

Оригинальная статья

УДК 631.544:628.9: 697.11

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-55-63>

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВНУТРЕННЕГО ВОЗДУХА В КУЛЬТИВАЦИОННОМ СООРУЖЕНИИ ПОСЛЕ АВАРИЙНОГО ОТКЛЮЧЕНИЯ СИСТЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ

М.В. Павлов¹, Д.Ф. Карпов²✉

^{1,2} Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вологодский государственный университет»; г. Вологда, Российская Федерация

¹ pavlovmv@vogu35.ru; ORCID: 0000-0002-8687-3296

² karpovdf@vogu35.ru; ORCID: 0000-0002-3522-9302

Аннотация. Круглогодичная эксплуатация культивационных сооружений защищенного грунта требует обеспечения надежного функционирования систем искусственного обогрева воздушной среды и почвы в холодный период года. Цель исследований – разработка методики прогнозирования температуры внутреннего воздуха и оценки динамики ее изменения в культивационном сооружении при аварийном отключении системы отопления. Методика основана на положениях теории теплоустойчивости ограждающих конструкций и теории регулярного теплового режима. Предложенный подход позволяет определять температуру внутреннего воздуха (в размерной и безразмерной формах), темп ее падения, а также количество теплоты, аккумулированной в объеме сооружения к моменту отключения отопления. Апробация методики выполнена для промышленной теплицы в городе Вологде. Расчеты показали, что при принятых климатических условиях температура внутреннего воздуха снижается до критического значения 8°C через 8 ч 8 мин после отключения отопления и достигает 0°C через 14 ч 10 мин. Установлено, что определяющим фактором сохранения допустимого теплового режима является теплоаккумулирующая способность почвы, существенно зависящая от ее влажности. С учетом низкой теплозащитной способности ограждений культивационных сооружений и климатических условий холодного периода года к системам отопления теплиц должны предъявляться повышенные требования надежности.

Ключевые слова: культивационное сооружение, температурный режим теплицы, теплоаккумулирующая способность почвы, аварийное отключение системы отопления, коэффициент аккумуляции теплоты, показатель темпа охлаждения

Формат цитирования: Павлов М.В., Карпов Д.Ф. Методика определения температуры внутреннего воздуха в культивационном сооружении после аварийного отключения системы отопления. Природообустройство. 2026;Т.19(4):55-63. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-55-63>

Scientific article

METHODOLOGY FOR DETERMINING THE TEMPERATURE OF THE INDOOR AIR IN A CULTIVATION FACILITY AFTER AN EMERGENCY SHUTDOWN OF THE HEATING SYSTEM

M.V. Pavlov¹, D.F. Karpov²✉

^{1,2} Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Vologda State University; Vologda, Russian Federation

¹ pavlovmv@vogu35.ru; ORCID: 0000-0002-8687-3296

² karpovdf@vogu35.ru; ORCID: 0000-0002-3522-9302

Abstract. Year-round operation of protected-ground cultivation facilities requires ensuring the reliable functioning of systems for artificial heating of the air and soil during the cold season. The aim of the study is to develop a methodology for predicting the indoor air temperature and assessing the dynamics of its change in a cultivation facility in the event of an emergency shutdown of the heating system. The methodology is based on the principles of the theory of thermal stability of enclosing structures and the theory of regular thermal regime. The proposed approach makes it possible to determine the indoor air temperature (in dimensional and dimensionless forms), the rate at which it drops, and the amount of heat accumulated in the structure's volume by the time the heating is turned off. The methodology was tested for an industrial greenhouse in the city of Vologda. The calculations showed that, under the assumed climatic conditions, the indoor air temperature drops to the critical value of 8°C 8 hours and 8 minutes after the heating is turned off, and

reaches 0°C after 14 hours and 10 minutes. It has been established that the determining factor in maintaining the permissible thermal regime is the heat-accumulating capacity of the soil, which significantly depends on its moisture content. Given the low heat-protective capacity of the enclosures of cultivation structures and t

Keywords: cultivation structure, greenhouse temperature regime, soil heat-accumulating capacity, emergency shutdown of the heating system, heat accumulation coefficient, cooling rate cooling rate indicator

Citation format: Pavlov M.V., Karpov D.F. Methodology for determining the indoor air temperature in a cultivation structure after an emergency shutdown of the heating system. *Prirodoobustroystvo*. 2026;19(4):55-63. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-4-55-63>

Введение. С середины XX в. в СССР сформирована разветвленная система централизованного теплоснабжения, которая и в настоящее время остается основой теплоснабжения большинства населенных пунктов России. Несмотря на модернизационные мероприятия, уровень износа тепловых сетей остается высоким: в среднем он достигает 70%, ежегодно фиксируется около 70 повреждений на 100 км сетей, а более 80% трубопроводов требуют капитального ремонта или замены [1]. Темпы обновления (порядка 2÷2,5% в год) не обеспечивают значительного снижения совокупного износа тепловых сетей [2], что обуславливает риск аварийных отключений отопления в холодный период года.

Исследования изменения температуры внутреннего воздуха при аварийном прекращении теплоснабжения выполнены преимущественно для гражданских зданий [3]. За счет значительной теплоемкости ограждающих конструкций коэффициент аккумуляции теплоты β достигает 100÷600 ч, что обеспечивает существенный временной резерв для проведения восстановительных работ [4]. Вариант расчета β с учетом теплофизических характеристик разнородных ограждений предложен в работе [5]. Аналитические и численные подходы к прогнозированию изменения температуры помещений после прекращения теплоснабжения рассмотрены в работе [6]. Уточненная зависимость температуры внутреннего воздуха от времени с учетом изменения наружной температуры в процессе остывания предложена в работе [7].

Методика прогнозирования температуры внутреннего воздуха, апробированная на жилом здании, в котором определяющим фактором является теплоаккумулирующая способность наружных стен, подробно изложена в работе [8]. Методика для культивационных сооружений, основанная на решении нестационарного уравнения теплового баланса зимней теплицы, представлена в работе [9], в которой, однако, не учитывается влияние предварительно нагретой почвы на формирование теплового режима.

Существуют также различные модели прогнозирования микроклимата тепличных сооружений: математическая модель солнечных теплиц, валидированная экспериментально [10], нейросетевые алгоритмы для оценки температуры и влажности воздуха [11], а также CFD-моделирование тепловлажностных полей с учетом процессов испарения и вентиляции [12]. Наряду с этим в работе [13] предложен инженерный метод оптимизации системы отопления теплицы, основанный на моделировании процессов тепло- и массообмена и предназначенный для определения требуемой тепловой мощности газовых инфракрасных излучателей и параметров подогрева приточного воздуха с учетом условий микроклимата тепличного сооружения. Перечисленные в работах [10-13] подходы не учитывают влияние предварительно нагретой почвы на тепловой режим теплицы при внезапном прекращении теплоснабжения. Аварийные режимы отключения отопления также не рассматриваются в сравнительном анализе энергопотребления теплиц в разных климатических зонах [14].

Таким образом, анализ работ по теме исследований показывает, что существующие методы прогнозирования температурного режима помещений при аварийном отключении отопления ориентированы преимущественно на гражданские здания и лишь ограниченно учитывают особенности культивационных сооружений – такие, как низкая теплоемкость светопрозрачных ограждений, значительные тепловые потери через ограждающие конструкции и существенная роль почвы как аккумулятора теплоты. В частности, в использовании известных методов недостаточно полно отражено влияние теплоаккумулирующих свойств предварительно нагретой почвы на формирование теплового режима теплицы в переходный период после прекращения теплоснабжения. Это обуславливает необходимость разработки методики, позволяющей более достоверно прогнозировать изменение температуры внутреннего воздуха в культивационных сооружениях при аварийном отключении системы отопления с учетом, наряду с трансмиссионными

потерями, также инфильтрационной составляющей теплового баланса.

Цель исследований: разработка методики прогнозирования температуры внутреннего воздуха и оценки динамики ее изменения в культивационном сооружении при аварийном отключении системы отопления.

Материалы и методы исследований.

Методика прогнозирования температурного режима культивационного сооружения после аварийного отключения системы отопления разработана на основе аналитического описания нестационарных тепловых процессов в помещении. Исходной теоретической базой являются известные уравнения теории теплоустойчивости зданий и закономерности охлаждения элементов системы отопления, адаптированные к условиям культивационных сооружений с учетом теплоаккумулирующей способности почвы.

Математическое выражение для вычисления температуры внутреннего воздуха в помещении при аварийном прекращении работы системы отопления приведено в работе [15]:

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

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. Без учета внутренних тепловых избытков (от человека, от технологического оборудования и т.п.) величина Q_0 численно равна тепловой мощности системы отопления в пределах рассматриваемого помещения; q_0 – удельная тепловая (в некоторых источниках литературы – отопительная) характеристика помещения, Вт/($\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C}$); удельная тепловая характеристика помещения принимается с учетом тепловых потерь через ограждающие конструкции и воздухообмена; при отсутствии организованной вентиляции воздухообмен в расчетах учитывается в виде инфильтрации наружного воздуха через неплотности ограждающих конструкций. В рамках разработанной методики инфильтрационная составляющая тепловых потерь включена в величину удельной тепловой характеристики помещения q_0 как аддитивная добавка к трансмиссионным потерям через ограждения. Такой подход позволяет сохранить аналитическую форму решения, не вводя в уравнение (1) дополнительное слагаемое, и соответствует сложившейся практике теплотехнических расчетов зданий при аварийных режимах [15]. При наличии организованной вентиляции ее влияние учитывается при определении требуемой тепловой мощности системы отопления и соответствующего значения удельной тепловой характеристики помещения; V – объем отапливаемого помещения, м^3 ; $t_{\text{вн.в}}^{\text{н}}$ – температура внутреннего воздуха в момент аварийного отключения системы отопления (начальная температура внутреннего воздуха), $^\circ\text{C}$; τ – период аварийного отключения системы отопления, ч; β – коэффициент аккумуляции теплоты, ч.

Согласно теории теплоустойчивости при прерывистом режиме теплоснабжения коэффи-

циент аккумуляции теплоты β вычисляют по математическому выражению:

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

где c , ρ , F и δ – массовая теплоемкость соответственно, Дж/(кг·К), плотность, кг/м³, площадь поверхности, м², и толщина, м, ограждающей конструкции отапливаемого помещения.

При расчете наружной стены в математическом выражении (2) используется коэффициент « $\frac{1}{2}$ », учитывающий половину ограждающей конструкции. При этом коэффициент аккумуляции теплоты β , ч, вычисляют как произведение теплоемкости этой части стены на приведенное сопротивление теплопередаче наружных ограждений здания. Для культивационных сооружений представляет интерес рассмотрение в качестве ограждающей конструкции не наружной стены отапливаемого помещения, а слоя влажной почвы, предназначенной для выращивания растений, с предварительно заданными геометрическими, физическими и теплотехническими параметрами. Если толщина наружной стены культивационного сооружения $\delta_{\text{нс}} \rightarrow 0$ (например, толщина сотового поликарбоната для зимних теплиц составляет в среднем 8÷10 мм), то $\beta_{\text{нс}} \approx 0$. Коэффициент аккумуляции теплоты β , ч, для всех типов зданий является постоянной величиной и определяется не только расчетным способом по математическому выражению (2), но и экспериментальным путем с помощью кратковременного искусственного нарушения теплового режима в обследуемом здании.

В предлагаемой методике слой почвы рассматривается как теплоаккумулирующая масса с заданными геометрическими и теплофизическими параметрами. Толщина расчетного слоя почвы принимается исходя из условий предварительного теплового режима культивационного сооружения и продолжительности рассматриваемого периода после аварийного отключения отопления. Влияние распространения температурного возмущения по глубине почвы в явном виде в рамках методики не рассматривается, а учитывается интегрально через коэффициент аккумуляции теплоты, определяемый по математическому выражению (2). При необходимости исследования начального переходного периода с учетом изменения температуры по глубине грунта требуется решение нестационарной задачи теплопроводности.

После аварийного отключения отопления тепловой поток Q_0 в (1) снижается до нуля, а процесс охлаждения помещения с условно постоянной температурой $t_{\text{вн.в}}$ в рамках регулярного

теплового режима первого рода описывается математическим выражением:

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

где Q_o^h – начальная тепловая мощность системы отопления помещения (до аварийного отключения), Вт; m – показатель темпа охлаждения системы отопления, $1/\text{ч}$.

Использование закономерностей регулярно теплового режима первого рода, характеризующихся экспоненциальным характером изменения тепловых параметров, обусловлено инженерным характером предлагаемой методики и необходимостью получения компактного аналитического описания процесса охлаждения культивационного сооружения после аварийного отключения системы отопления. Данный подход не является единственным возможным и не обеспечивает максимальной точности на начальном этапе переходного процесса, когда распределение температуры в ограждающих конструкциях и предварительно нагретой почве является существенно неравномерным.

Альтернативные подходы, основанные на численном решении нестационарных задач теплопроводности, конечно-разностных схемах или CFD-моделировании, позволяют более детально учитывать пространственное распределение температуры в ограждающих конструкциях, почве и воздушном объеме сооружения, однако требуют большего объема исходных данных и вычислительных ресурсов [16]. Предлагаемая методика предназначена для инженерной оценки изменения температуры внутреннего воздуха и определения временного резерва после аварийного отключения отопления и не предназначена для детального исследования пространственного распределения температуры в ограждающих конструкциях и почве.

Границы применимости экспоненциального подхода ограничены периодом регулярного теплового режима, наступающим после затухания начальных неоднородностей температурного поля. Для исследования начального переходного периода и получения более детальной картины формирования температурного режима необходимо применение детализированных нестационарных моделей теплопроводности, в том числе численных методов.

Допуская равномерное распределение температуры в рассматриваемом теле, параметр m в (3) вычисляют по математическому выражению:

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

где α_k – средний коэффициент конвективного теплообмена (теплоотдачи), Вт / ($\text{м}^2 \cdot \text{К}$); F_o – суммарная площадь поверхности нагрева системы отопления, открыто проложенной в пределах помещения, м^2 ; C_m и $C_{ж}$ – соответственно теплоемкости системы отопления (без учета теплоносителя) и теплоносителя в пределах помещения, Дж/К.

Используя уравнение для расчета тепловой нагрузки на отопление зданий, применяемое при проектировании систем централизованного теплоснабжения, преобразуем (1) с учетом (3):

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

Математическое выражение (5) в безразмерной форме принимает вид:

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

Темп падения температуры внутреннего воздуха после аварийного отключения системы отопления в соответствии с (5) вычисляют по математическому выражению:

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

Количество тепловой энергии, воспринятое помещением в течение расчетного интервала времени τ , ч, после аварийного прекращения работы системы отопления вычисляют по математическому выражению:

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

Полученные математические выражения позволяют вычислять температуру внутреннего воздуха, темп ее падения, а также количество тепловой энергии, воспринимаемое помещением после аварийного отключения системы отопления. Сформированная система математических выражений (5)-(8) создает основу для предлагаемой методики прогнозирования температурного режима культивационного сооружения в переходный период после прекращения теплоснабжения.

Результаты и их обсуждение. Представлены результаты численного моделирования изменения температуры внутреннего воздуха в промышленной теплице круглогодичной эксплуатации города Вологды после аварийного отключения системы отопления с учетом тепловой аккумуляции почвы и характеристик ограждающих конструкций.

Решение системы математических выражений (5)-(8) позволяет оценить динамику падения температуры, темп охлаждения и количество аккумулированной тепловой энергии в объеме помещения, что обеспечивает количественную

интерпретацию формирования теплового режима теплицы.

Исходные данные для расчета:

1. Параметры помещения. Линейные размеры (габариты) теплицы: ширина $a = 7,45$ м; длина $b = 8,4$ м; высота в верхней точке $h = 3,8$ м. Объем помещения $V \approx 183,108$ м³.

2. Параметры почвы. Материал почвы – влажный торф (в основе). Толщина слоя почвы $\delta = 0,35$ м. Суммарная площадь поверхности почвы с учетом общего количества грядок и проходов между ними $F = 46,20$ м². Плотность и массовая теплоемкость влажного торфа равны: $\rho = 800$ кг/м³ и $c = 2750$ Дж/(кг·К) соответственно. Коэффициент аккумуляции теплоты по расчету $\beta = 27,084$ ч. В расчетах рассматривается предварительно нагретый слой почвы толщиной $\delta = 0,35$ м, для которого перед аварийным отключением принят установившийся тепловой режим. Расчетный коэффициент аккумуляции теплоты вычисляется по математическому выражению (2) на основе заданной толщины и теплофизических характеристик почвы. Распределение температуры по глубине почвы в рамках предлагаемой методики не рассматривается отдельно и учитывается интегрально через коэффициент аккумуляции теплоты.

3. Параметры ограждения. Ограждение теплицы толщиной $\delta_{\text{нс}} = 10$ мм выполнено из сотового поликарбоната. Суммарная площадь ограждений $F_{\text{огр}} \approx 140,29$ м². Сопротивление теплопередаче сотового поликарбоната $R_{\text{огр}} = 0,51$ м²·К/Вт. Добавочные тепловые потери на нагрев инфильтрующегося воздуха $\beta_{\text{инф}} = 0,2$. В рассматриваемом аварийном режиме организованный воздухообмен не учитывается, поскольку его работа прекращается одновременно с отключением системы отопления; остаточный воздухообмен учитывается в составе инфильтрационных тепловых потерь и включен в расчетное значение удельной тепловой характеристики q_0 в виде дополнительной составляющей к трансмиссионным потерям через ограждения. Таким образом, воздухообмен присутствует в расчете опосредованно, через q_0 , что соответствует принятому инженерному уровню детализации методики.

4. Параметры внутреннего воздуха. Начальная температура внутреннего воздуха согласно РД-АПК 1.10.09.01-14 «Методические рекомендации по технологическому проектированию теплиц и тепличных комбинатов для выращивания овощей и рассады» принята равной $t_{\text{вн.в}}^{\text{н}} = 22^\circ\text{C}$ (для огурцов в зимне-весенний оборот, до плодоношения).

5. Параметры наружного воздуха. Согласно требованиям СП 131.13330.2025 «Строительная климатология» для условий города Вологды в расчетах принята неизменная в течение всего периода аварийного отключения отопления температура наружного воздуха $t_{\text{н.в}} = -32^\circ\text{C}$.

6. Параметры системы отопления. Система отопления представляет собой стальные трубопроводы воздушного обогрева $d_{\text{н}} \times \delta = 51 \times 2,5$ мм. Общая протяженность трубопроводов в теплице $l_0 = 120$ м. Суммарная площадь поверхности нагрева составляет $F_0 = 19,20$ м. Объем теплоносителя (воды) в системе отопления помещения $V_{\text{ж}} \approx 0,199$ м³. Масса системы отопления помещения без учета теплоносителя $m_{\text{м}} \approx 358,8$ кг. Массовая теплоемкость металла (стали) $c_{\text{м}} = 500$ Дж/(кг·К). Плотность и массовая теплоемкость теплоносителя (воды) равны: $\rho_{\text{ж}} = 1000$ кг/м³ и $c_{\text{ж}} = 4190$ Дж/(кг·К) соответственно. Средняя температура поверхности системы отопления помещения при расчетных условиях принята равной $t_{\text{нов}} = 82,5^\circ\text{C}$. Средний коэффициент конвективного теплообмена (теплоотдачи) по расчету составил $\alpha_{\text{к}} \approx 17,0$ Вт/(м²·К). Тепловая мощность системы отопления теплицы до аварийного отключения $Q_0^{\text{н}} = 19700$ Вт. Удельная тепловая (отопительная) характеристика помещения $q_0 = 1,993$ Вт/(м³·°C). Показатель темпа охлаждения системы водяного отопления по расчету составил: $m \approx 1,1551/\text{ч}$.

На рисунке 1 представлены зависимости изменения температуры внутреннего воздуха $t_{\text{вн.в}}^{\text{к}}$, °C, и соответствующей безразмерной температуры Θ во времени после аварийного отключения системы отопления.

После аварийного отключения системы отопления температура внутреннего воздуха в теплице снижается до критического значения $t_{\text{кр}} = 8^\circ\text{C}$ ($\Theta_{\text{кр}} \approx 0,741$) через $\tau_{\text{кр}} \approx 8$ ч 8 мин, что соответствует предельно допустимой продолжительности охлаждения огурцов (не более 6 ч), а затем к моменту $\tau_0 \approx 14$ ч 10 мин достигает нулевого уровня $t_0 = 0^\circ\text{C}$ ($\Theta_0 = 0,593$). При снижении температуры внутреннего воздуха до $t_{\text{вн.в}} = 15^\circ\text{C}$ наблюдается угнетение роста растений.

На рисунке 2 представлены зависимости изменения темпа падения температуры Δ_t , °C/ч, и количества тепловой энергии ΔQ_0 , МДж, полученной помещением за период аварийного отключения системы отопления.

При $\tau = 14$ ч темп падения температуры внутреннего воздуха и количество тепловой энергии, полученной помещением теплицы после аварийного отключения отопления, составляют,

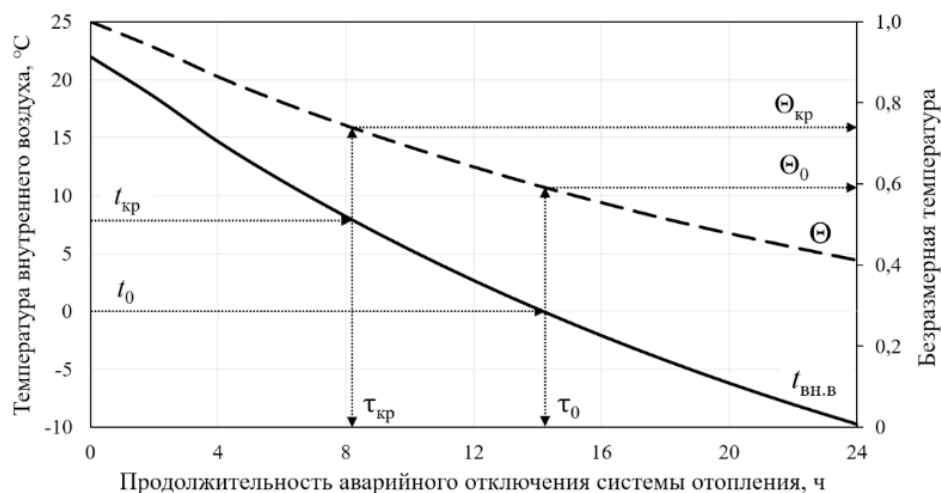


Рис. 1. Температура внутреннего воздуха в помещении:

сплошная линия – температура внутреннего воздуха; пунктирная линия – безразмерная температура

Fig. 1. Indoor air temperature in the facility:

solid line – indoor air temperature; dashed line – dimensionless temperature

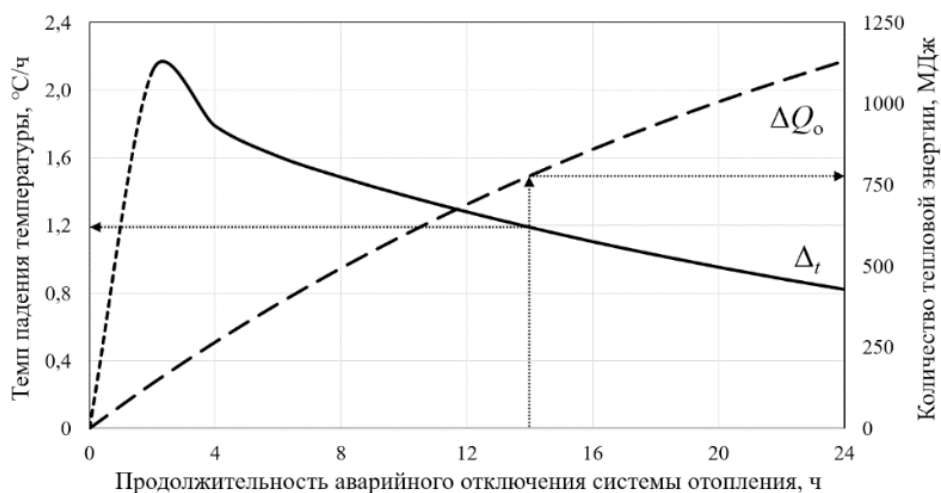


Рис. 2. Темп падения температуры (сплошная линия) и количество тепловой энергии (пунктирная линия с более длинными штрихами и большим расстоянием между ними)

Fig. 2. Temperature decreases rate (solid line) and heat energy amount (dashed line with longer dashes and wider spacing)

соответственно, $\Delta t = 1,189^\circ\text{C}/\text{ч}$ и $\Delta Q_0 = 777,3$ МДж. В начальный период охлаждения ($\tau \in [0; 2]$ ч) зависимость $\Delta t = \Delta t(\tau)$ носит выраженный нестационарный характер: от нулевого значения она резко возрастает до максимума (обозначено пунктирной линией с более короткими штрихами и меньшим расстоянием между ними

на рисунке 2). При $\tau_{\text{макс}} \approx 1$ ч 33 мин зафиксирован максимальный темп падения температуры $\Delta t_{\text{макс}} = 2,148^\circ\text{C}/\text{ч}$. Средняя величина темпа падения температуры $\Delta t_{\text{ср}} \approx 1,302^\circ\text{C}/\text{ч}$.

Таблица содержит расчетные значения $\tau_{\text{кр}}$, ч, при $t_{\text{кр}} = 8^\circ\text{C}$ и τ_0 , ч, при $t_0 = 0^\circ\text{C}$ для различных температур наружного воздуха $t_{\text{н.в.}}, ^\circ\text{C}$.

Таблица. Продолжительность аварийного отключения системы отопления

Table. Duration of heating system shutdown

$t_{\text{н.в.}}, ^\circ\text{C} / t_{\text{out}}, ^\circ\text{C}$	-5	-10	-15	-20	-25	-30
$\tau_{\text{кр}}/\tau_{\text{cr}}$	19 ч 48 мин 19 h 48 min	15 ч 35 мин 15 h 35 min	12 ч 53 мин 12 h 53 min	10 ч 59 мин 10 h 59 min	9 ч 35 мин 9 h 35 min	8 ч 30 мин 8 h 30 min
τ_0/τ_0	45 ч 41 мин 45 h 41 min	31 ч 30 мин 31 h 30 min	24 ч 27 мин 24 h 27 min	20 ч 6 мин 20 h 6 min	17 ч 6 мин 17 h 6 min	14 ч 54 мин 14 h 54 min

Изменение температуры наружного воздуха $t_{н.в.}$, °C, приводит к изменению требуемой тепловой мощности системы отопления теплицы Q_o^n , Вт, поддерживающей температуру внутреннего воздуха $t_{вн.в.}$, °C, что отражается на значении показателя темпа охлаждения m , 1/ч, уменьшающегося с ростом $t_{н.в.}$. При этом коэффициент аккумуляции теплоты β , ч, определяется теплофизическими параметрами почвы и геометрическими характеристиками сооружения и остается практически неизменным.

Результаты расчетов показали, что решающее значение в сохранении теплового режима после аварийного отключения системы отопления имеет теплоаккумулирующая способность почвы. Высокая плотность и значительная массовая теплоемкость предварительно прогретого влажного грунта обуславливают замедленное снижение температуры внутреннего воздуха даже при малом термическом сопротивлении ограждений теплицы и интенсивном остывании системы отопления.

Для оценки влияния теплофизических свойств почвы выполнен дополнительный расчет для слоя сухого торфа. При уменьшении плотности и массовой теплоемкости почвы снижается коэффициент аккумуляции теплоты, что приводит к ускоренному падению температуры внутреннего воздуха после аварийного отключения отопления. Для теплицы с сухим торфом критическое значение температуры 8°C достигается через 2 ч 3 мин, а температура 0°C – через 3 ч 16 мин после отключения отопления. Полученный результат подтверждает определяющее влияние теплоаккумулирующей способности предварительно нагретой почвы на продолжительность сохранения требуемого теплового режима культивационного сооружения.

Выводы

Разработанная методика прогнозирования температуры внутреннего воздуха в культивационном сооружении (на примере промышленной теплицы) при аварийном отключении отопления позволяет количественно оценивать динамику снижения температуры с учетом теплоаккумулирующей способности почвы и выполнять обоснованный прогноз теплового режима сооружения.

На основе численного моделирования установлены закономерности формирования

температурного режима и сформулированы следующие выводы:

1. Предложенный подход учитывает теплоаккумулирующие свойства предварительно нагретой почвы и количество теплоты, переданной во внутренний объем теплицы нагревательными элементами до момента отключения системы отопления.

2. Для принятых климатических условий температура внутреннего воздуха достигает 8°C через 8 ч 8 мин и 0°C через 14 ч 10 мин после аварийного отключения отопления; средний темп падения температуры за 24 ч составляет 1,302°C/ч, а суммарное количество аккумулярованной и переданной теплоты – около 1131 МДж.

3. При прогнозировании температурного режима теплицы существенное значение имеет теплоаккумулирующая способность предварительно нагретой почвы, что обусловлено малой толщиной и низким термическим сопротивлением ограждений. Для принятой системы отопления учет охлаждения нагревательных элементов позволяет уточнить начальный период формирования температурного режима после аварийного отключения теплоснабжения.

4. Предлагаемая методика предназначена для инженерной оценки изменения температуры внутреннего воздуха в культивационном сооружении при аварийном отключении отопления и учитывает теплоаккумулирующую способность предварительно нагретого слоя почвы, заданного исходными геометрическими и теплофизическими параметрами. Инфильтрационная составляющая тепловых потерь в рамках разработанной методики учитывается опосредованно – через удельную тепловую характеристику помещения, что соответствует принятому уровню инженерного приближения. При необходимости более детального исследования начального переходного периода и распределения температуры по глубине грунта целесообразным является применение нестационарной модели теплопроводности. Более детальный учет воздухообмена, включая организованную вентиляцию, требует введения в уравнение теплового баланса отдельного слагаемого и может рассматриваться как направление дальнейшего развития методики.

Список использованных источников

1. Рыбкина Г.В., Яблокова А.А. Современное состояние теплоснабжения и его развитие // Промышленные процессы и технологии. 2022. Т. 2, № 2. С. 89-99. DOI: 10.37816/2713-0789-2022-2-2(4)-89-99 EDN: IXLWON

References

1. Rybkina G.V., Yablokova A.A. The current state of heat supply and its development // Industrial Processes and Technologies. 2022. Vol. 2. No. 2. P. 89-99. DOI: 10.37816/2713-0789-2022-2-2(4)-89-99. EDN: IXLWON

2. Семикашев В.В. Теплоснабжение в России: текущая ситуация и проблемы инвестиционного развития // ЭКО. 2019. № 9 (543). С. 23-47. DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2019-9-23-47 EDN: ATVUQK
3. Карпов Д.Ф., Павлов М.В., Вафаева Х.М., Фролова А.А. Разработка и верификация программно-вычислительного метода моделирования температурного режима помещения при аварийных отключениях отопления // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2026. Т. 53, № 2. С. 192-201. DOI: 10.21822/2073-6185-2026-53-2-192-201
4. Малиявина 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. DOI: 10.32683/0536-1052-2025-794-2-76-84 EDN: TNVTST
5. Малиявина 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. DOI: 10.32683/0536-1052-2023-778-10-83-96 EDN: JDEDCQ
6. Самарин О.Д. Сравнение различных методов расчета остывания помещений при прекращении теплоснабжения // Жилищное строительство. 2023. № 1-2. С. 41-44. DOI: 10.31659/0044-4472-2023-1-2-41-44 EDN: VLFPKT
7. Самарин О.Д. Расчет остывания помещений здания в аварийных режимах при переменной температуре наружного воздуха // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19, № 1. С. 77-83. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.1.77-83 EDN: QLMJUT
8. Павлов М.В., Карпов Д.Ф., 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. DOI: 10.21822/2073-6185-2024-51-2-197-207
9. 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. DOI: 10.26897/1997-6011-2025-3-30-37 EDN: ALRBZM
10. Liu R., Li M., Guzmán J.L., Rodríguez F. A fast and practical one-dimensional transient model for greenhouse temperature and humidity // Computers and Electronics in Agriculture. 2021. Vol. 186. P. 106186. DOI: 10.1016/j.compag.2021.106186
11. Yan C., Ta N., Zhen Q., Sun Yu., Liu K., Li X. Prediction of air temperature and relative humidity in greenhouse based on neural network model // Research Square. September 30, 2024. DOI: 10.21203/rs.3.rs-4958200/v1
12. Lekouch K., El Jazouli M., Bouirden L. Study of temperature fields inside a Canarian greenhouse // WSEAS Transactions on Fluid Mechanics. 2022. Vol. 7. Pp. 79-88. DOI: 10.37394/232013.2022.17.8
13. Vafaeva Kh.M., Pavlov M.V., Karpov D.F., Ismailov A.M., Romanovski V. Optimizing heating systems for greenhouses using gas radiators // Journal of Engineering. 2025. Vol. 2025. Pp. 9586181. DOI: 10.1155/je/9586181
14. Küçükerdem K., Gulbe A. Comparison of energy requirement for heating and cooling of greenhouses in Adana and Iğdir provinces // Journal of the Institute of Science and Technology. 2026. Vol. 16 (1). Pp. 141-156. DOI: 10.21597/jist.1792012
15. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. М.: МЭИ, 2001. 472 с.
16. Самарин О.Д. Применение численных методов для уточнения скорости начального разогрева или охлаждения помещения // Жилищное строительство. 2026. № 5. С. 10-14. DOI: 10.31659/0044-4472-2026-5-10-14
2. Semikashev V.V. Heat supply in Russia: current state and problems of investment development // ECO. 2019. No. 9 (543). P. 23-47. DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2019-9-23-47. EDN: ATVUQK
3. Karpov D.F., Pavlov M.V., Vafaeva Kh.M., Frolova A.A. 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. Vol. 53. No. 2. P. 192-201. DOI: 10.21822/2073-6185-2026-53-2-192-201.
4. 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. No. 2 (794). P. 76-84. DOI: 10.32683/0536-1052-2025-794-2-76-84. EDN: TNVTST
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. No. 10 (778). P. 83-96. DOI: 10.32683/0536-1052-2023-778-10-83-96. EDN: JDEDCQ
6. Samarin O.D. Comparison of various methods for calculating the cooling of premises at the termination of heat supply / O.D. Samarin // Zhilishchnoe Stroitel'stvo [Housing Construction]. 2023. No. 1-2. P. 41-44. DOI: 10.31659/0044-4472-2023-1-2-41-44. EDN: VLFPKT
7. Samarin O.D. Calculation of cooling of building premises in emergency modes at variable outdoor temperature / O.D. Samarin // Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024. Vol. 19. No. 1. P. 77-83. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.1.77-83. EDN: QLMJUT
8. 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. Vol. 51. No. 2. P. 197-207. DOI: 10.21822/2073-6185-2024-51-2-197-207.
9. Pavlov M.V., Karpov D.F., Khraponova L.V. Air temperature prediction in a cultivation facility after heating system shutdown // Environmental Engineering. 2025. No. 3. P. 30-37. DOI: 10.26897/1997-6011-2025-3-30-37. EDN: ALRBZM
10. Liu R., Li M., Guzmán J.L., Rodríguez F. A fast and practical one-dimensional transient model for greenhouse temperature and humidity // Computers and Electronics in Agriculture. 2021. Vol. 186. P. 106186. DOI: 10.1016/j.compag.2021.106186.
11. Yan C., Ta N., Zhen Q., Sun Yu., Liu K., Li X. Prediction of air temperature and relative humidity in greenhouse based on neural network model // Research Square. September 30, 2024. DOI: 10.21203/rs.3.rs-4958200/v1.
12. Lekouch K., El Jazouli M., Bouirden L. Study of temperature fields inside a Canarian greenhouse // WSEAS Transactions on Fluid Mechanics. 2022. Vol. 7. P. 79-88. DOI: 10.37394/232013.2022.17.8.
13. Vafaeva Kh.M., Pavlov M.V., Karpov D.F., Ismailov A.M., Romanovski V. Optimizing heating systems for greenhouses using gas radiators // Journal of Engineering. 2025. Vol. 2025. P. 9586181. DOI: 10.1155/je/9586181.
14. Küçükerdem K., Gulbe A. Comparison of energy requirement for heating and cooling of greenhouses in Adana and Iğdir provinces // Journal of the Institute of Science and Technology. 2026. Vol. 16 (1). P. 141-156. DOI: 10.21597/jist.1792012.
15. Sokolov E.Ya. District heating and thermal networks. Moscow: MEI, 2001. 472 p.
16. Samarin O.D. The use of numerical methods to specify the rate of Initial heating or cooling of the room / O.D. Samarin // Zhilishchnoe Stroitel'stvo [Housing Construction]. 2026. No. 5. P. 10-14. DOI: 10.31659/0044-4472-2026-5-10-14.

Информация об авторах

Михаил Васильевич Павлов, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры теплогазоводоснабжения; Author ID SCOPUS: 57210325021; WoS ResearcherID: AAF-2092-2021; ORCID: 0000-0002-3522-9302; RSCI ID: 564418; SPIN-код: 9241-4996; pavlovmv@vogu35.ru

Денис Федорович Карпов, соискатель ученой степени канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры теплогазоводоснабжения; Author ID SCOPUS: 57210325021; WoS ResearcherID: AAF-2092-2021; ORCID: 0000-0002-3522-9302; RSCI ID: 564418; SPIN-код: 9241-4996; karpovdf@vogu35.ru

Information about the authors

Mikhail V. Pavlov, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Heat, Gas and Water Supply, Vologda State University; 160000, Vologda, 15 Lenin St., Office 111; e-mail: pavlovmv@vogu35.ru

Denis F. Karpov, PhD Candidate in Engineering, Senior Lecturer of the Department of Heat, Gas and Water Supply, Author ID SCOPUS: 57210325021; WoS ResearcherID: AAF-2092-2021; ORCID: 0000-0002-3522-9302; RSCI ID: 564418; SPIN-код: 9241-4996; karpovdf@vogu35.ru

Вклад авторов

М.В. Павлов – постановка цели и задач исследований; разработка математических выражений для определения температуры внутреннего воздуха и темпа ее падения; анализ результатов численного моделирования и формулирование выводов. Д.Ф. Карпов – сбор и систематизация научно-технической литературы; выполнение вычислительных экспериментов и оценка влияния влажности почвы на продолжительность охлаждения; написание и редактирование текста рукописи, оформление полученных результатов.

Конфликт интересов / Conflict of interest

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

Поступила в редакцию / Received 03.03.2026

Поступила после доработки и рецензирования / Received 02.09.2026

Принята к публикации / Accepted 02.09.2026

Contribution of the authors

M.V. Pavlov – Setting the goal and objectives of the study; development of mathematical statements to determine the temperature of the internal air and the rate of its fall; analysis of the results of numerical modeling and formulation of conclusions.

D.F. Karpov – Collection and systematization of scientific and technical literature; performing computational experiments and assessing the effect of soil moisture on the duration of cooling; writing and editing the text of the manuscript, formatting the results obtained.