

Разработка и верификация программно-вычислительного метода моделирования температурного режима помещения при аварийных отключениях отопления

Д.Ф. Карпов¹, М.В. Павлов¹, Х.М. Вафаева², А.А. Фролова³

¹Вологодский государственный университет,

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

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

²195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29 литера Б, Россия,

³Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет,

³129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, Россия

Резюме. Цель. Цель исследования – подтвердить корректность работы цифрового инструмента, который обеспечивает расчет температурного режима помещения, темпа падения температуры воздуха и тепловых потерь в условиях прерывистой подачи энергии, с учетом теплоаккумулирующих свойств ограждающих конструкций и элементов системы отопления. **Метод.** Методической основой программного обеспечения являются теория теплоустойчивости и закон регулярного теплового режима первого рода, описывающий процесс остывания элементов системы отопления и ограждающих конструкций. Программный алгоритм состоит из двух последовательных вычислительных блоков, которые обрабатывают геометрические, теплофизические и эксплуатационные параметры помещения, наружных ограждений и системы отопления. Программный продукт ориентирован на исследовательские и инженерно-технические расчеты. **Результат.** Проведена проверка программного продукта для определения температуры внутреннего воздуха в размерном и безразмерном видах, темпа падения температуры и тепловых потерь за период остывания помещения. Тестирование подтвердило устойчивость расчетов и соответствие результатов физической модели теплообмена. **Вывод.** Новизна результатов исследования заключается в алгоритмической интеграции процессов охлаждения воздуха, ограждающих конструкций и системы отопления в едином программно-вычислительном подходе. Разработанный метод обеспечивает автоматизацию расчетов температурного режима помещения при аварийных отключениях системы отопления и предназначен для анализа надежности, энергоэффективности и эксплуатационной устойчивости зданий.

Ключевые слова: прерывистое отопление, аварийное отключение отопления, система отопления, теплоустойчивость, температура внутреннего воздуха, тепловая энергия, регулярный тепловой режим, ограждающие конструкции, программное обеспечение, цифровой инструмент, алгоритм.

Для цитирования: Д.Ф. Карпов, М.В. Павлов, Х.М. Вафаева, А.А. Фролова. Разработка и верификация программно-вычислительного метода моделирования температурного режима помещения при аварийных отключениях отопления. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2026;53(2):192-201. DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-2-192-201

Development and verification of a computational software-based method for modeling the indoor thermal regime under emergency heating shutdowns

D.F. Karpov¹, M.V. Pavlov¹, Kh.M. Vafaeva², A.A. Frolova³

¹Vologda State University,

¹15 Lenin St., Vologda 160000, Russia,

²Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University,

²29 Letter B Polytechnicheskaya St., Saint Petersburg, 195251, Russia,

³Moscow State University of Civil Engineering (National Research University),

³Yaroslavskoe Highway, 26, Moscow, 129337, Russia

Abstract. Objective. This study presents the development and verification of a computational method for predicting indoor air temperature during emergency heating shutdowns. The aim of the study is to verify the correctness of a digital tool designed to calculate the indoor temperature regime, the rate of air temperature drop and heat losses under intermittent energy supply conditions, taking into account the heat-storage properties of enclosing structures and heating system components. **Method.** The methodological basis is the theory of thermal stability and the law of regular thermal conditions of the first kind, which describes the cooling process of heating system elements and enclosing structures. The software algorithm consists of two blocks that process the geometric, thermophysical, and operational parameters of the room, external enclosures, and heating system. The software is designed for research and engineering calculations. **Result.** The developed tool was tested to determine indoor air temperature in both dimensional and nondimensional forms, the rate of temperature drop and heat losses during the room cooling period. Testing confirmed the stability of calculations and their consistency with the physical heat transfer model. **Conclusion.** The novelty lies in the algorithmic integration of air cooling processes, building envelopes, and the heating system within a single software and computing approach. The method automates calculations of room temperature conditions during heating system outages and is designed to analyze the reliability, energy efficiency, and operational sustainability of buildings.

Keywords: intermittent heating, emergency shutdown of heating, heating system, thermal stability, indoor air temperature, thermal energy, periodic thermal regime, building envelope, software, digital tool, algorithm.

For citation: D.F. Karpov, M.V. Pavlov, Kh.M. Vafaeva, A.A. Frolova. Development and verification of a computational software-based method for modeling the indoor thermal regime under emergency heating shutdowns. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2026;53(2):192-201. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2026-53-2-192-201

Введение. Современные требования к энергоэффективности, надежности и эксплуатационной устойчивости зданий обуславливают необходимость прогнозирования температурного режима помещений не только в расчетных, но и в аварийных режимах эксплуатации [1, 2].

В этой связи особое значение приобретает анализ функционирования систем отопления и ограждающих конструкций в условиях прерывистой подачи тепловой энергии, сопровождающейся нестационарным охлаждением внутреннего воздуха [3, 4].

Существующие инженерные методики ориентированы на стационарные режимы теплопередачи и в большинстве случаев не предусматривают использование полнофункциональных программных средств, обеспечивающих прогнозирование динамики остывания помещений при аварийных отключениях теплоснабжения [5, 6].

В условиях цифровой трансформации строительной отрасли как в России [7], так и за рубежом [8-10] актуальной является разработка программно-вычислительных методов, позволяющих автоматизировать расчеты температурных параметров помещений при нештатных и аварийных режимах работы систем теплоснабжения [11].

Повышенный интерес представляют алгоритмы, основанные на теории теплоустойчивости [12-14] и реализованные в виде прикладных программных средств, ориентированных на инженерно-технический анализ, а также на поддержку принятия проектных и эксплуатационных решений [15-20].

Несмотря на разнообразие подходов к аналитическому [21-23] и численному моделированию процессов остывания помещений [24-26], оценке эффективности модернизации

систем отопления [27] и анализу надежности тепловых сетей [28], в опубликованных исследованиях отсутствует интегрированный программно-вычислительный инструмент, позволяющий комплексно прогнозировать динамику температуры внутреннего воздуха, тепловые потери и влияние теплоаккумулирующих характеристик ограждающих конструкций в условиях аварийных отключений отопления.

Анализ публикаций [21-28] выявил высокую потребность в точном моделировании теплообмена и оптимизации функционирования систем отопления, а также показал, что существующие решения, как правило, носят фрагментарный характер и не обеспечивают комплексного прогноза температурного режима помещений при аварийных отключениях теплоснабжения. Данные факты подтверждают актуальность и научную новизну предлагаемого в исследовании подхода.

Постановка задачи. Представленное исследование направлено на устранение идентифицированного методологического и практического пробела путем верификации разработанного программно-вычислительного метода, учитывающего теплоаккумулирующие характеристики ограждающих конструкций и элементов системы отопления и обеспечивающего надежное прогнозирование температурного режима помещений и тепловых потерь в аварийных условиях.

Работа является логическим продолжением и развитием идей, представленных в [2].

Объект исследования – помещение в условиях аварийного отключения отопления. Предмет исследования – программно-вычислительный метод моделирования температурного режима помещения при аварийных отключениях отопления.

Цель исследования – разработка и верификация цифрового инструмента для моделирования температурного режима помещения при аварийных отключениях системы отопления. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработка расчетного алгоритма определения температуры внутреннего воздуха помещения в условиях аварийного (прерывистого) теплоснабжения с учетом теплофизических характеристик ограждающих конструкций и параметров системы отопления.

2. Реализация программной структуры, обеспечивающей автоматизированный ввод исходных данных и вычисление температурных и энергетических параметров остывания помещения.

3. Проверка программного продукта и оценка его применимости для инженерных расчетов в области теплоснабжения зданий.

Методы исследования. Исследование основано на применении теории теплоустойчивости при прерывистой подаче тепловой энергии. Температурное состояние внутреннего воздуха рассматривается во взаимосвязи с процессами теплообмена между системой отопления, ограждающими конструкциями и окружающей средой [29].

В качестве теоретической базы применяется закон регулярного теплового режима первого рода для условий конвективного теплообмена при малых значениях безразмерного числа Био ($Bi \ll 1$), что соответствует квазистационарному распределению температуры по сечению элементов системы отопления и ограждающих конструкций.

Такой подход позволяет описывать процесс охлаждения элементов системы отопления и строительных конструкций экспоненциальной зависимостью.

Алгоритм расчета структурирован по блочно-модульному принципу, обеспечивающему логическую декомпозицию вычислительного процесса и удобство программной реализации.

Два функциональных блока программы позволяют идентифицировать теплоаккумулирующие характеристики наружных стен, теплоемкость системы отопления и параметры теплопередачи.

Блок 1. Исходные данные.

1.1. Параметры помещения: ширина a , м, длина b , м, и высота h , м.

1.2. Параметры наружной стены: толщина $\delta_{\text{нс}}$, м; линейные размеры окна (ширина $a_{\text{ок}}$, м, и высота $h_{\text{ок}}$, м) и общее количество окон в помещении $n_{\text{ок}}$; плотность $\rho_{\text{нс}}$, кг/м³; удельная массовая теплоемкость $c_{\text{нс}}$, Дж/(кг · К).

1.3. Параметры внутреннего воздуха: начальная температура воздуха (в момент отключения системы отопления) $t_{\text{вн.в}}^{\text{H}}$, °С.

1.4. Параметры наружного воздуха: температура воздуха $t_{\text{н.в}}$, °С.

1.5. Параметры системы отопления: суммарная площадь поверхности нагрева F_0 , м²; объем теплоносителя $V_{\text{ж}}$, м³; масса $m_{\text{м}}$, кг, и удельная массовая теплоемкость $c_{\text{м}}$, Дж/(кг · К), металла; плотность $\rho_{\text{ж}}$, кг/м³, и удельная массовая теплоемкость $c_{\text{ж}}$, Дж/(кг · К), теплоносителя; начальная тепловая мощность системы отопления (в момент ее отключения) Q_0^{H} , Вт; коэффициент конвективного теплообмена (теплоотдачи) $\alpha_{\text{к}}$, Вт/(м² · К).

Блок 2. Результаты программных вычислений.

2.1. Параметры помещения.

Удельную тепловую характеристику помещения вычисляют по математическому выражению:

$$q_0 = \frac{Q_0}{V(t_{\text{вн.в}}^{\text{H}} - t_{\text{н.в}})}, \text{ Вт/(м}^3 \cdot \text{°С)}, \quad (1)$$

где Q_0 – начальная тепловая мощность системы отопления (в момент ее отключения), Вт; V – объем отапливаемого помещения, м³; $t_{\text{вн.в}}^{\text{H}}$ – начальная температура внутреннего воздуха (в момент отключения системы отопления), °С; $t_{\text{н.в}}$ – температура наружного воздуха, °С.

2.2. Параметры наружной стены.

Коэффициент аккумуляции теплоты вычисляют по математическому выражению:

$$\beta_{\text{нс}} = \frac{c_{\text{нс}} \rho_{\text{нс}} F_{\text{нс}} \delta_{\text{нс}}}{2} \cdot \frac{1}{q_0 V} \cdot \frac{1}{3600}, \text{ ч}, \quad (2)$$

где $c_{\text{нс}}$, $\rho_{\text{нс}}$, $F_{\text{нс}}$ и $\delta_{\text{нс}}$ – соответственно удельная массовая теплоемкость, Дж/(кг · К), плотность, кг/м³, площадь поверхности, м², и толщина, м, наружной стены здания в пределах помещения (без учета окон).

2.3. Параметры системы отопления.

Теплоемкость системы отопления вычисляют по математическому выражению:

$$C_0 = c_{\text{м}} m_{\text{м}} + c_{\text{ж}} \rho_{\text{ж}} V_{\text{ж}}, \text{ Дж/К}, \quad (3)$$

где $c_{\text{м}}$ и $m_{\text{м}}$ – соответственно удельная массовая теплоемкость, Дж/(кг · К), и масса, кг, системы отопления в пределах помещения (без учета теплоносителя); $c_{\text{ж}}$, $\rho_{\text{ж}}$ и $V_{\text{ж}}$ – соответственно удельная массовая теплоемкость, Дж/(кг · К), плотность, кг/м³, и объем, м³, теплоносителя в системе отопления в пределах помещения.

Темп охлаждения системы отопления вычисляют по математическому выражению:

$$m_0 = \frac{\alpha_{\text{к}} F_0}{C_0} \cdot 3600, \text{ 1/ч}, \quad (4)$$

где $\alpha_{\text{к}}$ – коэффициент конвективного теплообмена (теплоотдачи), Вт/(м² · К); F_0 – суммарная площадь поверхности нагрева системы отопления в пределах помещения, м².

2.4. Искомые параметры. Температуру воздуха в помещении при отключении системы отопления здания рассчитывают по математическому выражению:

$$t_{\text{вн.в}}^{\text{K}} = t_{\text{н.в}} + (t_{\text{вн.в}}^{\text{H}} - t_{\text{н.в}}) [e^{-m_0 \tau} + (1 - e^{-m_0 \tau}) e^{-\tau/\beta_{\text{нс}}}], \text{ °С}, \quad (5)$$

где τ – период отключения системы отопления, ч.

Математическое выражение (5) в безразмерной форме имеет вид:

$$\Theta = \frac{t_{\text{вн.в}}^{\text{K}} - t_{\text{н.в}}}{t_{\text{вн.в}}^{\text{H}} - t_{\text{н.в}}} = e^{-m_0 \tau} + (1 - e^{-m_0 \tau}) e^{-\tau/\beta_{\text{нс}}}. \quad (6)$$

Темп падения температуры внутреннего воздуха вычисляют по математическому выражению:

$$\Delta_t = (t_{\text{вн.в}}^{\text{H}} - t_{\text{н.в}}) \left[\frac{(1 - e^{-m_0 \tau}) e^{-\tau/\beta_{\text{нс}}}}{\beta_{\text{нс}}} + (1 - e^{-\tau/\beta_{\text{нс}}}) m_0 e^{-m_0 \tau} \right], \text{ °С/ч}. \quad (7)$$

Тепловые потери через наружное ограждение за время отключения системы отопления вычисляются по математическому выражению:

$$\Delta Q_o = Q_o \left[\frac{1 - e^{-m_o \tau}}{m_o} + \beta_{nc} (1 - e^{-\tau/\beta_{nc}}) - \frac{1}{m_o + \frac{1}{\beta_{nc}}} \left[1 - e^{-(m_o + \frac{1}{\beta_{nc}})\tau} \right] \right] \cdot 3600 \cdot 10^{-6}, \text{ МДж.} \quad (8)$$

Система математических выражений (1-8) формирует целостную программно-вычислительную модель температурного режима помещения при аварийном отключении системы отопления.

Алгоритмическая реализация указанных соотношений позволяет учитывать теплоаккумулирующие свойства ограждающих конструкций, элементов системы отопления и оценивать динамику охлаждения внутреннего воздуха во времени. Методический подход обеспечивает воспроизводимость результатов, предназначен для инженерного анализа надежности и теплотехнической устойчивости систем отопления зданий.

Обсуждение результатов. Реализация разработанного программно-вычислительного метода позволила получить расчетные параметры внутреннего воздуха помещения после отключения системы отопления при различных значениях теплофизических и эксплуатационных характеристик.

Табл. 1 содержит исходные данные и результаты расчета температурного режима помещения при аварийном отключении системы отопления с применением разработанного и зарегистрированного прикладного программного обеспечения.

Цифровой инструмент реализован с использованием языка программирования Visual C++ в интеграции с вычислительной средой Mathcad [30].

Таблица 1. Исходные данные и результаты расчета температурного режима помещения при аварийном отключении отопления

Table 1. Input data and results of the calculation of the indoor thermal regime during an emergency heating shutdown

Блок 1. Исходные данные. Block 1. Input data.	
1.1. Параметры помещения:	
линейные размеры: ширина $a=3,3$ м, длина $b=3,5$ м, и высота $h=2,5$ м.	
1.2. Параметры наружной стены: толщина $\delta_{nc} = 0,64$ м,	
линейные размеры окна: ширина $a_{ок} = 1,4$ м, высота $h_{ок} = 1,4$ м, количество окон $n_{ок} = 1$, плотность $\rho_{nc} = 1900$ кг/м ³ , удельная массовая теплоемкость $c_{nc} = 1000$ Дж/(кг · К).	
1.3. Параметры внутреннего воздуха: начальная температура $t_{вн.в}^H = 22$ °С.	
1.4. Параметры наружного воздуха: температура $t_{н.в} = -32$ °С.	
1.5. Параметры системы отопления:	
площадь поверхности нагрева $F_o = 2,058$ м ² , объем теплоносителя $V_{ж} = 0,012$ м ³ , масса $m_m = 62,824$ кг, удельная теплоемкость металла $c_m = 500$ Дж/(кг · К), плотность теплоносителя $\rho_{ж} = 1000$ кг/м ³ , удельная теплоемкость теплоносителя $c_{ж} = 4190$ Дж/(кг · К), начальная тепловая мощность $Q_o^H = 1270$ Вт, коэффициент теплоотдачи $\alpha_k = 10,2$ Вт/(м ² · К).	
Блок 2. Результаты программных вычислений. Block 2. Results of the software-based calculations.	
Период отключения системы отопления $\tau = 10$ ч.	
2.1. Параметры помещения: объем $V = 28,875$ м ³ ,	
удельная тепловая характеристика $q_o = \frac{Q_o}{V(t_{вн.в}^H - t_{н.в})} = 0,814$ Вт/(м ³ · °С).	
2.2. Параметры наружной стены: площадь (без учета окон) $F_{nc} = 6,29$ м ² ,	
коэффициент аккумуляции теплоты $\beta_{nc} = \frac{c_{nc}\rho_{nc}F_{nc}\delta_{nc}}{2} \cdot \frac{1}{q_o V} \cdot \frac{1}{3600} = 45,169$ ч.	
2.3. Параметры системы отопления:	
теплоемкость $C_o = c_m m_m + c_{ж} \rho_{ж} V_{ж} = 8,169 \cdot 10^4$, Дж/К,	

показатель темпа охлаждения $m_o = \frac{\alpha_k F_o}{C_o} \cdot 3600 = 0,925 \text{ 1/ч.}$
2.4. Искомые параметры:
конечная температура $t_{\text{вн.в}}^k = t_{\text{н.в}} + (t_{\text{вн.в}}^h - t_{\text{н.в}}) [e^{-m_o \tau} + (1 - e^{-m_o \tau}) e^{-\tau/\beta_{\text{нс}}}] = 11,277 \text{ }^\circ\text{C},$
безразмерная температура $\Theta = \frac{t_{\text{вн.в}}^k - t_{\text{н.в}}}{t_{\text{вн.в}}^h - t_{\text{н.в}}} = e^{-m_o \tau} + (1 - e^{-m_o \tau}) e^{-\tau/\beta_{\text{нс}}} = 0,801,$
темпа падения температуры $\Delta t = (t_{\text{вн.в}}^h - t_{\text{н.в}}) \left[\frac{(1 - e^{-m_o \tau}) e^{-\tau/\beta_{\text{нс}}}}{\beta_{\text{нс}}} + (1 - e^{-\tau/\beta_{\text{нс}}}) m_o e^{-m_o \tau} \right] = 0,959 \text{ }^\circ\text{C/ч},$
потери тепловой энергии при остывании помещения за расчетный период времени $\Delta Q_o = Q_o \left[\frac{1 - e^{-m_o \tau}}{m_o} + \beta_{\text{нс}} (1 - e^{-\tau/\beta_{\text{нс}}}) - \frac{1}{m_o + \frac{1}{\beta_{\text{нс}}}} \left[1 - e^{-(m_o + \frac{1}{\beta_{\text{нс}}}) \tau} \right] \right] \cdot 3600 \cdot 10^{-6} = 41,128 \text{ МДж.}$

Теплоаккумулирующие свойства ограждающих конструкций и системы отопления оказывают существенное влияние на характер остывания помещения и темпа падения температуры внутреннего воздуха, что согласуется с положениями теории теплоустойчивости.

Применение численного моделирования подтверждает адекватность разработанного программно-вычислительного метода для описания нестационарного температурного режима помещения при аварийных отключениях отопления, а сопоставление расчетных данных с теоретическими положениями теплофизики зданий свидетельствует о корректности используемых расчетных зависимостей и принятых допущений. Полученные данные могут быть использованы для сравнительного анализа различных вариантов ограждающих конструкций и параметров системы отопления при оценке сценариев аварийного отключения теплоснабжения.

Вывод. В ходе исследования верифицирован разработанный программно-вычислительный метод моделирования температурного режима помещения при аварийном отключении системы отопления.

Цифровой инструмент обеспечивает автоматизацию расчетов нестационарных тепловых процессов и позволяет учитывать теплоаккумулирующее влияние ограждающих конструкций и элементов системы отопления.

Разработанный программно-вычислительный метод может быть использован в инженерной практике при анализе аварийных режимов теплоснабжения зданий, а также служить основой для дальнейшего развития цифровых инструментов моделирования нестационарных тепловых процессов в строительстве.

Основные выводы по результатам работы:

1. Разработан программно-вычислительный метод прогнозирования температуры внутреннего воздуха при аварийных отключениях отопления, основанный на алгоритмической интеграции процессов охлаждения воздуха, строительных конструкций и отопительных приборов в рамках единой расчетной модели.

2. Реализован цифровой программный продукт, обеспечивающий расчет температурных параметров в размерной и безразмерной формах, темпа падения температуры и потерь тепловой энергии, что расширяет возможности инженерного анализа нестационарных режимов теплоснабжения зданий.

3. Проведена апробация, подтвердившая устойчивость вычислительного алгоритма, физическую корректность используемой модели теплообмена и применимость разработанного метода для оценки надежности, энергоэффективности и эксплуатационной устойчивости систем отопления.

Перспективы дальнейших исследований по заявленной теме состоят в:

1. Интеграции алгоритмов прогноза нестационарного температурного режима с BIM-технологиями и системами «Smart Home» для автоматизированного мониторинга

и управления аварийными режимами теплоснабжения зданий с возможностью прогнозирования их последствий в режиме реального времени;

2. Разработке методов машинного обучения и искусственного интеллекта для адаптивной оптимизации работы систем отопления с учетом тепловой инерции ограждающих конструкций и внешних климатических условий, позволяющих повысить энергоэффективность и устойчивость к аварийным отключениям;
3. Создании облачных и многопользовательских платформ программно-вычислительных инструментов моделирования тепловых процессов с визуализацией динамики температуры, анализа тепловых потерь и оценки надежности систем отопления, обеспечивающих широкое использование инструментов в профессиональной практике проектирования, эксплуатации и научных исследований.

Библиографический список:

1. Малявина, Е.Г., Суслова, В.В. Влияние теплоемкости ограждающих конструкций помещения на его температуру после отключения отопления // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2025. № 2(794). С. 76-84. <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2025-794-2-76-84>
2. Карпов, Д.Ф., Павлов, М.В., Абрамова, Е.В., Вафаева, Х.М. Исследование температуры внутреннего воздуха в помещении гражданского здания после аварийного отключения системы отопления // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2024. Т. 51. № 2. С. 197-207. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2024-51-2-197-207>
3. 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
4. Павлов, М.В., Карпов, Д.Ф., Храпонова, Л.В. Прогнозирование температуры воздуха в культивационном сооружении после отключения системы отопления // *Природообустройство*. 2025. № 3. С. 30-37. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-30-37>
5. 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>
6. 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>
7. Borovkov, A.I., Vafaeva, Kh.M., Vatin, N.I., Ponyaeva, I. Synergistic Integration of Digital Twins and Neural Networks for Advancing Optimization in the Construction Industry: A Comprehensive Review // *Construction Materials and Products*. 2024. Vol. 7. No. 4. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-4-7>
8. Feng, Yuxin and Hwang, Bon-Gang. Toward a Sustainable Paradigm: Navigating Digital Transformation in the Construction Industry. *Sustainable Development*. 2025;33. DOI.org/9335-9351. 10.1002/sd.70162
9. Lima, Maria and Cunha, Thaís and Cândido, Luis and de Paula Barros Neto, José. Digital Transformation in the Construction Industry: Lessons and Challenges from the Journey of Brazilian Construction Companies // *Sustainability*. 2025. Vol. 18. P. 407. <https://doi.org/10.3390/su18010407>
10. Soltani, Sahar and Giusti Gestri, Lisa and Pavez, Fernando and Maxwell, Duncan. A multi-staged analysis to propose a construction hub framework to drive sustainable and digital transformation in the construction industry // *Smart and Sustainable Built Environment*. 2025;1. <https://doi.org/10.1108/SASBE-11-2024-0458>
11. Стрижак, П.А., Морозов, М.Н. Тепловой режим здания при аварийной работе системы теплоснабжения // *Главный энергетик*. 2014. № 7. С. 39-45
12. Chen, Lu and Han, Zhipan and Wu, Yujie and Zhang, Zhongshan and Liu, Yu and Li, Xiaomeng and Cao, Hui and Chen, Yongxu and Yang, Kun. Research on Energy-Efficient Retrofit Design and Thermal Load Characteristics of Public Buildings Based on Optimal Thermal Comfort // *Buildings*. 2025. Vol. 15. P. 4066. <https://doi.org/10.3390/buildings15224066>
13. Bianco, Nicola and Fragnito, Andrea and Mauro, Gerardo and Menna, Costantino and Roselli, Carlo. Thermal analysis of 3D-printed panels for enhanced building envelope performance // *Journal of Physics: Conference Series*. 2025. Vol. 3143. P. 012048. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/3143/1/012048>
14. Ponni, M and Hemalatha, A and Baskar, S and Kuchana, Rakesh. AI-Based Optimization Of HVAC Systems For Smart Energy-Efficient Buildings // *International Journal of Environmental Sciences*. 2025. Vol. 11. P. 950. <https://doi.org/10.64252/cgw1g472>
15. Piras, Giuseppe and Muzi, Francesco and Ziran, Zahra. A Data-Driven Model for the Energy and Economic Assessment of Building Renovations. *Applied Sciences*. 2025;15:8117. DOI.org/10.3390/app15148117

16. Ali, Dalia and Motuzienė, Violeta. Applying AI to HVAC Systems: a Critical Analysis of Data-Related Challenges // *CONNECT. International Scientific Conference of Environmental and Climate Technologies*. 2025. Vol. 18. <https://doi.org/10.7250/CONNECT.2025.002>
17. Romaio, A. and Paravantis, John and Giannadakis, A. and Malefaki, Sonia and Souliotis, Manolis and Antzoulitou, A. and Georgiou, Paraskevas and Nikolakopoulos, Pantelis and Mihalakakou, G. Simulation-Based and Machine Learning Methodologies for Energy Optimization in Buildings // *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*. 2026. Vol. 15. <https://doi.org/10.1002/wene.70021>
18. Вафаева, Х.М., Гаевская, З.А. Алгоритмы оптимизации и их применение в информационном моделировании объектов культурного наследия // *Инновации и инвестиции*. 2021. № 12. С. 175-179. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20715.92965>
19. Зарипов, А.А., Гузанов, Р.О., Нуриев, М.Г. и др. Разработка и тестирование системы автоматизированного обнаружения и управления инженерными устройствами на базе предиктивной аналитики // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2025. № 10(160). <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.72>
20. Darwish, Hiba and Khapper, Krupa and Graves, Corey and Gokaraju, Balakrishna and Tesiero, Raymond. Intelligent Energy Optimization in Buildings Using Deep Learning and Real-Time Monitoring // *Energies*. 2026. Vol. 19. <https://doi.org/10.3390/en19020379>
21. Самарин, О.Д. Расчет остывания помещений здания в аварийных режимах для обеспечения надежности их теплоснабжения // *Вестник МГСУ*. 2019. Т. 14. Вып. 4. С. 496-501. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2019.4.496-501>
22. Рафальская Т.А. Влияние влагонакоплений в наружных стенах на тепловой режим помещений при аварийном теплоснабжении // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2021. Т.48. № 2. С.113-123 DOI.org/10.21822/2073-6185-2021-48-2-113-123
23. Maracchini, Gianluca and D'orazio, Marco. Indoor Environment in Emergency Architectures. *SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology*. 2025. https://doi.org/10.1007/978-3-032-06795-1_3
24. Zhang, Jiarui and Mu, Yunfei and Wu, Zeqing and Liu, Zhe and Gao, Yi and Li, Hairun. Optimal scheduling method of regenerative electric heating for emergency residential building heating: An affine arithmetic-based model predictive control approach. *IET Energy Systems Integration*. 2022. Vol. 5. <https://doi.org/10.1049/esi2.12082>
25. Balasanian, Hennadii and Klymchuk, Oleksandr and Luzhanska, Ganna and Aksyonova, Inna and Voronenko, Serhii. Influence of the Building's Thermal Insulation on Intermittent Heating Mode Efficiency // *Management Systems in Production Engineering*. 2024;32:484-488. DOI.org/10.2478/mspe-2024-0045
26. Deshko, Valeriy and Bilous, Inna and Buyak, Nadia and Hetmanchuk, Hanna and Hurieiev, Maksym and Odineca, Tatjana. Parametric Analysis of Heat Flows Through Building Envelope Considering Orientation, Massiveness, and Intermittent Heating Modes // *Rocznik Ochrona Środowiska*. 2025. Vol. 27. P. 110-120. <https://doi.org/10.54740/ros.2025.010>
27. Streckiene, Giedre and Bielskus, Juozas and Rogoža, Artur and Lapinskiene, Vilune and Miseviciute, Violeta. Evaluating the integration of apartment building heating systems with low-temperature district heating networks // *Mokslas - Lietuvos ateitis*. 2025. Vol. 17. P. 1-8. <https://doi.org/10.3846/mla.2025.23939>
28. Taradai, O and Bugai, Volodymyr and Gvozdetskii, O and Burda, Y and Diachenko, S. Improving the operational reliability of centralized heat supply systems // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2025. Vol. 1499. P. 012054. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1499/1/012054>
29. Карпов, Д.Ф., Павлов, М.В., Силицын, А.А. Комплексная энергосберегающая диагностика технического состояния ограждающих конструкций объектов капитального строительства и инженерных систем на основе теплового контроля // *Энергосбережение и водоподготовка*. 2020. № 2 (124). С. 29-33
30. Фролова, А.А., Нуриев, М.Г., Шкиндеров, М.С. и др. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025619659. Программа для определения температуры внутреннего воздуха в помещении после отключения системы отопления: № 2025617254: заявл. 28.03.2025: опубл. 16.04.2025. Бюл. №4 // *Правообладатель Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28674.80326>

References:

1. Malyavina, E.G., Suslova, V.V. The effect of the enclosing structures heat capacity of the room on its temperature after the heating is turned off // *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2025; 2:76-84. <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2025-794-2-76-84>. (In Russ)
2. Karpov, D.F., Pavlov, M.V., Abramova, E.V., Vafaeva, Kh.M. 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.org/10.21822/2073-6185-2024-51-2-197-207. (In Russ)

3. Shumilin, E.V., Ilyin, N.V. Consequences of disconnecting the heating system of a separate apartment in an apartment building. Far East: Problems of Architectural and Construction Complex Development. 2023; 1: 331-334. (In Russ)
4. Pavlov, M.V., Karpov, D.F., Khraponova, L.V. Air temperature prediction in a cultivation facility after heating system shutdown. Prirodobustroystvo. 2025;3:30-37. DOI.org/10.26897/1997-6011-2025-3-30-37. (In Russ)
5. Malyavina, E.G., Akhverdshvili, 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;10:83-96 <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2023-778-10-83-96>. (In Russ)
6. Razakov, M.A. Engine room thermal density specials in heating systems shutdown process. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24.(6):133-142. DOI.org/10.30724/1998-9903-2022-24-6-133-142. (In Russ)
7. Borovkov, A.I., Vafaeva, Kh.M., Vatin, N.I., Ponyaeva, I. Synergistic Integration of Digital Twins and Neural Networks for Advancing Optimization in the Construction Industry: A Comprehensive Review. *Construction Materials and Products.* 2024;7(4). <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-4-7>
8. Feng, Yuxin and Hwang, Bon-Gang. Toward a Sustainable Paradigm: Navigating Digital Transformation in the Construction Industry. *Sustainable Development.* 2025;33. DOI.org/9335-9351. 10.1002/sd.70162
9. Lima, Maria and Cunha, Thaís and Cândido, Luis and de Paula Barros Neto, José. Digital Transformation in the Construction Industry: Lessons and Challenges from the Journey of Brazilian Construction Companies. *Sustainability.* 2025; 18:407. <https://doi.org/10.3390/su18010407>
10. Soltani, Sahar and Giusti Gestri, Lisa and Pavez, Fernando and Maxwell, Duncan. A multi-staged analysis to propose a construction hub framework to drive sustainable and digital transformation in the construction industry. *Smart and Sustainable Built Environment.* 2025; 1. <https://doi.org/10.1108/SASBE-11-2024-0458>
11. Strizhak, P.A., Morozov, M.N. Thermal regime of a building under emergency operation of the heat supply system. *Chief Power Engineer.* 2014;7:39-45. (In Russ)
12. Chen, Lu and Han, Zhipan and Wu, Yujie and Zhang, Zhongshan and Liu, Yu and Li, Xiaomeng and Cao, Hui and Chen, Yongxu and Yang, Kun. Research on Energy-Efficient Retrofit Design and Thermal Load Characteristics of Public Buildings Based on Optimal Thermal Comfort. *Buildings.* 2025;15:4066. <https://doi.org/10.3390/buildings15224066>
13. Bianco, Nicola and Fragnito, Andrea and Mauro, Gerardo and Menna, Costantino and Roselli, Carlo. Thermal analysis of 3D-printed panels for enhanced building envelope performance // *Journal of Physics: Conference Series.* 2025; 3143:012048. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/3143/1/012048>
14. Ponni, M and Hemalatha, A and Baskar, S and Kuchana, Rakesh. AI-Based Optimization Of HVAC Systems For Smart Energy-Efficient Buildings. *International Journal of Environmental Sciences.* 2025; 11: 950. <https://doi.org/10.64252/cgw1g472>
15. Piras, Giuseppe and Muzi, Francesco and Ziran, Zahra. A Data-Driven Model for the Energy and Economic Assessment of Building Renovations. *Applied Sciences.* 2025;15:8117. <https://doi.org/10.3390/app15148117>
16. Ali, Dalia and Motuzienė, Violeta. Applying AI to HVAC Systems: a Critical Analysis of Data-Related Challenges // *CONNECT. International Scientific Conference of Environmental and Climate Technologies.* 2025;18. <https://doi.org/10.7250/CONNECT.2025.002>
17. Romaios, A. and Paravantis, John and Giannadakis, A. and Malefaki, Sonia and Souliotis, Manolis and Antzoulidou, A. and Georgiou, Paraskevas and Nikolakopoulos, Pantelis and Mihalakakou, G. Simulation-Based and Machine Learning Methodologies for Energy Optimization in Buildings. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment.* 2026; 15. <https://doi.org/10.1002/wene.70021>
18. Vafaeva, Kh.M., Gaevskaya, Z.A. Optimization algorithms and their application in information modeling of cultural heritage objects. *Innovation and Investment.* 2021;12:175-179. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20715.92965>. (In Russ)
19. Zaripov, A.A., Guzanov, R.O., Nuriev, M.G. et al. Development and testing of an automated detection and control system for engineering devices based on predictive analytics. *International Research Journal.* 2025; 10(160). <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.72>. (In Russ)
20. Darwish, Hiba and Khapper, Krupa and Graves, Corey and Gokaraju, Balakrishna and Tesiero, Raymond. Intelligent Energy Optimization in Buildings Using Deep Learning and Real-Time Monitoring. *Energies.* 2026; 19. <https://doi.org/10.3390/en19020379>
21. Samarin, O.D. The calculation of building cooling under emergency conditions to ensure their heating reliability. *Vestnik MGSU.* 2019;14(4):496-501. DOI.org/10.22227/1997-0935.2019.4.496-501. (In Russ)
22. Rafalskaya, T.A. Effects of moisture accumulation in outer walls on thermal mode of premises in case of emergency heat supply. *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences.* 2021;48(2): 113-123. <https://doi.org/10.22227/10.21822/2073-6185-2021-48-2-113-123>. (In Russ)
23. Maracchini, Gianluca and D'orazio, Marco. Indoor Environment in Emergency Architectures // *SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology.* 2025. https://doi.org/10.1007/978-3-032-06795-1_3

24. Zhang, Jiarui and Mu, Yunfei and Wu, Zeqing and Liu, Zhe and Gao, Yi and Li, Hairun. Optimal scheduling method of regenerative electric heating for emergency residential building heating: An affine arithmetic-based model predictive control approach. *IET Energy Systems Integration*. 2022;5. <https://doi.org/10.1049/esi2.12082>
25. Balasanian, Hennadii and Klymchuk, Oleksandr and Luzhanska, Ganna and Aksyonova, Inna and Voronenko, Serhii. Influence of the Building's Thermal Insulation on Intermittent Heating Mode Efficiency. *Management Systems in Production Engineering*. 2024;32:484-488. <https://doi.org/10.2478/mspe-2024-0045>
26. Deshko, Valeriy and Bilous, Inna and Buyak, Nadia and Hetmanchuk, Hanna and Hurieiev, Maksym and Odineca, Tatjana. Parametric Analysis of Heat Flows Through Building Envelope Considering Orientation, Massiveness, and Intermittent Heating Modes. *Rocznik Ochrona Środowiska*. 2025;27:110-120. <https://doi.org/10.54740/ros.2025.010>
27. Streckiene, Giedre and Bielskus, Juozas and Rogoža, Artur and Lapinskiene, Vilune and Miseviciute, Violeta. Evaluating the integration of apartment building heating systems with low-temperature district heating networks. *Mokslas - Lietuvos ateitis*. 2025; 17:1-8. <https://doi.org/10.3846/mla.2025.23939>
28. Taradai, O and Bugai, Volodymyr and Gvozdetskii, O and Burda, Y and Diachenko, S. Improving the operational reliability of centralized heat supply systems. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2025. 1499: 012054. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1499/1/012054>
29. Karpov, D.F., Pavlov, M.V., Sinitsyn, A.A. Integrated energy-saving diagnostics of the technical condition of fencing structures of capital construction objects and engineering systems based on thermal control. *Energy saving and Water treatment*. 2020; 2 (124):29-33. (In Russ)
30. Frolova, A.A., Nuriev, M.G., Shkinderov, M.S. et al. Certificate of State Registration of a Computer Program No. 2025619659. Software for determining the indoor air temperature in a room after the heating system shutdown: No. 2025617254: declared 28.03.2025: publ. 16.04.2025;4. *Right holder of National Research Moscow State University of Civil Engineering*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28674.80326>. (In Russ)

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

Вафаева Христина Максудовна, кандидат технических наук, научный сотрудник; vafaeva.khm@gmail.com; ORCID 0000-0002-7422-5494

Фролова Анастасия Анатольевна, кандидат технических наук, доцент, доцент, кафедра теплогазоснабжения и вентиляции; FrolovaAA@mgsu.ru; ORCID 0000-0002-7802-8981

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

Khristina M. Vafaeva, Cand. Sci. (Eng.), Scientific Associate; vafaeva.khm@gmail.com; ORCID 0000-0002-7422-5494

Anastasiya A. Frolova, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Ventilation and Heat and Gas Supply; FrolovaAA@mgsu.ru; ORCID 0000-0002-7802-8981

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 21.12.2025.

Одобрена после рецензирования/Revised 31.01.2026.

Принята в печать/Accepted for publication 15.04.2026.