

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-30-37>

УДК 631.234:697



ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В КУЛЬТИВАЦИОННОМ СООРУЖЕНИИ ПОСЛЕ ОТКЛЮЧЕНИЯ СИСТЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ

М.В. Павлов¹, Д.Ф. Карпов¹, Л.В. Храпонова²

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вологодский государственный университет»; 160000, г. Вологда, ул. Ленина, 15, Россия

² Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»; 3195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, лит. Б, Россия

Аннотация. Создание благоприятных климатических условий для выращивания растений в культивационном сооружении напрямую связано со стабильной работой системы отопления, особенно в зимний период года. Цель исследований – предупредить гибель растений в защищенном грунте в случае аварийного отключения системы отопления. В работе предложен способ определения температуры внутреннего воздуха как основного параметра микроклимата помещения после полного прекращения подачи тепловой энергии и последующего остывания системы теплообеспечения. Метод расчета основан на уравнении теплового баланса помещения, широко используемом при проектировании систем отопления, и законе регулярного теплового режима первого рода, суть которого заключается в том, что понижение температуры во всех точках системы в ходе ее остывания происходит одинаково, подчиняясь экспоненциальному закону (для условий конвективного теплообмена $Bi \ll 1$). Реализация предложенного способа выполнена на примере промышленной теплицы «Фермер 7.5» (Российская Федерация), предназначенной для круглогодичного выращивания растений. Установлено, что после аварийного отключения системы отопления температура внутреннего воздуха (начальное значение – 22°C) достигнет условно критического значения 8°C через приблизительный интервал времени 1 ч 15 мин. Влияние величины тепловых потерь на продолжительность падения температуры воздуха в помещении до критического значения незначительно (в среднем увеличивается на 0,2 ч на каждые $0,1 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ термического сопротивления ограждения). Уменьшение тепловых потерь приведет к закономерному снижению начальной тепловой мощности системы отопления (до ее отключения) с целью поддержания требуемой температуры внутреннего воздуха, и как следствие – к сокращению количества тепловой энергии, которую она передаст помещению в течение остывания.

Ключевые слова: культивационное сооружение, система отопления, регулярный тепловой режим, температура внутреннего воздуха, тепловой баланс помещения

Формат цитирования: 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>

Original article

AIR TEMPERATURE PREDICTION IN A CULTIVATION FACILITY AFTER HEATING SYSTEM SHUTDOWN

M.V. Pavlov¹, D.F. Karpov¹, L.V. Khraponova²

¹ Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Vologda State University”, 15 Lenin St., 160000, Vologda, Russia

² Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University”, 29 Letter B Polytechnique St., 3195251, Saint Petersburg, Russia

Abstract. Creating favorable climatic conditions for plant cultivation in a controlled environment structure is directly linked to the stable operation of the heating system, particularly during the winter period. The objective of this study is to prevent plant loss in protected cultivation systems in the event of an emergency heating system shutdown. This paper proposes a method for determining indoor air temperature, which is considered a key microclimatic parameter, following the complete cessation of heat supply and subsequent cooling of the heating system. The calculation method is based on the thermal balance equation of the structure, which is widely applied in the design of heating systems, and

on the law of the first kind of regular thermal regime. The essence of this law lies in the assumption that the temperature in all parts of the system decreases uniformly during cooling, following an exponential decay law (for conditions of convective heat exchange $Bi \ll 1$). The implementation of the proposed method is carried out on the example of an industrial greenhouse "Farmer 7.5" (Russian Federation), designed for year-round plant cultivation. It has been established that after an emergency shutdown of the heating system, the internal air temperature (initial value 22°C) will reach a conditionally critical value of 8°C after an approximate time interval of 1 hour and 15 minutes. The effect of the magnitude of heat losses on the duration of the drop in indoor air temperature to a critical value is insignificant (on average, it increases by 0.2 hours for every $0.1 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ of thermal resistance of the fence). Reducing heat loss will lead to a natural reduction in the initial thermal power of the heating system (before it is switched off) in order to maintain the required indoor air temperature and, as a consequence, to a reduction in the amount of thermal energy that it transfers to the room during cooling.

Keywords: cultivation facility, heating system, regular thermal regime, indoor air temperature, thermal balance of the structure

Format of citation: Pavlov M.V., Karpov D.F., Khraponova L.V. Air temperature prediction in a cultivation facility after heating system shutdown // Prirodoobustrojtvo. 2025. № 3. P. 30-37. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-30-37>

Введение. Бесперебойная работа системы отопления в теплицах, оранжереях и прочих культивационных сооружениях является основополагающим фактором для благоприятного роста и развития растений [1, 2]. Оптимальные климатические условия наряду с необходимым уровнем освещенности [3, 4] не только защищают растения от возможной гибели, но и влияют на качество, количество и время получения урожая [5, 6]. Поддержание требуемой температуры воздуха внутри обогреваемого помещения как основного параметра микроклимата возможно только при соблюдении равенства входящих и выходящих тепловых потоков [7]. Источником теплопоступлений служит не только система отопления, но и солнечная длинноволновая радиация [8], тепловые избытки от людей (рабочего персонала), электрооборудования, нагретой почвы и растений (при испарении влаги с поверхности наружных органов растений осуществляется перенос не только массы, но и тепловой энергии). К основным тепловым потерям можно отнести теплообмен помещения с наружным воздухом через ограждения культивационного сооружения включая грунт и потери тепловой энергии вместе с нагретым вентиляционным воздухом, удаляемым в окружающую среду.

Тепловой режим зданий и сооружений после отключения системы отопления подробно изучен заслуженными советскими учеными В.Н. Богословским [9] и Е.Я. Соколовым [10]. Ими получены уравнения, описывающие изменение температуры внутреннего воздуха при остывании помещения, введены такие новые понятия (параметры), как коэффициент аккумуляции, показатель темпа охлаждения и т.п. В настоящее время уточняются исходные уравнения,

так как рассматриваются новые факторы, влияющие на изменение температуры внутреннего воздуха, – как, например, переменная температура наружного воздуха [11] или теплоустойчивость многослойных ограждающих конструкций [12]. Объектами подобных научных исследований выступают не только гражданские [13], но и промышленные здания, в которых учитываются особенности технологического процесса [14, 15]. Что касается сельскохозяйственных строительных объектов, то моделирование теплового режима помещения после аварийного отключения системы отопления рассмотрено недостаточно. При практической значимости бесперебойной работы системы отопления для выращивания растений, а также низком уровне тепловой защиты данных объектов строительства становится актуальным вопрос прогнозирования температуры внутреннего воздуха в культивационных сооружениях в случае полного прекращения подачи тепловой энергии и последующего остывания системы теплообеспечения. Решение такой задачи позволит определить продолжительность отказа системы отопления (необеспеченности по температуре) для конкретно взятых условий, которая не скажется отрицательно на жизни и вегетационном периоде растений.

Цель исследований: предупредить гибель растений в защищенном грунте в случае аварийного отключения системы отопления.

Материалы и методы исследований. На рисунке 1 схематично изображено культивационное сооружение с основными входящими тепловыми потоками (теплопоступлениями) и тепловыми потерями в окружающую среду.

Поддержание требуемой температуры внутреннего воздуха $t_{\text{вн.в}}$ в культивационном

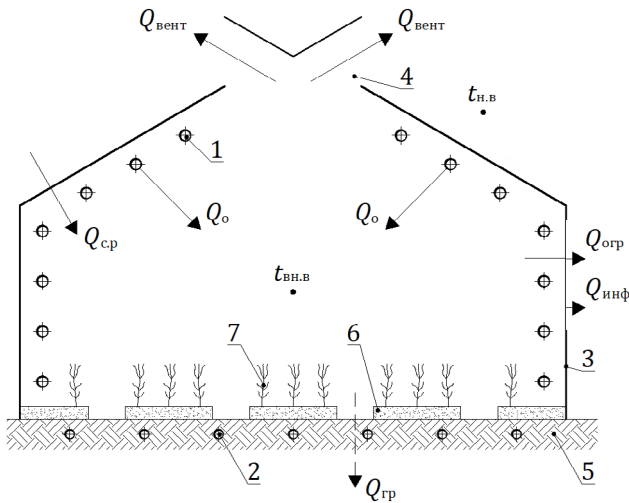


Рис. 1. Тепловой баланс культивационного сооружения (общий вид):

- 1 – трубопроводы воздушного обогрева;
2 – трубопроводы грунтового обогрева;
3 – ограждение; 4 – вытяжные
вентиляционные отверстия (фрамути);
5 – грунт; 6 – почва; 7 – растения

Fig. 1. Thermal balance of the cultivation facility (general view):

- 1 – air heating pipelines;
3 – fencing; 4 – exhaust vents (transoms);
5 – soil; 6 – soil; 7 – plants

сооружении возможно только при равенстве (балансе) входящих и выходящих тепловых потоков. Согласно данным рисунка 1 основным источником тепловой энергии в помещении является система комбинированного отопления с суммарным тепловым потоком Q_o , которая в рассматриваемом случае представляет собой трубопроводы воздушного обогрева 1 и грунтового обогрева 2. К положительной составляющей теплового баланса культивационного сооружения также можно отнести проникающую длинноволновую солнечную радиацию $Q_{ср}$. В соответствии с действующими требованиями СП 60.13330.2020 величина $Q_{ср}$ не учитывается при проектировании отопления, так как является нерегулярным потоком тепловой энергии (расчет тепловой мощности системы отопления выполняется для ночного режима работы без учета солнечной радиации).

К отрицательным тепловым потокам в культивационном сооружении можно отнести (рис. 1): тепловые потери теплопередачей и вследствие инфильтрации наружного воздуха через неплотности ограждения 3 – соответственно $Q_{огр}$ и $Q_{инф}$, тепловые потери от теплообмена с наружным воздухом при температуре $t_{н.в}$ через вытяжные вентиляционные отверстия (фрамути) 4 и грунт 5 – соответственно $Q_{вент}$ и $Q_{гр}$. Если при проектировании культивационного сооружения

предусматривается грунтовый обогрев почвы, то в уравнение теплового баланса составляющая $Q_{гр}$ не включается [16]. Температура внутреннего воздуха $t_{вн.в}$ также будет зависеть от условий его взаимодействия с почвой 6 и растениями 7, которое осуществляется путем конвективного теплообмена и испарения влаги (транспирации).

При расчете тепловой производительности системы отопления культивационного сооружения Q_o не учитываются солнечная радиация $Q_{ср}$ (ночной режим работы) и расход тепловой энергии на нужды вентиляции $Q_{вент}$ [16]. Тогда для начального периода развития растений уравнение теплового баланса культивационного сооружения примет следующий вид [16, 17]:

$$Q_o = Q_{огр} + Q_{инф} + Q_{гр}, \text{ Вт}, \quad (1)$$

где $Q_{огр}$ – тепловые потери в окружающую среду через ограждение 3 культивационного сооружения, Вт; $Q_{инф}$ – расход тепловой энергии на нагрев инфильтрующегося наружного воздуха, Вт; $Q_{гр}$ – тепловые потери в окружающую среду через грунт 5, Вт.

В случае отключения системы отопления уравнение теплового баланса культивационного сооружения (1) должно быть записано для нестационарного теплового режима в следующем виде:

$$-c\rho V \frac{dt_{вн.в}}{d\tau} = Q_{огр} + Q_{инф} + Q_{гр} - Q_o(\tau), \text{ Вт}, \quad (2)$$

где c – удельная массовая теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К); ρ – плотность воздуха, кг/м³; V – объем помещения, м³; $t_{вн.в}$ – температура внутреннего воздуха, °C; τ – время отключения системы отопления, с.

В развернутом виде уравнение теплового баланса культивационного сооружения (2) будет выглядеть следующим образом:

$$-c\rho V \frac{dt_{вн.в}}{d\tau} = \frac{t_{вн.в} - t_{н.в}}{R_i} F_{огр} (1 + \beta_{инф}) + (t_{вн.в} - t_{н.в}) \sum_{i=1}^n \frac{F_i}{R_i} - Q_o^n e^{-m\tau}, \text{ Вт}, \quad (3)$$

где $t_{н.в}$ – температура наружного воздуха, °C; R_i – сопротивление теплопередаче ограждения 3 культивационного сооружения, м²·К/Вт; $F_{огр}$ – площадь ограждения 3 культивационного сооружения, м²; $\beta_{инф}$ – доля расхода тепловой энергии на нагрев инфильтрующегося наружного воздуха относительно тепловых потерь теплопередачей через ограждение 3 культивационного сооружения, которая обычно принимается равной 0,2 [16, 17]; F_i и R_i – соответственно площадь поверхности, м², и сопротивление теплопередаче, м²·К/Вт, i -й зоны грунта при их общем количестве n ; Q_o^n – начальная тепловая мощность системы отопления (до ее отключения), Вт; $m = \frac{\alpha F_o}{C_o}$ – темп остывания системы отопления, 1/с; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); F_o – суммарная площадь поверхности теплообмена системы отопления, м²; C_o – теплоемкость системы отопления, Дж/К.

В уравнении (3) остывание системы отопления культивационного сооружения рассмотрено с позиции регулярного теплового режима (первого рода), из которого следует, что понижение температуры тела (в данном случае системы отопления) происходит по экспоненциальному закону [18]. Теплоустойчивостью ограждения 3 культивационного сооружения при определении температуры внутреннего воздуха $t_{\text{вн.в}}$ в данном случае пренебрегают, так как светопрозрачная ограждающая конструкция имеет сравнительно малую толщину (например, толщина сотового поликарбоната составляет от 4 до 16 мм, а органического стекла – не менее 5 мм, рекомендуемая толщина – 10 ÷ 15 мм). Температура наружного воздуха $t_{\text{н.в}}$ принята постоянной в течение всего периода отключения системы отопления.

Решение уравнения теплового баланса культивационного сооружения для нестационарного теплового режима (3) будет иметь следующий вид:

$$\Theta = \frac{t_{\text{вн.в}}^{\text{к}} - t_{\text{н.в}}}{t_{\text{вн.в}}^{\text{н}} - t_{\text{н.в}}} = e^{\frac{Q_0^{\text{н}}(1-e^{-m\tau})}{c\rho V m(t_{\text{вн.в}}^{\text{к}} - t_{\text{н.в}})}} \left[\frac{F_{\text{огр}}}{c\rho V R_t} (1 + \beta_{\text{инф}}) + \frac{1}{c\rho V} \sum_{i=1}^n \frac{F_i}{R_i} \right] \tau, \quad (4)$$

где Θ – безразмерная температура; $t_{\text{вн.в}}^{\text{н}}$ и $t_{\text{вн.в}}^{\text{к}}$ – соответственно температура внутреннего воздуха до и после отключения системы отопления, °C.

Следует отметить, что формула (4) записана в неявном виде, так как искомая температура внутреннего воздуха $t_{\text{вн.в}}^{\text{к}}$ присутствует как в левой, так и в правой частях уравнения.

Рассмотрим решение уравнения (4) на примере промышленной теплицы «Фермер 7.5» (Российская Федерация), предназначенной для круглогодичного выращивания растений (рис. 2).

Исходные данные для выполнения расчета:

1. Геометрические параметры. Согласно данным рисунка 2 линейные размеры промышленной теплицы «Фермер 7.5» следующие: ширина $a = 7,45$ м; длина $b = 8,40$ м; высота (в верхней точке промышленной теплицы) $h = 3,80$ м. Суммарная площадь ограждения $F_{\text{огр}} \approx 140,29$ м².

2. Параметры ограждения. Термическое сопротивление ограждения принято равным $R_{\text{огр}} = 0,29$ м²·К/Вт, что соответствует толщине сотового поликарбоната $\delta_{\text{огр}} \approx 10$ мм. Тогда сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции составит $R_{t \approx 0,45}$ м²·К/Вт.

3. Параметры внутреннего воздуха. Начальная температура внутреннего воздуха (до отключения системы отопления) $t_{\text{вн.в}}^{\text{н}} = 22^\circ\text{C}$ (для огурцов в зимне-весенний оборот, до плодоношения, по данным РД-АПК 1.10.09.01-14).

Плотность и удельная массовая теплоемкость воздуха равны (номинальные значения) $\rho = 1,23$ кг/м³ и $c = 1006$ Дж/(кг·К) соответственно.

4. Параметры наружного воздуха. Температура наружного воздуха (окружающей среды) в течение всего периода принята постоянной и равной $t_{\text{н.в}} = -15^\circ\text{C}$.

5. Параметры грунта. Сопротивления теплопередаче I и II зон грунта приняты, по данным [19], $R_1 = 2,1$ м²·К/Вт (при площади $F_1 \approx 63,40$ м²) и $R_{\text{II} = 4,3}$ м²·К/Вт (при площади $F_{\text{II}} \approx 15,18$ м²) соответственно (рис. 2).

6. Параметры системы отопления. Суммарная площадь поверхности системы отопления $F_o \approx 56,82$ м². Средний коэффициент теплоотдачи (конвективного теплообмена) $\alpha \approx 6,43$ Вт/(м²·К). Начальная тепловая мощность системы водяного отопления (до ее отключения) $Q_o^{\text{н}} \approx 15,2$ кВт. Темп остывания системы водяного отопления $m \approx 26,3 \cdot 10^{-3} 1/\text{с}$.

На рисунке 3 представлен график изменения температуры внутреннего воздуха $t_{\text{вн.в}}$ и безразмерной температуры Θ после отключения системы водяного отопления в промышленной теплице «Фермер 7.5». На рисунке 3 также

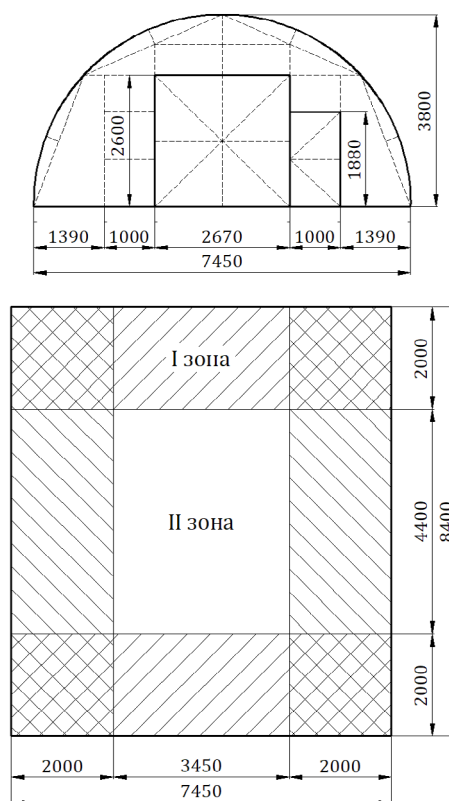


Рис. 2. Промышленная теплица «Фермер 7.5» (вид спереди)

и схема разбивки грунта по зонам

Fig. 2. Industrial greenhouse "Farmer 7.5" (front view) and the scheme of soil breakdown by zones

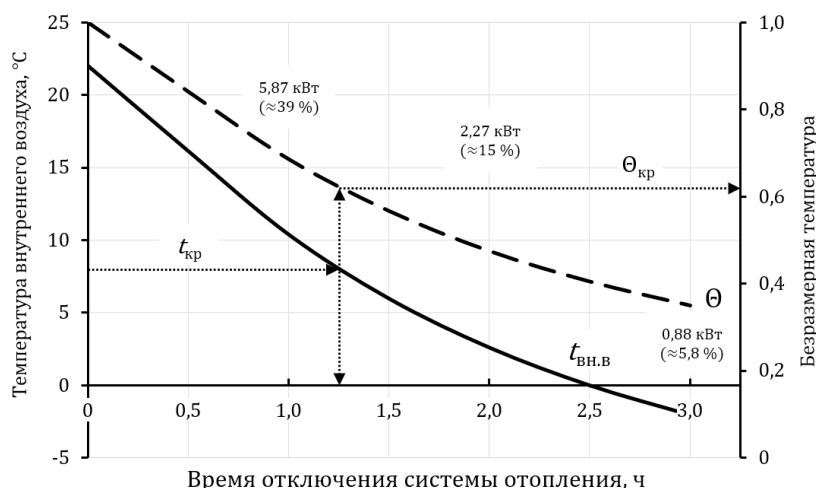


Рис. 3. Изменение температуры внутреннего воздуха после отключения системы отопления

Fig. 3. Change in the temperature of the indoor air after switching off the heating system

указаны значения тепловой мощности системы отопления Q_0 в ходе ее остывания в абсолютных и относительных (относительно Q_0^H) единицах.

Как отмечено в работе [20], в случае аварийного отключения системы отопления огурцы могут перенести кратковременное понижение температуры внутреннего воздуха до $t_{кр} = 8^\circ\text{C}$ на срок не более 6 ч. При продолжительно низкой температуре плоды могут замерзнуть и погибнуть. Известно, что данная овощная культура очень прихотлива к температуре внутреннего воздуха (особенно на этапе созревания плодов). Так, при температуре внутреннего воздуха $t_{вн.в} = 15^\circ\text{C}$ огурцы могут «подмерзнуть» и практически полностью перестать расти. В соответствии с данными рисунка 3 температура внутреннего воздуха в промышленной теплице достигнет критического значения $t_{кр} = 8^\circ\text{C}$ ($\Theta_{кр} \approx 0,62$) с момента отключения системы отопления через интервал времени $\tau_{кр} \approx 15$ мин.

Объяснить быстрое падение температуры внутреннего воздуха $t_{вн.в}$ после отключения системы отопления (рис. 3) можно как малой удельной объемной теплоемкостью воздуха c_p , так и низким сопротивлением ограждающей конструкции промышленной теплицы $R_{огр}$ при значительной площади ограждения $F_{огр}$. Потери тепловой энергии в грунт $Q_{гр}$ составляют $\approx 10\%$ от общих тепловых потерь и поэтому не оказывают большого влияния. Таким образом, культивационное сооружение как строительный объект с относительно низким уровнем тепловой защиты должно быть обеспечено системой отопления с повышенными требованиями к надежности работы [21, 22].

На рисунке 4 изображен график зависимости между временем падения температуры внутреннего воздуха в промышленной теплице $\tau_{кр}$ до критического значения $t_{кр} = 8^\circ\text{C}$, суммарными тепловыми потерями $Q_{т.п.}$, входящими в состав

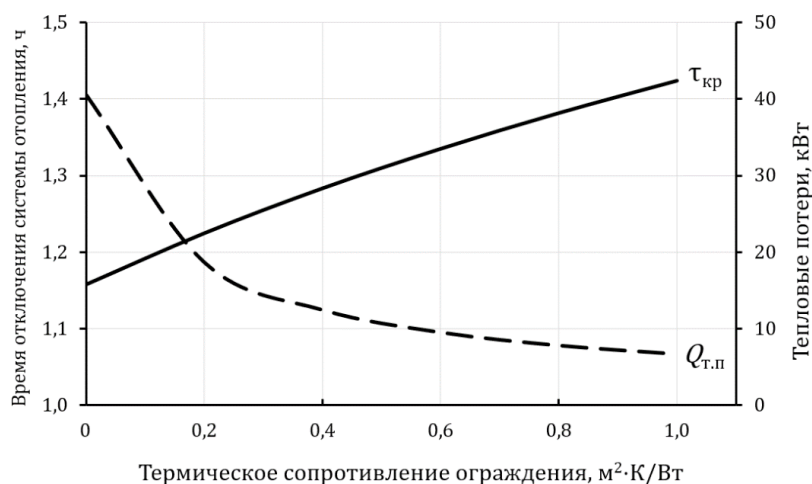


Рис. 4. Влияние термического сопротивления ограждения на время остывания системы отопления

Fig. 4. The effect of thermal resistance of the fencing on the cooling time of the heating system

уравнения теплового баланса (1), и термическим сопротивлением ограждающей конструкции $R_{огр}$ для рассматриваемых условий.

С увеличением термического сопротивления ограждающей конструкции $R_{огр}$ закономерно будут снижаться тепловые потери $Q_{т.л.}$ (рис. 4). Тогда для поддержания требуемой температуры внутреннего воздуха $t_{вн.в.}$, согласно уравнению теплового баланса (1), тепловая мощность системы отопления Q_0 также должна быть меньше. Следовательно, количество тепловой энергии, которое получит помещение в случае отключения системы отопления, с ростом величины $R_{огр}$ будет уменьшаться. Этим можно объяснить слабое влияние термического сопротивления ограждения $R_{огр}$ на продолжительность остывания системы отопления $\tau_{кр.}$.

Выводы

Понижение температуры внутреннего воздуха в промышленной теплице после отключения системы отопления происходит достаточно быстро – в среднем на величину $\approx 8,0^\circ\text{C}/\text{ч}$, особенно в начальный период времени, далее скорость падения температуры постепенно уменьшается до величины $\approx 4,0^\circ\text{C}/\text{ч}$. Для сравнения: в помещениях жилых зданий понижение температуры внутреннего воздуха на $8,0^\circ\text{C}$ может быть достигнуто приблизительно в течение двух суток. В отличие от культивационных сооружений, где

в качестве ограждающих конструкций обычно выступают светопрозрачные строительные материалы толщиной до 20 мм, в жилых домах наружными ограждениями являются предварительно нагретые многослойные теплоизолированные стены толщиной 400 ÷ 700 мм. Благодаря тепловой инерции и аккумулирующим способностям массивные наружные ограждения (без учета светопрозрачных ограждающих конструкций) могут частично отдавать теплоту внутреннему воздуху в процессе остывания. При этом сопротивление теплопередаче наружных стен жилых зданий примерно в 7-8 раз больше сопротивления светопрозрачных конструкций культивационных сооружений.

Установлено, что продолжительность понижения температуры внутреннего воздуха до условно критического значения $t_{кр.} = 8^\circ\text{C}$ мало зависит от суммарных тепловых потерь (в среднем увеличивается на $\approx 0,2$ ч на каждые $0,1 \text{ м}^2 \cdot \text{K}/\text{Вт}$ термического сопротивления ограждения). Для соблюдения теплового баланса помещения и поддержания заданной температуры внутреннего воздуха уменьшение тепловых потерь должно закономерно привести к снижению требуемой тепловой мощности системы отопления. Как следствие, при аварийном отключении системы отопления помещение культивационного сооружения получит меньшее количество тепловой энергии за рассматриваемый период остывания.

Список использованных источников

1. Лошкарёв И.Ю. Энергосберегающие принципы в тепличных комплексах / И.Ю. Лошкарёв, В.М. Наход, А.Я. Аберясов // Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы IX международной научно-практической конференции. Саратов, 2018. С. 109-110.
2. Romanovski V., Zhang Z., Akbarisehat A. Nanobiosensors for precision farming and sustainable agriculture // in: Agricultural Sustainability through Nanotechnology. 1st ed. CRC Press. Boca Raton. 2025: P. 156-174. DOI: 10.1201/9781003354253-10.
3. Cossu M., Yano A., Li Zh., Onoe M., Nakamura H., Matsumoto T., Nakata J. Advances on the semi-transparent modules based on micro solar cells: First integration in a greenhouse system // Applied Energy. 2016. No 162. P. 1042-1051. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.002>
4. Periakaruppan R., Romanovski V., Kumar T.S., Vanathi P., Praveena M., Anilkumar A., Sivaraj D., Ahamed N., Murugesan S., Chandrasekar D., Selvaraj K. Innovations in modern nanotechnology for the sustainable production of agriculture // ChemEngineering. 2023. 7(4). 61. DOI: 10.3390/chemengineering7040061
5. Kavga A., Konstas I., Panidis T. Assessment of infrared heating benefits in a production greenhouse // Applied Engineering in Agriculture. 2015. Vol. 31 (1). P. 143-151. <https://doi.org/10.13031/aea.31.10747>

References

1. Loshkarev I.Yu. Energy-saving principles in greenhouse complexes / I.Yu. Loshkarev V.M. Nakhod, A.Ya. Aberyashev // Actual problems of the energy of the Agro-Industrial Complex: materials of the IX International scientific and practical conference. Saratov, 2018. P. 109-110.
2. Romanovski V., Zhang Z., Akbarisehat A. Nanobiosensors for precision farming and sustainable agriculture // in: Agricultural Sustainability through Nanotechnology. 1st ed. CRC Press. Boca Raton. 2025: P. 156-174. DOI: 10.1201/9781003354253-10
3. Cossu M., Yano A., Li Zh., Onoe M., Nakamura H., Matsumoto T., Nakata J. Advances on the semi-transparent modules based on micro solar cells: First integration in a greenhouse system // Applied Energy. 2016. No 162. P. 1042-1051. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.002>
4. Periakaruppan R., Romanovski V., Kumar T.S., Vanathi P., Praveena M., Anilkumar A., Sivaraj D., Ahamed N., Murugesan S., Chandrasekar D., Selvaraj K. Innovations in modern nanotechnology for the sustainable production of agriculture // ChemEngineering. 2023. 7(4). 61. DOI: 10.3390/chemengineering7040061
5. Kavga A., Konstas I., Panidis T. Assessment of infrared heating benefits in a production greenhouse // Applied Engineering in Agriculture. 2015. Vol. 31 (1). P. 143-151. <https://doi.org/10.13031/aea.31.10747>

6. Romanovski V., Matsukevich I., Romanovskaia E., Periakaruppan R. Nano metal oxide as nanosensors in agriculture and environment // in: *Nanometal Oxides in Horticulture and Agronomy*. Elsevier. 2023. P. 321-352. DOI: 10.1016/B978-0-323-91809-1.00016-0
7. Овчинников А.В. Определение и оптимизация тепловой нагрузки культивационного сооружения / А.В. Овчинников, В.М. Каравайков // *Энерго- и ресурсосбережение – XXI век: сборник материалов VIII международной научно-практической интернет-конференции*. Орел: 2010. С. 136-138.
8. Sonneveld P.J., Swinkels G.L.A.M., Tuijl B.A.J., Janssen H., Bot G.P.A. Greenhouse with a CPV system based on NIR reflecting lamellae // *Acta Horticulturae*. 2012. P. 43-50. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.927.3>
9. Богословский В.Н. Строительная теплофизика. Учебник. Санкт-Петербург: АВОК Северо-Запад, 2006. 400 с.
10. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. М.: МЭИ, 2001. 472 с.
11. 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>
12. Малявина Е.Г. Определение времени остывания помещения после отключения системы отопления с учетом теплоустойчивости внутренних и наружных многослойных ограждающих конструкций / Е.Г. Малявина, Р.Г. Ахвердашвили // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2023. № 10 (778). С. 83-96. <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2023-778-10-83-96>
13. Горелов М.В. Экспериментальное определение времени остывания здания при аварийном отключении системы теплоснабжения / М.В. Горелов, С.В. Гужов, Е.М. Горячева, М.Ю. Юркина // *Энергобезопасность и энергосбережение*. 2020. № 4. С. 11-15. <https://doi.org/10.18635/2071-2219-2020-4-11-15>
14. 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>
15. Симашев В.И. Разработка системы управления ассоциативно-защищенными картографическими базами данных в распределенной вычислительной среде / В.И. Симашев, М.Г. Нуриев // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2025. № 4 (154). DOI: 10.60797/IRJ.2025.154.89
16. Климов В.В. Оборудование теплиц для подсобных и личных хозяйств. М.: Энергоатомиздат, 1992. 96 с.
17. Сканави А.Н. Отопление. Учебник. М.: Стройиздат, 1988. 416 с.
18. Кондратьев Г.М. Регулярный тепловой режим. М.: Гостехиздат, 1954. 408 с.
19. Богословский В.Н., Сканави А.Н. Отопление. Учебник. М.: Стройиздат, 1991. 735 с.
20. Дроздов В.Ф. Отопление и вентиляция. Отопление. Учебник. М.: Высшая школа, 1976. 280 с.
21. Павлов М.В. Метод и алгоритм расчета системы газолучистого отопления культивационного сооружения с предварительным подогревом приточного воздуха / М.В. Павлов, Д.Ф. Карпов // *Природообустройство* 2024. № 5. С. 57-64. DOI: 10.26897/1997-6011-2024-5-57-64
22. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025619659 Российская Федерация.
6. Romanovski V., Matsukevich I., Romanovskaia E., Periakaruppan R. Nano metal oxide as nanosensors in agriculture and environment // in: *Nanometal Oxides in Horticulture and Agronomy*. Elsevier. 2023. P. 321-352. DOI: 10.1016/B978-0-323-91809-1.00016-0
7. Ovchinnikov A.V., V.M. Determination and optimization of the thermal load of the cultivation structure / A.V. Ovchinnikov, V.M. Karavaikov // *Energy and Resource Saving – XXI Century: Collection of Materials of the VIII International scientific and practical internet conference*. Orel: 2010. P. 136-138.
8. Sonneveld P.J., Swinkels G.L.A.M., Tuijl B.A.J., Janssen H., Bot G.P.A. Greenhouse with a CPV system based on NIR reflecting lamellae // *Acta Horticulturae*. 2012. P. 43-50. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.927.3>
9. Bogoslovsky V.N. Construction heat engineering. St. Petersburg: AVOK North – West, 2006. 400 p.
10. Sokolov E.Ya. Heating and heating networks. Moscow, MPEI Publ., 2001. 472 p.
11. Samarin O.D. Calculation of cooling of building premises in emergency modes at variable temperature of outdoor air. 2024. V. 19. Issue. 1, P. 77-83. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2024.1.77-83>
12. Malyavina E.G., Ahverdashvili R.G. Malyavina E.G., Akhverdashvili R.G. Determination of the cooling time of the room after disconnecting the heating system taking into account the heat stability of internal and external multilayer enclosing structures. *Construction*. 2023. № 10 (778). P. 83-96. <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2023-778-10-83-96>
13. Gorelov M.V. Experimental determination of the cooling time of the building in case of emergency shutdown of the heat supply system / M.V. Gorelov, S.V. Guzhov, E.M. Goryacheva M.Yu. Yurkina // *Energy security and energy saving*. 2020. № 4. P. 11-15. <https://doi.org/10.18635/2071-2219-2020-4-11-15>
14. Razakov M.A. Features of the heat intensity of the turbine hall when the heating system is turned off // *Proceedings of higher educational institutions. Problems of energy*. 2022. V. 24. № 6. P. 133-142. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2022-24-6-133-142>
15. Simashev V.I. Development of a management system for associatively-protected cartographic databases in a distributed computing environment / V.I. Simashev, M.G. Nuriev // *The International scientific-research journal*. 2025. No. 4 (154). DOI: 10.60797/IRJ.2025.154.89
16. Klimov V.V. Equipment of glasshouses for auxiliary and private households. Moscow: Energoatomizdat, 1992. 96 p.
17. Skanavi A.N. Heating. Textbook. Moscow, Stroyizdat Publ., 1988. 416 p.
18. Kondratjev G.M. Regular heat regime. Moskva: Gostekhizdat, 1954. 408 p.
19. Bogoslovskij V.N., Skanavi A.N. Otoplenie. Moskva: Strojizdat, 1991. 735 s.
20. Drozdov V.F. Heating and ventilation. Heating. Moscow: Higher school, 1976. 280 p.
21. Pavlov M.V., Karpov D.F. Method and algorithm for calculating the system of gas-radiant heating of cultivation facilities with preliminary heating of the air flow / M.V. Pavlov, D.F. Karpov // *Prirodoostroistvo* 2024. № 5. P. 57-64. DOI: 10.26897/1997-6011-2024-5-57-64
22. Certificate of State Registration of Computer Program No 2025619659 Russian Federation. Program for determining the temperature of the internal air in the room after turning off the heating system. 28.03.2025: publ.

Программа для определения температуры внутреннего воздуха в помещении после отключения системы отопления: заявл. 28.03.2025; опубл. 16.04.2025 / А.А. Фролова, М.Г. Нуриев, М.С. Шкиндров [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет».

Об авторах

Михаил Васильевич Павлов, доцент, канд. техн. наук, доцент кафедры теплогазоснабжения; Author ID SCOPUS: 57204361039; WoS ResearcherID: AAN-5773-2021; ORCID: 0000-0002-8687-3296; RSCI ID: 564419; SPIN-код: 6544-7267; pavlovmv@vogu35.ru

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

Людмила Владимировна Храпонова, аспирант Высшей школы передовых цифровых технологий, Передовая инженерная школа «Цифровой инжиниринг»; WoS ResearcherID: LMN-1045-2024; ORCID: 0009-0006-9047-9386; RSCI ID: 1266517; SPIN-код: 9916-5102; hraponova.lv@edu.spbstu.ru, luda11nev@gmail.com

Критерии авторства / Criteria of authorship

Павлов М.В., Карпов Д.Ф., Храпонова Л.В. провели теоретические и экспериментальные исследования, на основании которых выполнили обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of interests

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

Вклад авторов / Contribution of authors

Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации / All authors made an equal contribution to the preparation of the publication

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 02.03.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Received after peer review and revision 20.05.2025

Принята к публикации / Accepted for publication 20.05.2025

16.04.2025 / A.A. Frolova, M.G. Nuriev, M.S. Shkinderov [i dr.]; applicant: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research Moscow State University of Civil Engineering".

About the authors

Mikhail V. Pavlov, associate professor, CSc (Eng), associate professor at the department of heat, gas and water supply, FSBEI HE "Vologda State University"; 160000, Vologda, 15 Lenin St., 111 Office; pavlovmv@vogu35.ru

Denis F. Karpov, applicant, senior lecturer at the department of heat, gas and water supply, FSBEI HE "Vologda State University"; 160000, Vologda, 15 Lenin St., 111 Office; karpovdf@vogu35.ru

Liudmila V. Khraponova, post graduate student at the Higher school of advanced digital technologies, Advanced engineering school "Digital engineering", Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; 3195251, Saint Petersburg, 29 Letter B Polytechnique St., 4 Building, 320 Office; hraponova.lv@edu.spbstu.ru, luda11nev@gmail.com

Pavlov M.V., Karpov D.F. and Khraponova L.V. conducted theoretical and experimental studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript, they have copyright on the article and are responsible for plagiarism.