

Исследование температуры внутреннего воздуха в помещении гражданского здания после аварийного отключения системы отопления

Д.Ф. Карпов¹, М.В. Павлов¹, Е.В. Абрамова^{2,3}, Х.М. Вафаева⁴

¹Вологодский государственный университет,

¹160000, г. Вологда, ул. Ленина, 15, Россия,

²Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский институт),

²105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, Россия,

³Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии
архитектуры и строительных наук,

³127238, г. Москва, Локомотивный пр., 21, Россия,

⁴Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

⁴195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29 литера Б, Россия

Резюме. Цель. Аварийное отключение системы отопления гражданского здания неизбежно приведет к нарушению теплового режима в обогреваемых помещениях. Впоследствии данный инцидент негативно отразится на тепловом комфорте человека и условиях труда. Таким образом, вопрос прогнозирования теплового режима помещения в случае прекращения подачи тепловой энергии, наряду с поиском энергосберегающих технологий в строительной сфере, является актуальной задачей. **Метод.** Программные вычисления основаны на классической теории теплоустойчивости помещения в случае прерывистой подачи теплоты и законе регулярного теплового режима первого рода (для системы отопления), суть которого заключается в следующем: понижение температуры во всех точках тела в ходе его остывания происходит одинаково, подчиняясь экспоненциальному закону. **Результат.** Для комнаты в жилом здании установлено, что температура внутреннего воздуха достигнет точки росы (12,5 °С) за период времени 8 ч 42 мин после аварийного отключения системы отопления, а нулевого значения – через 23 ч 42 мин. Среднее значение темпа падения температуры за период времени 50 ч равно 0,72 °С/ч, суммарные потери тепловой энергии составили 138,2 МДж. **Вывод.** Тепловая аккумуляция ограждающих конструкций играет первостепенную роль для гражданских зданий в сохранении требуемого теплового режима помещения в случае аварийного отключения системы отопления. При сравнительно малой теплоемкости и большой теплоотдаче, связанной с высоким температурным напором нагревательных элементов, остывание системы отопления происходит достаточно быстро (имеет высокий показатель темпа охлаждения).

Ключевые слова: температура внутреннего воздуха, темп падения температуры, теплоустойчивость помещения, удельная тепловая характеристика помещения, коэффициент аккумуляции теплоты, показатель темпа охлаждения, регулярный тепловой режим, аварийное отключение системы отопления.

Для цитирования: Д.Ф. Карпов, М.В. Павлов, Е.В. Абрамова, Х.М. Вафаева. Исследование температуры внутреннего воздуха в помещении гражданского здания после аварийного отключения системы отопления. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024; 51(2):197-207. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-2-197-207

Investigation of the indoor air temperature in a civilian building after an emergency shutdown of the heating system

D.F. Karpov¹, M.V. Pavlov¹, E.V. Abramova^{2,3}, Kh.M. Vafaeva⁴

¹Vologda State University,

¹15 Lenin St., Vologda 160000, Russia,

²Bauman Moscow State Technical University (National Research Institute),

²5 2nd Baumanskaya St., Moscow 105005, Russia,

³Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences,

³21 Locomotive St., Moscow 127238, Russia,

⁴Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,

⁴29 letter B Polytechnique St., Saint-Petersburg 195251, Russia

Abstract. Objective. An emergency shutdown of the heating system of a civil building will inevitably lead to a violation of the thermal regime in the heated rooms. Subsequently, this incident will have a negative impact on human thermal comfort and working conditions. Thus, the issue of predicting the thermal regime of a room in the event of a termination of the supply of thermal energy, along with the search for energy-saving technologies in the construction sector, is an urgent task. **Method.** Software calculations are based on the classical theory of thermal stability of a room in the case of intermittent heat supply and the law of regular thermal regime of the first kind (for a heating system), the essence of which is as follows: a decrease in temperature at all points of the body during its cooling occurs in the same way, obeying an exponential law. **Result.** For a room in a residential building, it is established that the indoor air temperature will reach the dew point (12.5 °C) for a period of 8 hours 42 minutes after an emergency shutdown of the heating system, and the zero value after 23 hours 42 minutes. The average value of the rate of temperature drop over a period of 50 hours is 0.72 °C/h, the total loss of thermal energy was 138.2 MJ. **Conclusion.** Thermal accumulation of enclosing structures plays a primary role for civil buildings in maintaining the required thermal regime of the room in the event of an emergency shutdown of the heating system. With a relatively low heat capacity and high heat transfer associated with the high temperature pressure of the heating elements, the cooling of the heating system occurs quite quickly (has a high cooling rate).

Keywords: indoor air temperature, rate of temperature drop, thermal stability of room, specific thermal characteristics of room, heat accumulation coefficient, cooling rate indicator, regular thermal regime, emergency shutdown of heating system

For citation: D.F. Karpov, M.V. Pavlov, E.V. Abramova, Kh.M. Vafaeva. Investigation of the indoor air temperature in a civilian building after an emergency shutdown of the heating system. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2024; 51(2):197-207. DOI:10.21822/2073-6185-2024-51-2-197-207

Введение. Тепловой режим в гражданских зданиях оказывает непосредственное влияние на здоровье человека, поскольку большую часть времени люди пребывают в помещениях [1, 2]. Как следствие, параметры микроклимата (в первую очередь, температура внутреннего воздуха) должны находиться в границах, определяемых условиями комфорта, и формировать на рабочих местах благоприятную среду для производственной деятельности [3]. Современная строительная наука обязана решать не только проблемы повышения энергоэффективности зданий и сооружений [4-6], но и заниматься вопросами прогнозирования и поддержания теплового режима помещений в случае нарушения технологического режима работы [7] или непредвиденного выхода из строя систем теплообеспечения, особенно при экстремально низких температурах наружного воздуха [8], моральном износе инженерного оборудования [9] или внеплановом отключении подачи электрической энергии (например, при аварии в энергосистеме) [10]. Вполне возможна совместимость двух научных направлений, основанная на использовании возобновляемых

источников энергии (например, солнечной энергии) для населенных пунктов с неустойчивой работой систем централизованного теплоснабжения [11]. Рассматриваемая в статье задача является комплексной, так как включает в себя множество различных параметров: объемно-планировочные и конструктивные решения гражданского здания [12]; теплозащитные свойства ограждающих конструкций [13]; текущее энергопотребление объекта [14] и др.

В настоящее время уточняются методы расчета теплового режима помещения после аварийного отключения системы отопления, так как рассматриваются новые факторы, влияющие на изменение температуры внутреннего воздуха, как например, переменная температура наружного воздуха [15] или теплоустойчивость многослойных ограждающих конструкций [16, 17]. Объектами подобных научных исследований выступают не только гражданские [18-20], но и промышленные здания, в которых учитываются особенности технологического процесса [21]. Большая роль отводится вопросам прогнозирования последствий отключения централизованного теплоснабжения для населенных пунктов [22-25].

Постановка задачи. Объект исследования – помещения гражданских зданий. Предмет исследования – закономерности изменения температуры внутреннего воздуха (в размерном и безразмерном видах), темпа падения температуры и потерь тепловой энергии в течение аварийного отключения системы отопления.

Цель исследования – прогнозирование теплового режима помещения после аварийного отключения системы отопления.

Задачи исследования:

1. Разработка метода расчета основных параметров, характеризующих тепловой режим помещения в случае аварийного отключения системы отопления.
2. Апробация предложенного метода расчета на примере отдельного помещения гражданского здания.
3. Определение продолжительности аварийного отключения системы отопления, за который тепловой режим помещения достигает характерных для него критических значений.

Методы исследования. Для оценки надежности теплоснабжения на уровне потребителя тепловой энергии (отдельного помещения или здания в целом) существует формула Е.Я. Соколова, позволяющая определять температуру внутреннего воздуха после аварийного отключения системы отопления:

$$t_{\text{вн.в}}^{\text{к}} = t_{\text{н.в}} + \frac{Q_0}{q_0 V} + \left(t_{\text{вн.в}}^{\text{н}} - t_{\text{н.в}} - \frac{Q_0}{q_0 V} \right) e^{-\tau/\beta}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (1)$$

где: $t_{\text{н.в}}$ – средняя температура наружного воздуха за период аварийного отключения системы отопления, $^\circ\text{C}$; Q_0 – тепловой поток, поступающий в отапливаемое помещение, Вт. Если не учитывать тепловые избытки от бытового и технологического оборудования, то величина Q_0 численно равна тепловой мощности системы отопления в пределах рассматриваемого помещения; q_0 – удельная тепловая (в некоторых литературных источниках – отопительная) характеристика помещения (или здания в целом), $\text{Вт}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$; V – объем отапливаемого помещения или здания (по наружному обмеру), м^3 ; $t_{\text{вн.в}}^{\text{н}}$ – температура внутреннего воздуха в момент аварийного отключения системы отопления, $^\circ\text{C}$; τ – период аварийного отключения системы отопления, ч; β – коэффициент аккумуляции теплоты, ч.

В классической теории теплоустойчивости при прерывистой подаче тепловой энергии в помещение (аварийное отключение системы отопления можно рассматривать как частный случай прерывистой подачи тепловой энергии с периодом неизвестной продолжительности) коэффициент аккумуляции теплоты из формулы (1) принято находить следующим образом:

$$\beta = \frac{(c\rho F\delta)_{\text{nc}}}{2} \cdot \frac{1}{q_0 V} \cdot \frac{1}{3600}, \text{ ч}, \quad (2)$$

где: c_{nc} , ρ_{nc} , F_{nc} и δ_{nc} – соответственно удельная массовая теплоемкость, Дж/(кг · К), плотность, кг/м³, площадь поверхности, м², и толщина, м, наружной стены помещения (без учета светопрозрачных конструкций).

Можно доказать, что коэффициент β равен произведению теплоемкости половины наружной стены помещения (принцип симметрии) на приведенное сопротивление теплопередаче всей площади наружных ограждений помещения, включая светопрозрачные конструкции.

Переменная величина теплового потока Q_0 в формуле (1) будет постепенно уменьшаться в течение аварийного отключения системы отопления (вплоть до нулевого значения). Если представить систему отопления здания в пределах рассматриваемого помещения, как тело, охлаждаемое в среде с условно постоянной температурой $t_{\text{вн.в}}$, то в соответствии с регулярным тепловым режимом первого рода имеет место следующее соотношение:

$$Q_0 \approx Q_0^{\text{H}} e^{-m\tau}, \text{ Вт}, \quad (3)$$

где Q_0^{H} – начальная тепловая мощность системы отопления помещения (до аварийного отключения), Вт; m – показатель темпа охлаждения системы отопления, 1/ч.

При этом параметр m из выражения (3) будет равен:

$$m \approx \frac{\alpha_k F_0}{C_{\text{м}} + C_{\text{ж}}} \cdot 3600, \text{ 1/ч}, \quad (4)$$

где α_k – коэффициент конвективного теплообмена (теплоотдачи), Вт/(м² · К); F_0 – суммарная площадь поверхности нагрева системы отопления в пределах помещения, м²; $C_{\text{м}}$ и $C_{\text{ж}}$ – соответственно теплоемкости системы отопления (без учета теплоносителя) и теплоносителя в пределах помещения, Дж/К.

Чем больше величина m , тем быстрее происходит охлаждение (остывание) системы отопления. Обратная величина, имеющая размерность времени, служит мерой термической инерции тела.

На данном этапе исследований коэффициент теплоотдачи α_k принимается постоянным, т. е. параметр $m = \text{const}$. В теории проектирования систем отопления и при конструкторском расчете отопительных приборов известно, что коэффициент теплоотдачи $\alpha_k \propto (t_{\text{пов}} - t_{\text{вн.в}})$, где $t_{\text{пов}}$ – средняя температура поверхности радиатора, °С.

В рассматриваемом случае температурный напор $t_{\text{пов}} - t_{\text{вн.в}}$ в течение аварийного отключения системы отопления является переменным и трудно прогнозируемым.

Исходя из уравнения для расчета тепловой нагрузки на нужды отопления здания, которое обычно применяется при проектировании систем централизованного теплоснабжения населенных мест и предприятий, приведем формулу (1) с учетом выражения (3) к следующему виду:

$$t_{\text{вн.в}}^{\text{K}} = t_{\text{н.в}} + (t_{\text{вн.в}}^{\text{H}} - t_{\text{н.в}}) [e^{-m\tau} + (1 - e^{-m\tau}) e^{-\tau/\beta}], \text{ °С}. \quad (5)$$

В безразмерном виде уравнение (5) можно записать следующим образом:

$$\Theta = \frac{t_{\text{вн.в}}^{\text{K}} - t_{\text{н.в}}}{t_{\text{вн.в}}^{\text{H}} - t_{\text{н.в}}} = e^{-m\tau} + (1 - e^{-m\tau}) e^{-\tau/\beta}. \quad (6)$$

Темп падения температуры внутреннего воздуха в случае аварийного отключения системы отопления в соответствии с уравнением (5) будет равен:

$$\Delta t = \left| \frac{dt_{\text{вн.в}}^{\text{K}}}{d\tau} \right| = (t_{\text{вн.в}}^{\text{H}} - t_{\text{н.в}}) \left[(1 - e^{-m\tau}) \frac{e^{-\tau/\beta}}{\beta} + (1 - e^{-\tau/\beta}) m e^{-m\tau} \right], \text{ °С/ч}. \quad (7)$$

Количество тепловой энергии, теряемое помещением в течение аварийного отключения системы отопления, составит:

$$\Delta Q_0 = Q_0^{\text{H}} \int_0^{\tau} \Theta d\tau = Q_0^{\text{H}} \left[\frac{1 - e^{-m\tau}}{m} + \beta (1 - e^{-\tau/\beta}) - \frac{1}{m + \frac{1}{\beta}} \left(1 - e^{-(m + \frac{1}{\beta})\tau} \right) \right] \cdot 3600, \text{ Дж}. \quad (8)$$

В уравнениях (5)-(8) представляет интерес соотношение значений параметров m и $\frac{1}{\beta}$. Если имеет место случай $m \gg \frac{1}{\beta}$ (система отопления остывает на порядок быстрее наружной стены здания) или $m \ll \frac{1}{\beta}$ (наружная стена здания остывает на порядок быстрее системы отопления), то можно получить частные (упрощенные) варианты записи уравнений (5)-(8).

Обсуждение результатов. На рис. 1 изображена расчетная схема теплообмена в отдельном помещении гражданского (жилого или общественного) здания.

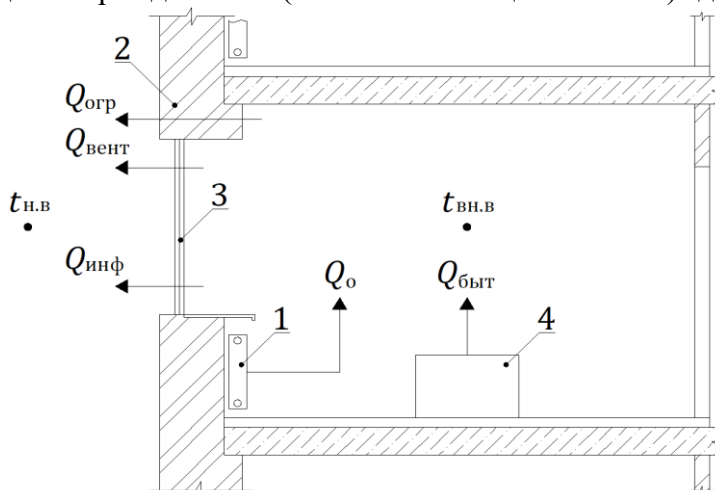


Рис. 1. Тепловой баланс помещения в гражданском здании:
 1 – система отопления; 2 – наружная стена; 3 – светопрозрачная конструкция;
 4 – бытовое и технологическое оборудование

Fig. 1. Thermal balance of a room in a civil building:
 1 – heating system; 2 – exterior wall; 3 – translucent structure;
 4 – household and technological equipment

В помещении гражданского здания (рис. 1) основная часть тепловой энергии Q_o поступает от системы отопления 1, которая включает в себя отопительные приборы и теплопроводы.

Определяющей статьей расхода в тепловом балансе помещения являются суммарные потери теплоты $Q_{огр}$ через наружную стену 2 и светопрозрачную конструкцию 3. В жилых и общественных зданиях только с вытяжной вентиляцией расход теплоты на нагревание инфильтрующегося наружного воздуха с температурой $t_{н.в}$ определяется двумя путями.

В первом случае рассчитываются потери теплоты из условия нагревания инфильтрующегося воздуха $Q_{инф}$, проникающего через ограждающие конструкции помещения, во втором случае – расход теплоты $Q_{вент}$, компенсирующий тепловые потери с удаляемым вентиляционным воздухом. За расчетную величину принимается большее из полученных значений. Бытовое и технологическое оборудование 4 в зависимости от конкретной ситуации может выступать как внутренним источником теплоты $Q_{быт}$, так и дополнительным источником тепловых потерь.

В случае устойчивого теплового режима помещения, показателем которого служит постоянное значение температуры внутреннего воздуха $t_{вн.в}$ в течение холодного периода года, уравнение теплового баланса будет иметь вид (до аварийного отключения системы отопления):

$$Q_o^H = Q_{огр}^H + Q_{вент}^H(Q_{инф}^H) \pm Q_{быт}^H, \text{ Вт.} \quad (9)$$

Рассмотрим на примере комнаты, расположенной на втором этаже жилого здания в городе Вологде (Российская Федерация), тепловой режим помещения при расчетных условиях после аварийного отключения системы отопления (рис. 2).

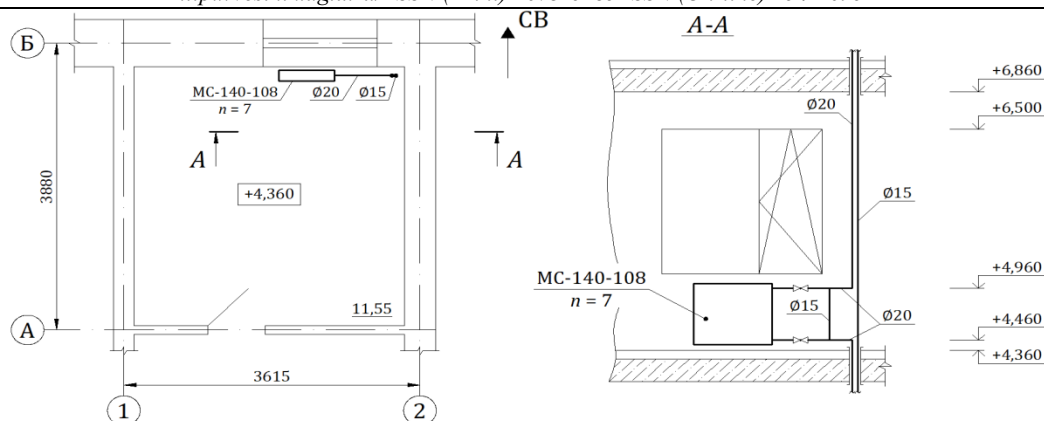


Рис. 2. План и местный поперечный разрез комнаты в жилом здании

Fig. 2. Plan and local cross section of a room in a residential building

Исходные данные для выполнения расчета (рис. 2):

1. Параметры помещения. Линейные размеры (габариты) помещения по внутреннему обмеру следующие: ширина $a = 3,3$ м; длина $b = 3,5$ м; высота $h = 2,5$ м. Площадь пола $F = 11,55$ м². Объем помещения $V = 28,875$ м³.

2. Параметры наружной стены. Наружная стена здания толщиной $\delta_{\text{нс}} = 640$ мм выполнена из силикатного кирпича с коэффициентом теплопроводности $\lambda_{\text{нс}} = 0,80$ Вт/(м · К). Плотность и удельная массовая теплоемкость силикатного кирпича соответственно равны $\rho_{\text{нс}} = 1900$ кг/м³ и $c_{\text{нс}} = 1000$ Дж/(кг · К). Площадь наружной стены помещения без учета светопрозрачной конструкции $F_{\text{нс}} = 6,29$ м².

3. Сопротивление теплопередаче наружной стены помещения $R_{\text{нс}} = 0,96$ м² · К/Вт. В качестве светопрозрачной конструкции используется двухкамерный стеклопакет с линейными размерами: $a_{\text{ок}} = 1,4$ м; высота $h_{\text{ок}} = 1,4$ м. Площадь стеклопакета $F_{\text{ок}} = 1,96$ м². Сопротивление теплопередаче стеклопакета $R_{\text{ок}} = 0,51$ м² · К/Вт. Добавочные коэффициенты на ориентацию по сторонам света (направление: северо-восток): $\beta_{\text{нс}} = \beta_{\text{ок}} = 0,1$. Коэффициент экономайзерного эффекта $\beta_{\text{инф}} = 1,0$.

4. Параметры внутреннего воздуха. Начальная (оптимальная) температура внутреннего воздуха для условий города Вологды в соответствии с ГОСТ 30494-2011 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях» принята равной $t_{\text{вн.в}}^{\text{н}} = 22$ °С. Плотность воздуха при данной температуре $\rho_{\text{вн.в}}^{\text{н}} \approx 1,20$ кг/м³. Удельная массовая теплоемкость воздуха принята постоянной и равной $c_{\text{в}} = 1005$ Дж/(кг · К).

5. Параметры наружного воздуха. По данным СП 131.13330.2020 «Строительная климатология» расчетная температура наружного воздуха (температура наиболее холодной пятидневки, $p = 0,92$) для условий города Вологды принята постоянной в течение аварийного отключения системы отопления и равной $t_{\text{н.в}} = -32$ °С. Плотность воздуха при данной температуре $\rho_{\text{н.в}} \approx 1,46$ кг/м³. Расчетная скорость ветра составляет $w_{\text{н.в}} = 3,9$ м/с.

6. Параметры системы отопления. Система отопления помещения включает в себя чугунно-секционный радиатор марки MC-140-108 (количество секций $n = 7$) и стальные водогазопроводные трубопроводы диаметрами $\varnothing 20$ ($\approx 3,4$ м) и $\varnothing 15$ ($\approx 3,0$ м). Суммарная площадь поверхности нагрева составляет $F_0 \approx 2,06$ м². Объем теплоносителя (воды) в системе отопления помещения $V_{\text{ж}} \approx 0,012$ м³. Масса системы отопления помещения без учета теплоносителя $m_{\text{м}} \approx 62,8$ кг.

7. Удельная теплоемкость металла (стали и чугуна) $c_{\text{м}} = 500$ Дж/(кг · К). Плотность и удельная массовая теплоемкость теплоносителя (воды) соответственно равны $\rho_{\text{ж}} = 1000$ кг/м³ и $c_{\text{ж}} = 4190$ Дж/(кг · К). Средняя температура поверхности системы отопления помещения при расчетных условиях принята равной $t_{\text{пов}} = 82,5$ °С.

Коэффициент конвективного теплообмена (теплоотдачи) равен $\alpha_k \approx 10,2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Тепловая мощность системы отопления помещения до аварийного отключения $Q_0^H = 1270 \text{ Вт}$. Удельная тепловая (отопительная) характеристика помещения $q_0 = 0,813 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$.

8. Параметры системы вентиляция. Высота здания от поверхности земли до отверстия вытяжной шахты $H = 17,0 \text{ м}$. Расстояние от поверхности земли до верха окна $H_{\text{ок}} = 6,5 \text{ м}$. Сопротивление воздухопроницанию двухкамерного стеклопакета принято равным $R_{\text{инф}} = 0,86 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{кг}$. Аэродинамические коэффициенты по данным СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» имеют значения: наветренная стена $c_n = 0,8$; подветренная стена $c_{\text{п}} = -0,5$. Коэффициент учета изменения скоростного давления по высоте здания $k \approx 0,79$ (СП 20.13330.2016). Начальный массовый расход инфильтрующегося воздуха в помещение $G_{\text{инф}}^H \approx 2,42 \text{ кг}/\text{ч}$. Кратность воздухообмена в комнате принята равной $n_v = 3,0 \text{ м}^3/\text{ч}$ на 1 м^2 площади жилого помещения.

По уравнению (2) коэффициент аккумуляции теплоты составил $\beta \approx 45,3 \text{ ч}$. Показатель темпа охлаждения системы отопления по формуле (4) равен $m \approx 0,926 \text{ 1}/\text{ч}$. Так как имеет место математическое условие $m \gg \frac{1}{\beta}$, то уравнения (5)-(8) могут быть записаны в упрощенном (частном) виде:

$$t_{\text{вн.в}}^K = t_{\text{н.в}} + (t_{\text{вн.в}}^H - t_{\text{н.в}})e^{-\tau/\beta}, ^\circ\text{C}, \quad (10)$$

$$\Theta = e^{-\tau/\beta}, \quad (11)$$

$$\Delta t = (t_{\text{вн.в}}^H - t_{\text{н.в}}) \frac{e^{-\tau/\beta}}{\beta}, ^\circ\text{C}/\text{ч}, \quad (12)$$

$$\Delta Q_0 = Q_0^H \beta (1 - e^{-\tau/\beta}) \cdot 3600, \text{ Дж}. \quad (13)$$

На рис. 3 изображены графики изменения температуры внутреннего воздуха $t_{\text{вн.в}}^K$ и безразмерной температуры Θ за период аварийного отключения системы отопления.

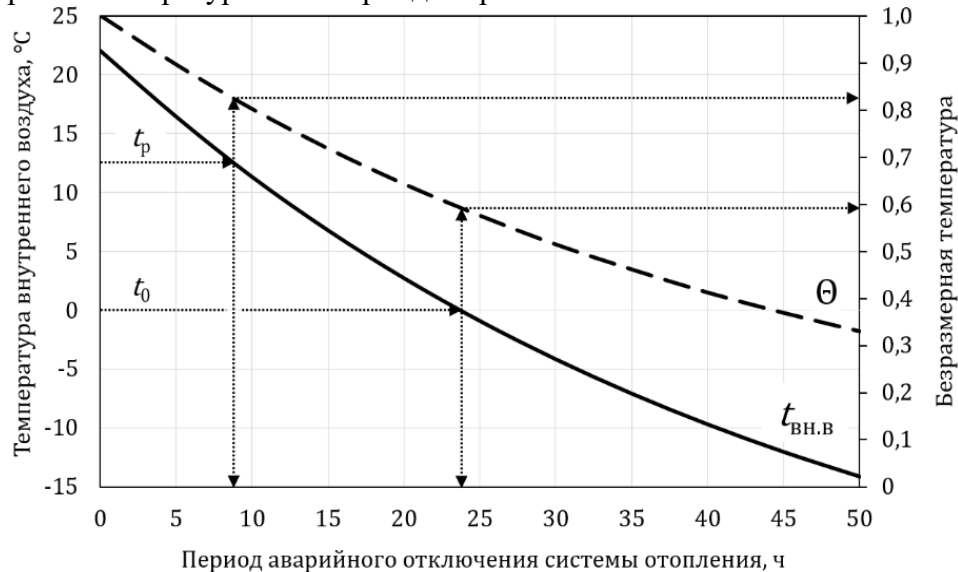


Рис. 3. Температура внутреннего воздуха в помещении: сплошная линия – температура внутреннего воздуха; пунктирная линия – безразмерная температура

Fig. 3. Indoor air temperature: solid line – indoor air temperature; dotted line – dimensionless temperature

В соответствии с рис. 3 при начальной температуре и относительной влажности внутреннего воздуха соответственно $t_{\text{вн.в}}^H = 22 ^\circ\text{C}$ и $\varphi_{\text{вн.в}}^H = 55 \%$ температура точки росы $t_p \approx 12,5 ^\circ\text{C}$ ($\Theta_p = 0,824$) будет достигнута через $\tau_p \approx 8 \text{ ч } 42 \text{ мин}$ после аварийного отключения системы отопления.

За период аварийного отключения системы отопления $\tau_0 \approx 23 \text{ ч } 42 \text{ мин}$ температура внутреннего воздуха опустится до нулевого значения $t_0 = 0 ^\circ\text{C}$ ($\Theta_0 = 0,593$).

На рис. 4 представлены графики изменения темпа падения температуры Δ_t и потерь тепловой энергии ΔQ_0 за период аварийного отключения системы отопления.

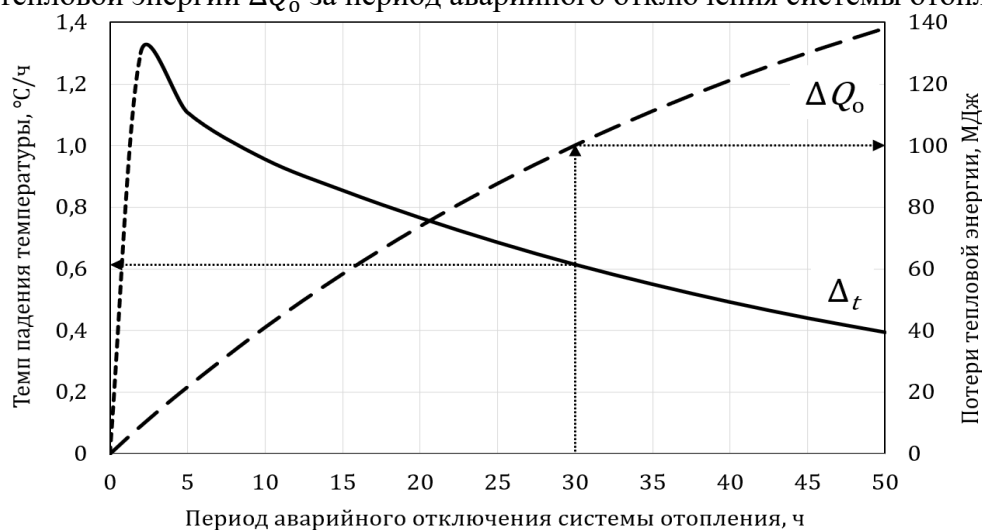


Рис. 4. Темп падения температуры (сплошная линия) и потери тепловой энергии (пунктирная линия)

Fig. 4. The rate of temperature drop (solid line) and heat loss (dotted line)

Например, в момент времени $\tau = 30$ ч темп падения температуры внутреннего воздуха и потери тепловой энергии за рассматриваемый период времени, согласно рис. 4, соответственно составили $\Delta_t \approx 0,62$ °С/ч и $\Delta Q_0 \approx 100$ МДж.

Стоит обратить внимание, что темп падения температуры Δ_t в начальный период времени ведет себя неопределенно: выходя из начала координат, мгновенно достигает максимального значения, после чего наступает период постепенного уменьшения величины Δ_t . Поэтому фрагмент линии $\Delta_t = \Delta_t(\tau)$ на временном отрезке $\tau \in [0; 2]$ ч изображен не сплошной, а пунктирной линией. Установлено, что в момент времени $\tau \approx 2$ ч темп падения температуры достигает максимального значения $\Delta_{t, \text{макс}} \approx 1,30$ °С/ч.

На основе системы математических уравнений (5)-(8) разработана программа для определения температуры внутреннего воздуха в помещении после отключения системы отопления в математическом редакторе Mathcad.

Вывод. Тепловая аккумуляция наружных стен гражданского (жилого или общественного) здания оказывает ключевое влияние на тепловой режим помещения в случае аварийного отключения системы отопления.

При условии $m \gg \frac{1}{\beta}$ остыванием системы отопления можно пренебречь и использовать для расчета систему уравнений (10)-(13). Для комнаты в жилом здании (рис. 2) установлено, что температура внутреннего воздуха достигнет точки росы (12,5 °С) за период времени 8 ч 42 мин после аварийного отключения системы отопления, а нулевого значения – через 23 ч 42 мин.

Среднее значение темпа падения температуры за период времени 50 ч равно 0,72 °С/ч, суммарные потери тепловой энергии составили 138,2 МДж.

Тепловая аккумуляция ограждающих конструкций играет первостепенную роль в сохранении требуемого теплового режима помещения в случае аварийного отключения системы отопления.

При сравнительно малой теплоемкости и большой теплоотдаче, связанной с высоким температурным напором нагревательных элементов, остывание системы отопления происходит достаточно быстро (имеет высокий показатель темпа охлаждения).

Библиографический список:

1. Korniyenko S.V., Dubov I.A., Nazarov K.R. Field study of thermal comfort in dwelling during the winter, mid-season and summer. *Magazine of Civil Engineering*. 2023. 121(5); 12101. <https://doi.org/10.34910/MCE.121.1>
2. Liu H., Ma E. An explainable evaluation model for building thermal comfort in China. *Buildings*. 2023. 13(12); 3107. <https://doi.org/10.3390/buildings13123107>
3. Samarin O.D. Thermal mode of a room with integrated regulation of microclimate systems. *Magazine of Civil Engineering*. 2022. 116(8); 11610. <https://doi.org/10.34910/MCE.116.10>
4. Vuksanovic D., Murgul V., Vatin N., Pukhkal V. Optimization of microclimate in residential buildings. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 680. Pp. 459-466. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.680.459>
5. Nifatova O. Improving the energy efficiency of buildings by providing better protective structures based on the university's knowledge HUB. *Management*. 2021. 34(2). Pp. 26-34. <https://doi.org/10.30857/2415-3206.2021.2.3>
6. Bezdenezhnikh T., Kuritsyn A., Gimelshtein I. Energy efficiency in civil engineering: analyzing world experience. *MATEC Web of Conferences*. 2018. 212; 02009. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201821202009>
7. Рафальская Т.А. Особенности совместной работы систем отопления и горячего водоснабжения в условиях значительного снижения температур наружного воздуха. *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2010. №11-12(623-624). С. 62-72.
8. Hosseini M., Hajialigol P., Aghaei M., Erba S., Nik V., Moazami A. Improving climate resilience and thermal comfort in a complex building through enhanced flexibility of the energy system. *International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*. Eindhoven, 2022. <https://doi.org/10.1109/SEST53650.2022.9898453>
9. Казанов Ю.Н. Реконструкция системы теплоснабжения в городском округе Мытищи. *Энергосбережение*. 2016. №5. С. 29-36.
10. Браславский Н.Д. Характеристики технологических процессов систем жизнедеятельности сельских жилых домов. *Научно-образовательный потенциал молодежи в решении актуальных проблем XXI века*. 2019. № 15. С. 52-55.
11. Королева Т.И., Кузьмишкин А.А., Васин М.Е., Иващенко Н.Ю. Возобновляемые источники энергии – путь к энергосбережению. *Региональная архитектура и строительство*. 2011. №2. С. 135-140.
12. Raof B.Ya. The correlation between building shape and building energy performance. *International Journal of Advanced Research*. 2017. 5(5). Pp. 552-561. <https://doi.org/10.21474/IJAR01/4145>
13. Korniyenko S.V., Vatin N.I., Gorshkov A.S. Thermophysical field testing of residential buildings made of autoclaved aerated concrete blocks. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. 64(4). Pp. 10-25. <https://doi.org/10.5862/MCE.64.2>
14. Fjerbæk E.V., Seidenschnur M., Küçükavci A., Smith K.M., Hviid C.A. From BIM databases to Modelica – Automated simulations of heating systems. *Proceedings of CLIMA 2022 Conference*. Rotterdam, 2022. Pp. 2448-2454. <https://doi.org/10.34641/clima.2022.365>
15. 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. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2024.1.77-83>
16. Малявина Е.Г., Ахвердашвили Р.Г. Определение времени остывания помещения после отключения системы отопления с учетом теплоустойчивости внутренних и наружных многослойных ограждающих конструкций. *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2023. №10(778). С. 83-96. <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2023-778-10-83-96>
17. Варламов Н.В., Горшков А.С., Юферев Ю.В., Лезер А.Ю., Жирнов А.Е., Парашенко Н.А. Теплоаккумулирующая способность здания башни многофункционального комплекса «Лахта Центр». *Теплоэнергетика*. 2023. №1. С. 40-49. <https://doi.org/10.56304/S0040363623010083>
18. Горелов М.В., Гужов С.В., Горячева Е.М., Юркина М.Ю. Экспериментальное определение времени остывания здания при аварийном отключении системы теплоснабжения. *Энергобезопасность и энергосбережение*. 2020. 4(94). С. 11-15. <https://doi.org/10.18635/2071-2219-2020-4-11-15>
19. Staveckis A., Zemitis J. Impact of the limited heat source capacity on indoor temperature and energy consumption in serial nZEB residential buildings across the Baltic region. *Energies*. 2023. 16(16); 5924. <https://doi.org/10.3390/en16165924>
20. Шумилин Е.В., Ильин Н.В. Последствия отключения системы отопления отдельной квартиры в многоквартирном доме. *Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса*. 2023. №1. С. 331-334.

21. Разаков М.А. Особенности теплонапряженности машинного зала при отключении системы отопления. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2022. Т. 24. №6. С. 133-142. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-6-133-142>
22. Akimov V., Ivanova E., Shishkov Yu. Statistical models for forecasting emergency situations of man-caused character. *Reliability: Theory & Applications*. 2023. 76(4). Pp. 41-45. <https://doi.org/10.24412/1932-2321-2023-476-41-45>
23. Геккель И.Я., Рыбаков А.В., Окунцов И.И., Глушаченков А.А. Общая постановка задачи оценки показателя защищенности населения при чрезвычайных ситуациях, связанных с аварийным отключением теплоснабжения жилых зданий. *Научные и образовательные проблемы гражданской защиты*. 2019. №1(40). С. 86-94.
24. Rafalskaya T. Safety of engineering systems of buildings with limited heat supply. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. 1030(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1030/1/012049>
25. Tian Ye, Zhou Zh., Wang Zh. Connection method between urban heat-supply systems based on requirement of limited-heating. *Procedia Engineering*. 2016. 146. Pp. 386-393. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.417>

References:

1. Korniyenko S.V., Dubov I.A., Nazarov K.R. Field study of thermal comfort in dwelling during the winter, mid-season and summer. *Magazine of Civil Engineering*. 2023;121(5):12101. <https://doi.org/10.34910/MCE.121.1>
2. Liu H., Ma E. An explainable evaluation model for building thermal comfort in China. *Buildings*. 2023;13(12):3107. <https://doi.org/10.3390/buildings13123107>
3. Samarin O.D. Thermal mode of a room with integrated regulation of microclimate systems. *Magazine of Civil Engineering*. 2022. 116(8); 11610. <https://doi.org/10.34910/MCE.116.10>
4. Vuksanovic D., Murgul V., Vatin N., Pukhkal V. Optimization of microclimate in residential buildings. *Applied Mechanics and Materials*. 2014;680:459-466. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.680.459>
5. Nifatova O. Improving the energy efficiency of buildings by providing better protective structures based on the university's knowledge HUB. *Management*. 2021;34(2):26-34. <https://doi.org/10.30857/2415-3206.2021.2.3>
6. Bezdenezhnukh T., Kuritsyn A., Gimelshtein I. Energy efficiency in civil engineering: analyzing world experience. *MATEC Web of Conferences*. 2018;212:02009. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201821202009>
7. Rafalskaya T.A. Features of teamwork of heating and hot water supply systems in conditions of significant decrease of external air temperatures. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2010; 11-12(623-624): 62-72. (In Russ.)
8. Hosseini M., Hajialigol P., Aghaei M., Erba S., Nik V., Moazami A. Improving climate resilience and thermal comfort in a complex building through enhanced flexibility of the energy system. *International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*. Eindhoven, 2022. <https://doi.org/10.1109/SEST53650.2022.9898453>
9. Kazanov Yu.N. Reconstruction of Heat Supply System in Mytishchi town district. *Energy Saving*. 2016. No. 5. Pp. 29-36. (In Russ.)
10. Braslavskiy N.D. The effect of voltage on the characteristics of irradiation facilities in the greenhouse. *Youth Scientific and Educational Potential in Solving Actual Problems of the XXI Century*. 2019;15: 52-55. (In Russ.)
11. Koroleva T.I., Kuzimishkin A.A., Vasin I.A., Ivashenko N.Y. Renewable energy sources – a way to power savings. *The Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2011; 2:135-140. (In Russ.)
12. Raof B.Ya. The correlation between building shape and building energy performance. *International Journal of Advanced Research*. 2017;5(5): 552-561. <https://doi.org/10.21474/IJAR01/4145>
13. Korniyenko S.V., Vatin N.I., Gorshkov A.S. Thermophysical field testing of residential buildings made of autoclaved aerated concrete blocks. *Magazine of Civil Engineering*. 2016; 64(4):10-25. <https://doi.org/10.5862/MCE.64.2>
14. Fjerbæk E.V., Seidenschnur M., Küçükavci A., Smith K.M., Hviid C.A. From BIM databases to Modelica – Automated simulations of heating systems. *Proceedings of CLIMA 2022 Conference*. Rotterdam, 2022; 2448-2454. <https://doi.org/10.34641/clima.2022.365>
15. Samarin O.D. Calculation of cooling of building premises in emergency modes at variable outdoor temperature. *Vestnik MGSU*. 2024;19(1):77-83. (In Russ.) <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2024.1.77-83>
16. Malyavina E.G., Akhverdashvili R.G. Determination of the room cooling time after switching off the heating system, taking into account the thermal stability of indoor and outdoor multilayer enclosing

- structures. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2023;778(10):83-96. (In Russ.) <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2023-778-10-83-96>
17. Varlamov N.V., Gorshkov A.S., Yuferev Yu.V., Lezer A.Yu., Zhirnov A.E., Parashchenko N.A. The heat-storage capacity of the Lakhta Center multifunctional complex tower building. *Thermal Engineering*. 2023; 1:40-49. (In Russ.) <https://doi.org/10.56304/S0040363623010083>
 18. Gorelov M.V., Guzhov S.V., Goryacheva E.M., Yurkina M.Yu. Experimental research of the cooling time in case of a building heat supply shutdown. *Energy-Safety and Energy-Economy*. 2020;94(4): 11-15. (In Russ.) <https://doi.org/10.18635/2071-2219-2020-4-11-15>
 19. Staveckis A., Zemitis J. Impact of the limited heat source capacity on indoor temperature and energy consumption in serial nZEB residential buildings across the Baltic region. *Energies*. 2023. 16(16); 5924. <https://doi.org/10.3390/en16165924>
 20. Shumilin E.V., Ilyin N.V. Consequences of disconnecting the heating system of a separate apartment in an apartment building. *Far East: Problems of Development of Architectural and Construction Complex*. 2023; 1: 331-334. (In Russ.)
 21. Razakov M.A. Engine room thermal density specials in heating systems shutdown process. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022;4(6):133-142. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-6-133-142>
 22. Akimov V., Ivanova E., Shishkov Yu. Statistical models for forecasting emergency situations of man-caused character. *Reliability: Theory & Applications*. 2023. 76(4):41-45. <https://doi.org/10.24412/1932-2321-2023-476-41-45>
 23. Gekkel I.Ya., Rybakov A.V., Okuntsov I.I., Glushachenkov A.A. General problem statement of the assessment of the population security indication under emergency situations associated with emergency shutdown of heat supply of houses. *Scientific and Educational Problems of Civil Protection*. 2019;40(1): 86-94. (In Russ.)
 24. Rafalskaya T. Safety of engineering systems of buildings with limited heat supply. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021;1030(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1030/1/012049>
 25. Tian Ye, Zhou Zh., Wang Zh. Connection method between urban heat-supply systems based on requirement of limited-heating. *Procedia Engineering*. 2016;146:386-393. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.417>

Сведения об авторах:

Карпов Денис Федорович, старший преподаватель, кафедра теплогазоснабжения; karpovdf@vogu35.ru; ORCID 0000-0002-3522-9302

Павлов Михаил Васильевич, кандидат технических наук, доцент, доцент, кафедра теплогазоснабжения; pavlovmv@vogu35.ru; ORCID 0000-0002-8687-3296

Абрамова Елена Вячеславовна, доктор технических наук, профессор, кафедра сварки, диагностика и специальной робототехники; главный научный сотрудник, НИИСФ РААСН; eva32@bk.ru; РИНЦ ID 107200

Вафаева Христина Максудовна, инженер-исследователь, лаборатория самовосстанавливающихся конструкционных материалов; vafaeva.khm@gmail.com; ORCID 0000-0002-7422-5494

Information about authors:

Denis F. Karpov, Senior Lecturer, Department of Heat, Gas and Water Supply; karpovdf@vogu35.ru; ORCID 0000-0002-3522-9302

Mikhail V. Pavlov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Heat, Gas and Water Supply; pavlovmv@vogu35.ru; ORCID 0000-0002-8687-3296

Elena V. Abramova, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of Welding, Diagnostics and Special Robotics; Chief Scientific Officer, NIISF RAASN; eva32@bk.ru; RSCI ID 107200

Khristina M. Vafaeva, Research Engineer, Laboratory of Self-Healing Structural Materials; vafaeva.khm@gmail.com; ORCID 0000-0002-7422-5494

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare that there are no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/ Received 06.03.2024.

Одобрена после рецензирования / Revised 30.03.2024.

Принята в печать /Accepted for publication 30.03.2024.