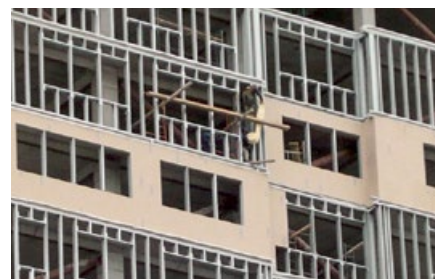


Экспериментальная проверка теоретического моделирования начального разогрева помещения

Рецензия эксперта на статью получена 15.01.2024 [The expert review of the article was received on January 15, 2024]

Задача о расчёте изменения температуры воздуха t_b [°C] в помещении при его начальном разогреве или охлаждении в случае скачкообразного изменения теплопоступлений или теплопотерь имеет большое значение для принятия решений по автоматическому регулированию обслуживающих данное помещение систем обеспечения микроклимата с целью поддержания необходимой комфортности его параметров. Кроме того, она возникает при анализе аварийных режимов теплоснабжения, связанных с прекращением подачи теплоты, а также в момент резкого похолодания, и, таким образом, непосредственно относится к обеспечению безопасности жизнедеятельности людей и строительных конструкций. С учётом указанных обстоятельств процесс разогрева или охлаждения должен рассматриваться соответственно при небольших и, наоборот, более продолжительных интервалах времени τ [с] после скачка теплового потока, что приводит к определённым различиям в форме получаемого решения.

Большинство существующих исследований было ориентировано на решение второго варианта задачи (для аварийного режима) [1–3], что предопределяет преимущественно экспоненциальный вид аналитических зависимостей температуры от времени, отвечающий так называемому «регулярному тепловому режиму» [4], когда тепловым возмущением охвачена вся толщина материала массивных ограждений. В то же время краткосрочным изменениям, при которых существенной является скорость распространения температурной волны в таких конструкциях, уделялось меньше внимания. При этом данный случай рассматривался либо с такими же упрощающими предположения-



ми, как и для регулярного режима [5–7], либо решение записывалось в неявном виде с использованием понятий теории теплоустойчивости, описывающей периодические колебания теплового потока [4].

В работе [8] было получено простое аналитическое выражение для избыточной температуры внутреннего воздуха $\theta_b = |t_b - t_{b,0}|$, К, где $t_{b,0}$ — исходное значение t_b для начальных моментов времени, которое можно записать как:

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

здесь $Q_{\text{пост}}$ — величина скачка теплопотерь или теплопоступлений, Вт; B — показатель теплоаккумуляционных свойств помещения, Вт·с^{1/2}/К. В соответствии с закономерностями распространения тепловых возмущений в твёрдых средах его значение можно вычислить по формуле [8]:

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

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, 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 перечисленных ограждающих конструкций [м²], определяемая исходя из размеров помещения.

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

Экспериментальная проверка теоретического моделирования начального разогрева помещения

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

Рассмотрена зависимость температуры внутреннего воздуха в помещении от времени при скачкообразном тепловом возмущении. Представлена ранее полученная теоретическая формула для данной зависимости, учитывающая характеристику теплоаккумуляционных свойств помещения и отражающая закономерности распространения температурной волны в материале массивных ограждающих конструкций. Приведены результаты натурных измерений температуры для характерных помещений в режиме их начального разогрева при известной мощности теплоисточника, а также заданных геометрических и теплофизических характеристиках ограждений, подтверждающие справедливость указанной формулы. Дана оценка погрешности полученных данных и интервала времени с момента изменения теплового потока, когда возможно использование рассматриваемой зависимости в пределах обычной точности инженерного расчёта.

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

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

Experimental verification of theoretical modeling of the initial heating of the room.

O. D. Samarina, PhD, Associate Professor; A. D. Petrenko, undergraduate student; S. V. Kovalenko, undergraduate student, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NR MSUCE)

The dependence of the indoor air temperature on time in the case of an abrupt thermal disturbance 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 the temperature wave in the material of massive enclosing structures. The results of full-scale temperature measurements for characteristic rooms in the mode of their initial heating at a known power of the heat source, as well as the specified geometric and thermophysical characteristics of fences, confirming the validity of this formula, are presented. The estimation of the error of the obtained data and the time interval from the moment of the change in the heat flow is given, when it is possible to use the considered dependence within the limits of the usual accuracy of engineering calculation.

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

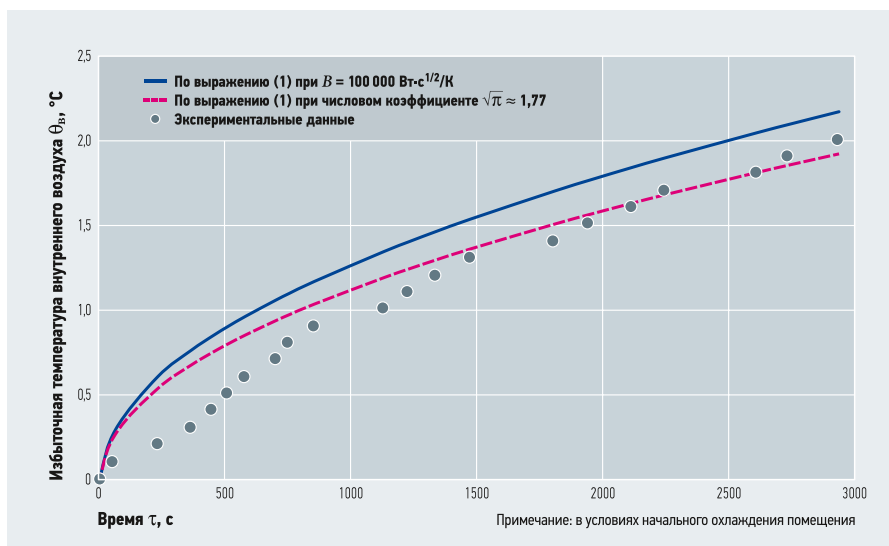


Рис. 1. Зависимость θ_v от времени для исследуемого помещения

Зависимость (1) проверялась сопоставлением с предельными случаями других решений, а также экспериментально [9, 10] и в целом получила подтверждение, несмотря на достаточно сильные упрощающие предположения при её выводе. Однако целесообразно провести дополнительные исследования с целью расширения базы опытных данных при различных вариантах размеров помещений и конструкции его ограждений. Для этой цели были выполнены натурные замеры температуры в одном из помещений общественного здания офисного типа. Перед началом эксперимента для исключения влияния неорганизованного воздухообмена были закрыты окна, форточки и двери. В качестве измерительного прибора применялся цифровой термометр Testo 0560 1110 с ценой деления 0,1 K, который размещался вблизи центра помещения на высоте около 1 м от пола вне зоны действия холодных конвективных потоков от окон и непосредственного облучения от электрического нагревателя, игравшего роль источника теплопоступлений, а также вдали от приточных струй системы общеобменной вентиляции.

В процессе выполнения измерений первоначально было снято и записано исходное значение температуры воздуха $t_{в,0}$, после чего включался нагреватель и отмечался соответствующий момент времени. Затем фиксировались моменты, когда текущая температура t_v по показаниям прибора повышалась на каждые следующие 0,1 °C в соответствии с его точностью измерений. Эксперимент проводился до тех пор, пока суммарное повышение температуры не достигало примерно 2 °C с тем, чтобы общее число точек замеров составило около 20-ти, исходя из цены деления термометра и допустимой относительной погрешности порядка 5 %. Затем для каждого замера была вычислена текущая избыточная температура $\theta_v = t_v - t_{в,0}$ и опре-

делён интервал времени τ [с], от текущего момента до начала опыта. Результаты измерений показаны точками на рис. 1.

Для сопоставления с аналитической зависимостью определялась величина $Q_{\text{пост}}$ — мощность нагревателя по его паспорту, которая в данном случае была равна 2000 Вт. После этого для тех же значений τ , которые были использованы в эксперименте, были рассчитаны теоретические температуры θ_v по формуле (1). Соответствующий график изображён на рис. 1 в виде сплошной линии. Пунктиром показаны данные, определённые по той же формуле, но с несколько меньшим числовым коэффициентом, равным $\sqrt{\pi} \approx 1,77$, что следует из некоторых теоретических соображений, использовавшихся при выводе (1). Легко видеть, что наилучшее совпадение с результатами замеров получается именно при таком значении этого коэффициента, если учесть ещё влияние тепловой инерции внутреннего и вентиляционного воздуха, которая замедляет прирост температуры в начальные моменты времени [9, 10]. При этом фактический уровень параметра B для исследуемого помещения находился путём подбора, исходя из наибольшего совпадения расчётной кривой с данными замеров, и составил 100 000 Вт·с^{1/2}/К.

Для сравнения было вычислено также теоретическое значение B по выражению (2) с учётом размеров помещения и материала его ограждающих конструкций: наружная и внутренние стены из кирпичной кладки площадью 12,8 и 38,9 м², соответственно; $\lambda = 0,81$ Вт/(м·К), $c = 880$ Дж/(кг·К) и $\rho = 1800$ кг/м³; пол и потолок из железобетонных пустотных панелей с площадью по 15 м² и ориентировочным коэффициентом сплошности 0,6; $\lambda = 2,04$ Вт/(м·К), $c = 840$ Дж/(кг·К) и $\rho = 2500$ кг/м³. В данном случае теплофизические параметры λ , c и ρ определялись по СП 50.13330.2012 [11] для условий эксплуатации «Б».

В результате была получена величина $B = 95\,817$ Вт·с^{1/2}/К, которая отличается от подобранного по экспериментальным точкам на 4,8 %. Это заведомо лежит в пределах погрешности измерений и инженерных расчётов и одновременно свидетельствует в пользу более точной величины числового коэффициента в формуле (1) в размере $\sqrt{\pi}$, поскольку в противном случае для максимального совпадения пришлось бы принимать B около 115 000 Вт·с^{1/2}/К и расхождение с теоретическим составило бы уже порядка 20 %.

Таким образом, результаты проведённого экспериментального исследования дополнительно подтверждают и уточняют аналитические соотношения (1) и (2) и данные, ранее полученные в работах [9, 10], что даёт возможность их применения в практике массового проектирования в силу простоты используемых зависимостей. Кроме того, они показывают возможность идентификации построенной математической модели на основе сопоставления теоретических и экспериментальных сведений, допуская опытное определение показателя теплоаккумуляционных свойств помещения B .

1. Mansurov R.Sh., Rafalskaya T.A., Efimov D.I. Mathematical modeling of thermal technical characteristics of external protections with air layers. E3S Web of Conferences. Vol. 97. 22nd International Scientific Conference on "Construction the Formation of Living Environment" (FORM 2019). 2019.
2. Rafalskaya T. Safety of engineering systems of buildings with limited heat supply. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 1030. VII International Scientific Conference "Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education". November 11–14, 2020. Tashkent, Uzbekistan. 2021.
3. Rafalskaya T.A. Simulation of thermal characteristics of heat supply systems in variable operating modes. Journal of Physics: Conference Series. Vol. 1382. XXXV Siberian Thermophysical Seminar (STS 2019). August 27–29, 2019. Novosibirsk, Russia.
4. Богословский В.Н. Строительная теплофизика. Изд. 3-е, перераб. и доп. — СПб.: Изд-во «АВОВ Северо-Запад», 2006. 400 с.
5. 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.
6. 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.
7. Bilous I.Yu., Deshko V.I., Sukhodub I.O. Building energy modeling using hourly infiltration rate. Magazine of Civil Engineering. 2020. Vol. 4. Issue 96. Pp. 27–41.
8. Самарин О.Д., Ключко А.К. Решение задач нестационарной теплопередачи, энергосбережения и управления климатическими системами. — М.: Изд-во МИСИ-МГСУ, 2022. 93 с.
9. Самарин О.Д. Экспериментальное подтверждение теоретических зависимостей для температуры воздуха в помещении при автоматическом регулировании климатических систем // Известия вузов. Строительство, 2021. №1. С. 37–42.
10. Самарин О.Д. Нестационарный тепловой режим помещения при позиционном регулировании системы охлаждения // Журнал СОК. 2023. №1. С. 102–103.
11. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализ. ред. СНиП 23-02-2003 (с Изм. №1 и 2) / Дата введ.: 01.07.2013.

References — see page 79.

Experimental verification of theoretical modeling of the initial heating of the room.
Pp. 52–54.

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

1. R.Sh. Mansurov, T.A. Rafalskaya, D.I. Efimov. Mathematical modeling of thermal technical characteristics of external protections with air layers. E3S Web of Conferences. Vol. 97. 22nd International Scientific Conference on “Construction the Formation of Living Environment” (FORM 2019). 2019.
2. T.A. Rafalskaya. Safety of engineering systems of buildings with limited heat supply. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 1030. IPICSE 2020. November 11–14, 2020. Tashkent, Uzbekistan. 2021.
3. T.A. Rafalskaya. Simulation of thermal characteristics of heat supply systems in variable operating modes. Journal of Physics: Conference Series. Vol. 1382. STS 2019. August 27–29, 2019. Novosibirsk, Russia.
4. V.N. Bogoslovsky. Stroitel'naja teplofizika [The construction thermophysics]. 3rd edition, rev. and exp. 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 the north-west part of Russia (“ABOK North-West”)]. 2006. 400 p. [In Russian]
5. A. Ryzhov, H. Ouerdane, E. Gryazina, A. Bischi, K. Turitsyn. Model predictive control of indoor microclimate: Existing building stock comfort improvement. Energy Conversion and Management. 2019. Vol. 179. Pp. 219–228.
6. 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.
7. I.Yu. Bilous, V.I. Deshko, I.O. Sukhodub. Building energy modeling using hourly infiltration rate. Magazine of Civil Engineering. 2020. Vol. 4. Issue 96. Pp. 27–41.
8. O.D. Samarin, A.K. Klochko. Reshenie zadach nestatsionarnoj teploperedachii, jenergosberezheniya i upravleniya klimaticheskimi sistemami [Solving problems of non-stationary heat transfer, energy saving and control of climate systems]. Moscow. Izd-vo MISI-MGSU [Publishing House of Moscow State University of Civil Engineering]. 2022. 93 p. [In Russian]
9. O.D. Samarin. Jeksperimental'noe podtverzhenie teoreticheskikh zavisimostej dlja temperatury vozdukh v pomeshhenii pri avtomaticheskoi regulirovanii klimaticheskikh sistem [Experimental confirmation of theoretical dependencies for indoor air temperature during automatic regulation of climate systems]. Izvestija vuzov. Stroitel'stvo [Journal of the Russian Universities. Series: Construction]. 2021. No. 1. Pp. 37–42. [In Russian]
10. O.D. Samarin. Nestatsionarnyj teplovoj rezhim pomeshheniya pri pozitsionnom regulirovanii sistemy okhlazhdeniya [Non-stationary thermal mode of the room with positional regulation of the cooling system]. Zhurnal Santechnik, otoplenie, konditsionirovanie (SOK) [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2023. No. 1. Pp. 102–103. [In Russian]
11. SP 50.13330.2012 [The Code of Practice on Design and Construction (The Code of Practice of Russia) No. 50.13330.2012]. Teplovaja zashhita zdaniy [Thermal protection of buildings]. Aktualiz. red. SNiP 23-02-2003 (s Izm. №1 i 2) [Updated version of SNiP Building Rules & Regulations (National Codes and Standards of Russia) No. 02-23-2003 (with Amend. No. 1 and No. 2)]. Date of impl.: July 1, 2013. [In Russian]