая защита зданий [Пересмотр СП 50.13330.2012 «СНиП 23-02–2003. Тепловая защита зданий»] / Дата введ.: 16.06.2024.
14. Мацкевич И.П., Свирид Г.П. Высшая математика: теория вероятностей и математическая статистика. — Минск: Вышэйшая школа, 1993. 271 с.

References — see page 78.

Experimental verification of the theoretical dependence for the initial heating or cooling of enclosing structures. Pp. 43–46.

Oleg D. Samarin, PhD (Engineering), Associate Professor, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU); **Daria Al. Kolesnik**, undergraduate student, NRU MGSU; **Alexander Al. Kruglov**, undergraduate student, NRU MGSU

1. *Tekhnicheskij reglament o bezopasnosti zdaniy i sooruzhenij* [Technical regulations on the safety of buildings and structures]. *Federal'nyj zakon ot 30.12.2009 №384-FZ (posl. red.)* [Federal Law No. 384-FL of December 30, 2009 (latest revision)]. [In Russian]
2. O.D. Samarin, A.K. Klochko. *Reshenie zadach nestatsionarnoj teploperedachi, energosber-ezheniya i upravleniya klimaticheskimi sistemami* [Solving problems of non-stationary heat transfer, energy saving, and climate control systems]. Moscow. *Izd-vo MISI-MGSU* [Publishing House of the National Research Moscow State University of Civil Engineering]. 2022. 93 p. [In Russian]
3. O.D. Samarin, A.D. Petrenko, S.V. Kovalenko. *Eksperimental'naya proverka teoreticheskogo modelirovaniya nachalnogo razogreva pomeshcheniya* [Experimental verification of theoretical modeling of the initial heating of the room]. *Zhurnal Santehnika, Otoplenie, Konditsionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2024. No. 2. Pp. 52–54. [In Russian]
4. GOST 30494–2011 [The State Industry Standard of Russia No. 30494–2011]. *Zdaniya zhilye i obshchestvennye. Parametry mikroklimata v pomeshcheniyakh (s Popr., s Izm. No. 1)* [Residential and public buildings. Indoor microclimate parameters (with Corrigendum; with Amendment No. 1)]. Date of impl.: January 1, 2013. [In Russian]
5. T. Rafalskaya. Safety of engineering systems of buildings with limited heat supply. Proc. of the VII International Scientific Conference on Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education (IPICSE 2020). November 11–14, 2020; Tashkent, Republic of Uzbekistan. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1030. No. 012049.
6. E. Malyavina, R. Akhverdashvili. Calculation of room temperature drop after an emergency shutdown of heating. Proc. of the International Scientific Conference on Biotechnology and Food Technology (BFT-2023). E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 460. No. 07006.
7. E. Malyavina, A. Zdoronok, D. Ozerchuk. Comparison of heating loads in residential, public and industrial buildings. Proc. of the XXII International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies (EMMFT-2020). E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 144. No. 05028.
8. A.L. Toropov. *Gidravlicheskaya i teplovaya ustojchivost' raboty avtonomnykh sistem pokvar-tirnogo teplosnabzheniya* [Hydraulic and thermal stability of autonomous apartment heating systems]. *Vestnik MGSU* [Vestnik MGSU. Monthly Journal on Construction and Architecture (Bulletin of Moscow State University of Civil Engineering)]. 2022. Vol. 17. No. 7. Pp. 944–953. [In Russian]
9. I.Yu. Bilous, 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.
10. 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.
11. H.S. Carslaw, J.C. Jaeger. Conduction of heat in solids. Oxford University Press. Oxford, UK. 1986. 520 p.
12. A.B. Mazo. *Osnovy teorii i metody rascheta teploperedachi: ucheb. posobie* [Fundamentals of theory and methods of heat transfer calculation: A tutorial]. Kazan. *Izd-vo KFU* [Publishing House of the Kazan Federal University]. 2013. 144 p. [In Russian]
13. SP 50.13330.2024 [The Code of Practice on Design and Construction (The Code of Practice of Russia) No. 50.13330.2024]. *Teplovaya zashchita zdaniy (Peresmotr SP 50.13330.2012 "SNiP 23-02–2003 Teplovaya zashchita zdaniy")* [Thermal protection of buildings (Revision of The Code of Practice on Design and Construction (The Code of Practice of Russia) No. 50.13330.2012 "The Building Rules & Regulations (National Codes and Standards of Russia) No. 23-02–2003. Thermal Protection of Buildings")]. Date of impl.: June 16, 2024. [In Russian]
14. I.P. Matskevich, G.P. Svirid. *Vysshaya matematika: teoriya veroyatnostej i matematicheskaya statistika* [Higher mathematics: The probability theory and mathematical statistics]. Minsk, Republic of Belarus. *Vyshejschaya shkola* ["Higher School" Publishing House]. 1993. 271 p. [In Russian]