

Расчет остывания помещений здания в аварийных режимах при переменной температуре наружного воздуха

Олег Дмитриевич Самарин

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИИВ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Дальнейшее развитие методов расчета теплового режима помещений при аварийных режимах работы систем теплоснабжения является актуальным. Цель исследования — поиск зависимости температуры воздуха в помещениях здания от времени в начальный период после аварии. В качестве научной гипотезы выдвигается положение о возможности выражения данной зависимости через экспоненциальные функции, использующие в качестве аргумента корень квадратный из времени с момента начала остывания.

Материалы и методы. Используется основное дифференциальное уравнение баланса конвективной теплоты в помещении, включающее наиболее существенные составляющие теплового потока, в предположении линейного характера понижения наружной температуры с течением времени при учете особенностей распространения температурной волны в массивных ограждениях в начальный период времени. Применяется метод Бернулли для линейного дифференциального уравнения первого порядка с помощью представления решения в виде произведения двух функций.

Результаты. Найдено аналитическое выражение для приближенной зависимости изменения температуры в помещении при резком похолодании с продолжением дальнейшего убывания наружной температуры по линейному закону. Дана оценка полученного уточнения этой зависимости по сравнению с решением для случая постоянных наружных параметров на примере одного из помещений в жилом здании для климатических условий Москвы.

Выводы. Проанализирована структура полученного решения, показано, что продолжение внешнего похолодания приводит к ускорению остывания помещения, а решение для рассмотренного автором ранее режима остывания при постоянной температуре наружного воздуха является его частным случаем. Обнаружено, что продолжение наружного похолодания дополнительно приводит к выпрямлению графика внутренней температуры, потому что рост теплопотерь через безынерционные конструкции начинает в некоторой степени компенсировать замедление остывания, связанное с выделением аккумулированной теплоты из массивных ограждений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: температура, резкое похолодание, остывание, теплоснабжение, температурная волна, аварийный режим

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Самарин О.Д. Расчет остывания помещений здания в аварийных режимах при переменной температуре наружного воздуха // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 1. С. 77–83. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.1.77-83

Автор, ответственный за переписку: Олег Дмитриевич Самарин, samarinod@mgsu.ru.

Calculation of cooling of building premises in emergency modes at variable outdoor temperature

Oleg D. Samarin

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Further development of methods of calculation the thermal regime of premises at emergency modes of operation of heat supply systems is actual. The aim of the research is to find an approximate analytical dependence of the air temperature in the building premises on time in conditions of a sharp cold snap with further linear decrease in outdoor temperature. As a scientific hypothesis, the position is put forward about the possibility of expressing this dependence through exponential functions using as an argument the square root of the time since the beginning of cooling.

Materials and methods. The basic differential equation of the convective heat balance in the room, including the most significant components of the heat flow is used under the assumption of the linear character of the outdoor temperature decrease over time, taking into account the peculiarities of the temperature wave propagation in massive enclosures in the initial period of time. The Bernoulli method for the linear differential equation of the first order is applied by representing the solution as a product of two functions.

Results. The analytical expression for the approximate dependence of the temperature change in the room at a sharp cold snap with the continuation of the further decrease of the outdoor temperature according to the linear law is found. The obtained refinement of this dependence is evaluated in comparison with the solution for the case of constant outdoor param-

eters on the example of one of the rooms in a residential building for the climatic conditions of Moscow.

Conclusions. The structure of the obtained solution is analyzed and it is shown that the continuation of external cooling leads to acceleration of room cooling, and the solution for the cooling mode previously considered by the author at constant outdoor air temperature is its special case. It was found that the continuation of external cooling additionally leads to some straightening of the internal temperature graph, because the growth of heat loss through inertial-free structures begins to compensate to some extent for the cooling slowdown associated with the release of accumulated heat from massive enclosures.

KEYWORDS: temperature, cold snap, cooling, heat supply, temperature wave, emergency mode

FOR CITATION: Samarina O.D. Calculation of cooling of building premises in emergency modes at variable outdoor temperature. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(1):77-83. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.1.77-83 (rus.).

Corresponding author: Oleg D. Samarina, samarinod@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Задача расчета нестационарного теплового режима помещений в аварийных режимах при прекращении подачи теплоты в здание является актуальной, поскольку связана с обеспечением безопасности жизнедеятельности человека и бесперебойного осуществления технологических процессов. Особое значение это имеет в настоящее время в условиях действия Федерального закона от 30.12.2009 № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений», который сосредотачивает основное внимание при проектировании и эксплуатации здания и его инженерных систем именно на таких вопросах. При этом в гражданских зданиях требования безопасности в первую очередь заключаются в недопущении конденсации влаги на внутренней поверхности ограждающих конструкций в помещениях, что будет обеспечено, когда температура этих поверхностей не станет опускаться ниже точки росы внутреннего воздуха t_p , °C.

Поэтому в качестве предмета исследования в предлагаемой работе автор рассматривает способы оценки темпа охлаждения зданий при прекращении подачи теплоты системой теплоснабжения для выявления интервала времени, в течение которого необходимо провести ремонтные работы, при условии соблюдения требований по безопасности жизнедеятельности. Цель исследования — поиск зависимости температуры воздуха в помещениях здания от времени в начальный период после аварии.

Решением рассматриваемой задачи в последние годы занимались исследователи как в нашей стране, так и за рубежом [1–7], при тех или иных исходных упрощающих предположениях, причем использовались и численные, и аналитические методы, а работы [5–7] содержат несколько более общую постановку проблемы с учетом автоматического регулирования систем обеспечения микроклимата. Однако большинство из имеющихся публикаций либо не учитывают некоторые существенные факторы, влияющие на процесс охлаждения, либо представляют результат в слишком сложной для инженерной практики форме. В работе [8] аналогичные вопросы рассматриваются в сочетании с экономическими методами, но представленные результаты являются достаточно частными и не обобщаются

на другие варианты. Другое направление в этой области в последние годы заключается во все более широком применении численного моделирования в процессе исследования и анализа переменных режимов. Здесь могут быть интересными некоторые иностранные публикации, в которых такие методы сейчас оказываются наиболее характерными, в том числе публикации [9–11], где они используются также вместе с результатами экспериментальных исследований, что дает возможность провести проверку и идентификацию используемой модели.

Кроме того, в рассматриваемой сфере имеется ряд решений для конкретных объектов, которые работают в ограниченных областях и в определенных условиях, например для вентилируемых фасадов совместно с системами естественной вентиляции [12]. Также можно обратить внимание на труды, посвященные решению обратной задачи, а именно определению теплофизических параметров материала на основе изучения колебаний температуры [13]. В последнее время опубликованы и некоторые исследования, касающиеся общих принципов управления инженерными системами зданий и внедрения энергосберегающих инженерных решений, возможных в этих условиях [14–16], но в связи с их общим характером в них также недостаточно конкретных зависимостей, которые интересуют автора в первую очередь. Автором ранее была представлена публикация [17], содержащая решение для случая автоматического регулирования подачи теплоты или холода по интегральному закону, которая содержит необходимую основу для проведения дальнейших изысканий, но также относится к иному режиму. Следовательно, продолжение исследований в рассматриваемой области для получения зависимостей, которые будут, с одной стороны, иметь удовлетворительную точность и учитывать большинство существенных для задачи факторов, но при этом имеют инженерный вид, является до сих пор актуальным.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Расчет скорости остывания помещения при отключении системы теплоснабжения с учетом особенностей распространения температурной волны в массивных ограждающих конструкциях был выполнен автором в работах [18, 19]. Однако при этом

в целях упрощения температура наружного воздуха t_n , °C, считалась постоянной в течение всего рассматриваемого интервала времени. В то же время на практике более характерным является случай, когда она продолжает непрерывно изменяться. Как показывает анализ имеющихся климатических данных, например, по результатам наблюдений срочной величины t_n на метеостанции ВДНХ в Москве¹, в период так называемого резкого похолодания (в частности, 5–6 января 2023 г.), а также при обычно следующим за ним резком потеплении, поведение t_n , как правило, достаточно хорошо можно описать линейной зависимостью типа $t_n = t_{n,0} + C\tau$, где $t_{n,0}$ — значение t_n в момент времени $\tau = 0$, а параметр C , К/с, представляет собой скорость ее изменения. Данное обстоятельство отмечалось также в работе [20]. В этом случае с использованием результатов, приведенных в публикациях [18, 19], основное уравнение баланса конвективной теплоты для помещения в целом будет выглядеть следующим образом:

$$A(\theta_b - C\tau) + B\sqrt{\tau} \frac{d\theta_b}{d\tau} = 0. \quad (1)$$

В качестве независимой переменной рассматривается τ — время, с, с момента прекращения подачи теплоты в здание. Здесь и далее для удобства используется избыточная температура внутреннего воздуха по отношению к начальной наружной $\theta_b = t_b - t_{n,0}$, К. Коэффициент A , Вт/К, можно вычислить по выражению [18, 19]:

$$A = \frac{L_n c_b \rho_b}{3,6} + \Sigma K_i A_{ni}, \quad (2)$$

где L_n — расход приточного воздуха, м³/ч; $c_b = 1,005$ кДж/(кг·К) и $\rho_b = 1,2$ кг/м³ — соответственно его удельная теплоемкость и плотность. Составляющая $\Sigma K_i A_{ni}$ по физическому смыслу является суммарной тепловой проводимостью «легких» (близких к безынерционным) ограждений, в первую очередь окон и световых фонарей, и тогда K_i и A_{ni} — соответственно коэффициенты теплопередачи, Вт/(м²·К), и площади, м², i -й светопрозрачной конструкции. Что касается параметра B , Вт·с^{1/2}/К, его значение вычисляется по формуле [18, 19]:

$$B = \Sigma A_n \sqrt{\lambda c p}, \quad (3)$$

где ΣA_n — суммарная площадь данных конструкций, м², для помещения или здания в целом; λ , c и p — это теплопроводность, Вт/(м·К), удельная теплоемкость, Дж/(кг·К), и плотность, кг/м³, материала слоя наружной стены, покрытия или перекрытия над подвалом, а также при определенных условиях и слоя внутренних ограждающих конструкций, обращенного внутрь помещений здания.

Если сделать замену $z = \sqrt{\tau}$, уравнение (1) относительно интересующей нас функции $\theta_b(z)$ становится линейным неоднородным 1-го порядка, поэтому оно всегда интегрируется в квадратурах. В каноническом виде его тогда можно записать так:

$$\frac{d\theta_b}{dz} + \frac{2A}{B}\theta_b - \frac{2AC}{B}z^2 = 0. \quad (4)$$

Интегрирование здесь проще всего провести методом Бернулли, а именно представляя искомое решение в виде произведения двух функций $\theta_b(z) = U \cdot V$, откуда находим:

$$\frac{dU}{dz}V + U\left(\frac{dV}{dz} + \frac{2A}{B}V\right) = \frac{2AC}{B}z^2. \quad (5)$$

Теперь, считая сумму в скобках равной нулю, определяем, что $V = \exp(-2A/(B) \cdot z)$ и, подставляя это выражение обратно в выражение (5), записываем:

$$\frac{dU}{dz} = \exp(2A/(B) \cdot z) \frac{2AC}{B} z^2. \quad (6)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

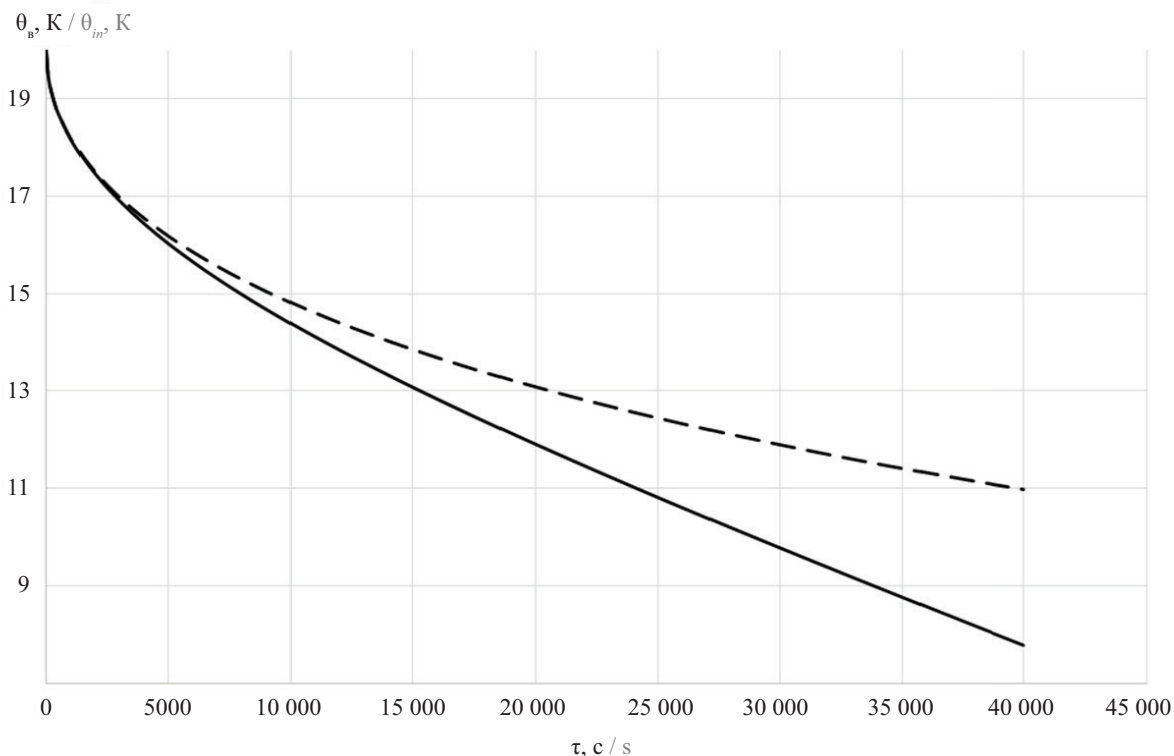
Из уравнения (6) после разделения переменных и второго интегрирования при очевидном начальном условии $\theta_b(0) = \theta_0 = t_{b,0} - t_{n,0}$, где $t_{b,0}$ имеет смысл значения t_b при $\tau = 0$, получаем искомую зависимость:

$$\theta_b = C \left[z^2 - \frac{B}{A}z + \frac{B^2}{2A^2} \right] + \left[\theta_0 - \frac{B^2 C}{2A^2} \right] \exp\left(-\frac{2A}{B}z\right). \quad (7)$$

В данном случае, как и при $t_n = \text{const}$, решение можно довести до конца в элементарных функциях, поскольку возникающие при этом интегралы являются табличными. Нетрудно заметить, что по общему правилу первое слагаемое (7) представляет собой одно из частных решений неоднородного уравнения (4), а второе — частное решение соответствующего ему однородного (при $C = 0$) при имеющемся значении $\theta_b(0)$.

Для наглядности на рисунке сплошной линией показаны результаты расчетов по выражению (7) для некоторого жилого помещения, расположенного на промежуточном этаже многоквартирного дома, с параметрами $A = 18$ Вт/К, в том числе $\Sigma K_i A_{ni} = 4$ Вт/К и $L_n = 42$ м³/ч, $B = 12000$ Вт·с^{1/2}/К, $t_{b,0} = +20$ °C, $t_{n,0} = 0$ °C и $C = -4,62 \cdot 10^{-4}$, исходя из понижения наружной температуры на 20 °C за 12 ч, что, хотя и весьма редко, но встречается в условиях Москвы. Для сравнения пунктиром изображено поведение θ_b при постоянной наружной температуре 0 °C, как было получено в работах [18, 19]. Легко видеть, что этот вариант теперь будет частным случаем (7) при $C = 0$. Анализ графиков показывает,

¹ Гидрометцентр России. URL: <https://meteoinfo.ru/>



Зависимость θ_v от времени для расчетного помещения: сплошная линия — расчет по формуле (7) при $C \neq 0$; пунктир — при $C = 0$

Time dependence of θ_m for the calculation room: solid line — calculation by formula (7) at $C \neq 0$; dotted line — at $C = 0$

что, как и следовало ожидать, влияние падения t_n на изменение величины θ_v начинает сказываться не сразу, причем, помимо общего ускорения охлаждения помещения, продолжение наружного похолодания приводит еще и к некоторому выпрямлению кривой θ_v , потому что рост теплопотерь через безынерционные конструкции начинает в некоторой степени компенсировать замедление остывания, связанное с выделением аккумулированной теплоты из массивных ограждений. Разумеется, в случае $C > 0$, когда аварийный режим сопровождается потеплением, характер отклонения линии θ_v от рассмотренной в трудах [18, 19] будет противоположным.

Таким образом, получили зависимость, определяющую скорость понижения температуры внутреннего воздуха в помещении при отключении подачи теплоты системой теплоснабжения в условиях продолжающегося похолодания. Ее использование позволяет оценить интервал времени, в течение которого в здании сохраняются допустимые условия внутреннего микроклимата, и тем самым определить срок, в течение которого должна быть устранена авария. В условиях рассмотренного примера, так как точка росы при $t_{в.0} = +20^\circ\text{C}$ и относительной влажности внутреннего воздуха, равной 55 %, принимаемой по СП 50.13330.2018 «СНиП 23-02-2003 Тепловая защита зданий» для расчета ограждающих конструкций в жилых зданиях, равна около $+11^\circ\text{C}$, можно отметить, что продолжительность остывания

при $t_n = \text{const}$ составляет примерно 11,1 ч, а в случае учета падения t_n этот период уменьшается до 6,7 ч, т.е. примерно на 40 %, что является существенной величиной. При этом найденная зависимость имеет достаточно простой вид, требует минимального числа исходных данных и доступна для использования в инженерной практике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате исследования в целом находит подтверждение исходная гипотеза о том, что зависимость от времени избыточной температуры внутреннего воздуха в помещении при аварийном прекращении теплоподдачи в здание и последующем продолжении понижения наружной температуры действительно выражается через экспоненциальные функции, использующие в качестве аргумента корень квадратный из времени с момента начала остывания. Кроме того, можно сделать следующие выводы:

- показано, что падение температуры наружного воздуха в условиях аварийного режима начинает влиять на характер изменения величины θ_v не сразу и при этом, помимо общего ускорения остывания помещения, постепенное наружное похолодание вызывает еще и некоторое выпрямление графика θ_v ;
- отмечено, что указанный эффект можно объяснить ростом теплопотерь через безынерционные конструкции, что начинает частично компенсиро-

вать замедление остывания из-за выделения теплоты, аккумулированной массивными ограждениями;

- продемонстрировано, что учет падения наружной температуры во время отключения теплоподдачи в здание приводит к существенному сокращению промежутка времени, доступного для ликвидации аварии (в рассмотренном примере — на величину около 40 %), поэтому такой учет является необходимым при обеспечении требуемой надежности теплоснабжения для реализации требований к безопасности жизнедеятельности и строительных конструкций. При этом данный расчет будет достаточно простым и доступным для инженерной практики.

Дальнейшее развитие предлагаемого исследования можно осуществлять в области уточнения полученной зависимости в отношении учета влияния понижения температуры наружного воздуха на коэффициент A в уравнении (1), если в здании предусмотрена естественная вентиляция, а также проверки условий ее применимости, касающихся интервала времени с момента прекращения теплоснабжения и начала дальнейшего похолодания, путем проведения многовариантных расчетов, в том числе с использованием численных методов и при возможности за счет сопоставления с результатами натурных замеров.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Рафальская Т.А., Березка А.К., Савенков А.А. Теоретическое исследование теплозащиты ограждающих конструкций зданий при аварийном теплоснабжении // Актуальные вопросы архитектуры и строительства : мат. X Всерос. науч.-техн. конф. 2017. С. 213–218. EDN ZVXSEN.
2. Mansurov R., Rafalskaya T., Efimov D. Mathematical modeling of thermal technical characteristics of external protections with air layers // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 97. P. 06007. DOI: 10.1051/e3sconf/20199706007
3. Rafalskaya T. Safety of engineering systems of buildings with limited heat supply // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1030. Vol. 1. P. 012049. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012049
4. Rafalskaya T.A. Simulation of thermal characteristics of heat supply systems in variable operating // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 138. Issue 1. P. 012140. DOI: 10.1088/1742-6596/1382/1/012140
5. Latif M., Nasir A. Decentralized stochastic control for building energy and comfort management // Journal of Building Engineering. 2019. Vol. 24. P. 100739. DOI: 10.1016/j.jobe.2019.100739
6. Serale G., Fiorentini M., Capozzoli A., Bernardini D., Bemporad A. Model predictive control (MPC) for enhancing building and HVAC system energy efficiency: problem formulation, applications and opportunities // Energies. 2018. Vol. 11. Issue 3. P. 631. DOI: 10.3390/en11030631
7. 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. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.10.046
8. Avsyukevich D., Shishkin E., Litvinova N., Mirgorodskiy A. Thermoeconomic model of a building's thermal protection envelope and heating system // Magazine of Civil Engineering. 2022. № 5 (113). P. 11302. DOI: 10.34910/MCE.113.2. EDN TAVHNO.
9. Rulik S., Wróblewski W., Majkut M., Strozik M., Rusin K. Experimental and numerical analysis of heat transfer within cavity working under highly non-stationary flow conditions // Energy. 2020. Vol. 190. P. 116303. DOI: 10.1016/j.energy.2019.116303
10. Bilous I., Deshko V., Sukhodub I. Parametric analysis of external and internal factors influence on building energy performance using non-linear multivariate regression models // Journal of Building Engineering. 2018. Vol. 20. Pp. 327–336. DOI: 10.1016/j.jobe.2018.07.021
11. Millers R., Korjakins A., Lešinskis A., Borodinecs A. Cooling panel with integrated PCM layer: A verified simulation study // Energies. 2020. Vol. 13. Issue 21. P. 5715. DOI: 10.3390/en13215715
12. Petrichenko M.R., Nemova D.V., Kotov E.V., Tarasova D.S., Sergeev V.V. Ventilated façade integrated with the HVAC system for cold climate // Magazine of Civil Engineering. 2018. No. 1 (77). Pp. 47–58. DOI: 10.18720/MCE.77.5. EDN XPKZNB.
13. Li N., Chen Q. Experimental study on heat transfer characteristics of interior walls under partial-space heating mode in hot summer and cold winter zone in China // Applied Thermal Engineering. 2019. Vol. 162. P. 114264. DOI: 10.1016/j.appltherm.2019.114264
14. Belussi L., Barozzi B., Bellazzi A., Danza L., Devitofrancesco A., Ghellere M. et al. A review of performance of zero energy buildings and energy efficiency solutions // Journal of Building Engineering. 2019. Vol. 25. P. 100772. DOI: 10.1016/j.jobe.2019.100772
15. 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. DOI: 10.1016/j.rser.2019.03.018
16. Kharchenko V., Ponochovnyi Y., Boyarchuk A., Brezhnev E., Andrashov A. Monte-Carlo simulation and availability assessment of the smart building automation systems considering component failures and

attacks on vulnerabilities // *Contemporary Complex Systems and Their Dependability*. 2019. Pp. 270–280. DOI: 10.1007/978-3-319-91446-6_26

17. Самарин О.Д. Расчет теплового режима помещения при использовании интегральных регуляторов для климатических систем // *Известия вузов. Строительство*. 2020. № 2 (734). С. 28–35. DOI: 10.32683/0536-1052-2020-734-2-28-35. EDN SSRGOX.

18. Самарин О.Д., Клочко А.К. Численные и приближенные методы в задачах строительной те-

плофизики и климатологии. М. : МГСУ, 2021. 96 с. EDN VAPFTA.

19. Самарин О.Д. Расчет остывания помещений здания в аварийных режимах для обеспечения надежности их теплоснабжения // *Вестник МГСУ*. 2019. Т. 14. № 4. С. 496–501. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.4.496-501

20. Богословский В.Н. Строительная теплофизика. 3-е изд. СПб. : Изд-во АВОК СЕВЕРО-ЗАПАД, 2006. 400 с.

Поступила в редакцию 30 мая 2023 г.

Принята в доработанном виде 1 июня 2023 г.

Одобрена для публикации 12 сентября 2023 г.

ОБ АВТОРЕ: Олег Дмитриевич Самарин — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 1708-9583, Scopus: 6603231128, ORCID: 0000-0003-2533-9732; samarinod@mgsu.ru, samarin-oleg@mail.ru.

REFERENCES

1. Rafalskaya T.A., Beryozka A.K., Savenkov A.A. Theoretical study of thermal protection of building envelopes in case of emergency heat supply. *Topical issues of architecture and construction : papers of 10th All-Russian science and technical conference*. 2017; 213-218. EDN ZVXSEN. (rus.).

2. Mansurov R., Rafalskaya T., Efimov D. Mathematical modeling of thermal technical characteristics of external protections with air layers. *E3S Web of Conferences*. 2019; 97:06007. DOI: 10.1051/e3s-conf/20199706007

3. Rafalskaya T. Safety of engineering systems of buildings with limited heat supply. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1030(1):012049. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012049

4. Rafalskaya T.A. Simulation of thermal characteristics of heat supply systems in variable operating. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019; 138(1):012140. DOI: 10.1088/1742-6596/1382/1/012140

5. Latif M., Nasir A. Decentralized stochastic control for building energy and comfort management. *Journal of Building Engineering*. 2019; 24:100739. DOI: 10.1016/j.jobbe.2019.100739

6. Serale G., Fiorentini M., Capozzoli A., Bernardini D., Bemporad A. Model predictive control (MPC) for enhancing building and HVAC system energy efficiency: problem formulation, applications and opportunities. *Energies*. 2018; 11(3):631. DOI: 10.3390/en11030631

7. 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; 179:219-228. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.10.046

8. Avsyukevich D., Shishkin E., Litvinova N., Mirgorodskiy A. Thermoeconomic model of a building's thermal protection envelope and heating system. *Magazine of Civil Engineering*. 2022; 5(113):11302. DOI: 10.34910/MCE.113.2. EDN TAVHNO.

9. Rulik S., Wróblewski W., Majkut M., Strozik M., Rusin K. Experimental and numerical analysis of heat transfer within cavity working under highly non-stationary flow conditions. *Energy*. 2020; 190:116303. DOI: 10.1016/j.energy.2019.116303

10. Bilous I., Deshko V., Sukhodub I. Parametric analysis of external and internal factors influence on building energy performance using non-linear multivariate regression models. *Journal of Building Engineering*. 2018; 20:327-336. DOI: 10.1016/j.jobbe.2018.07.021

11. Millers R., Korjamins A., Lešinskis A., Borodinecs A. Cooling panel with integrated PCM layer: A verified simulation study. *Energies*. 2020; 13(21):5715. DOI: 10.3390/en13215715

12. Petrichenko M.R., Nemova D.V., Kotov E.V., Tarasova D.S., Sergeev V.V. Ventilated facade integrated with the HVAC system for cold climate. *Magazine of Civil Engineering*. 2018; 1(77):47-58. DOI: 10.18720/MCE.77.5. EDN XPKZNB.

13. Li N., Chen Q. Experimental study on heat transfer characteristics of interior walls under partial-space heating mode in hot summer and cold winter zone in China. *Applied Thermal Engineering*. 2019; 162:114264. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114264

14. Belussi L., Barozzi B., Bellazzi A., Danza L., Devitofrancesco A., Ghellere M. et al. A review of performance of zero energy buildings and energy efficien-

cy solutions. *Journal of Building Engineering*. 2019; 25:100772. DOI: 10.1016/j.job.2019.100772

15. 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; 108:76-90. DOI: 10.1016/j.rser.2019.03.018

16. Kharchenko V., Ponochovnyi Y., Boyarchuk A., Brezhnev E., Andrashov A. Monte-Carlo simulation and availability assessment of the smart building automation systems considering component failures and attacks on vulnerabilities. *Contemporary Complex Systems and Their Dependability*. 2019; 270-280. DOI: 10.1007/978-3-319-91446-6_26

17. Samarin O.D. Calculation of the indoor thermal mode with the use of integral controllers for climate con-

trol systems. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2020; 2(734):28-35. DOI: 10.32683/0536-1052-2020-734-2-28-35. EDN SSRGOX. (rus.).

18. Samarin O.D., Klochko A.K. *Numerical and approximated methods in the problems of building thermal physics and climatology*. Moscow, MGSU, 2021; 96. EDN VAPFTA. (rus.).

19. Samarin O.D. The calculation of building cooling under emergency conditions to ensure their heating reliability. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019; 14(4):496-501. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.4.496-501 (rus.).

20. Bogoslovsky V.N. *Building thermal physics*. 3rd ed. St. Petersburg, AVOK SEVERO-ZAPAD Publ., 2006; 400. (rus.).

Received May 30, 2023.

Adopted in revised form on June 1, 2023.

Approved for publication on September 12, 2023.

B I O N O T E S : **Oleg D. Samarin** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 1708-9583, Scopus: 6603231128, ORCID: 0000-0003-2533-9732; samarinod@mgsu.ru, samarin-oleg@mail.ru.