

were described and analyzed. The S01138812H fan was selected as the ventilation equipment. An electrical circuit for an active ventilation system based on a computer fan was developed. The operating parameters of the fan were calculated based on agronomic recommendations for ventilation design. The calculated operating mode relative to the nominal mode allows for a softer regulation of the temperature level in the phytotron chamber. A generalized block diagram of the automatic ventilation system was considered and the necessary technical equipment for its implementation was described. A logical block diagram of the subroutine for automatic control of the ventilation fan for maintaining the temperature mode in the phytotron chamber was presented. A logical block diagram of the subroutine for implementing the P-law of temperature control with a binary fan control signal has also been developed. This system efficiently regulates the fan performance, which in the nominal mode significantly exceeds the recommended one.

Key words: phytotron, active ventilation, fan, automated system, temperature control, protected ground.

For citation: Gusennikov E. N., Yuran S. I. Design of active ventilation in a phytotron chamber. The Bulletin of Izhevsk State Agricultural Academy. 2026; 1 (85): 158-166. (In Russ.). https://doi.org/10.48012/1817-5457_2026_1_158-166.

Authors:

E. N. Gusennikov[✉], Postgraduate student, <https://orcid.org/0009-0003-0723-4221>;

S. I. Yuran, Doctor of Technical Sciences, Professor; <https://orcid.org/0000-0003-0440-0012>

Udmurt State Agricultural University, 11 Studencheskaya St., Izhevsk, Russia, 426069

ujhuf99@gmail.com

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: the authors declare that they have no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 23.10.2025; одобрена после рецензирования 28.01.2026; принята к публикации 03.03.2026.

The article was submitted 23.10.2025; approved after reviewing 28.01.2026; accepted for publication 03.03.2026.

Научная статья

УДК [631.544.45:628.8]:004.94

DOI 10.48012/1817-5457_2026_1_166-173

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РАБОТЫ СИСТЕМЫ НАГРЕВА ФИТОТРОНА

Гусенников Евгений Николаевич[✉], Юран Сергей Иосифович

Удмуртский ГАУ, Ижевск, Россия

ujhuf99@gmail.com

Аннотация. Эффективность работы системы нагрева фитотрона напрямую влияет на параметры микроклимата, физиологическое состояние растений и воспроизводимость экспериментальных результатов. В связи с этим актуальной является экспериментальная проверка разработанных теоретических моделей, позволяющая подтвердить корректность описания тепловых процессов и обоснованность их применения при проектировании, корректировке и модернизации фитотронов. Цель исследования: подтвердить способность разработанных теоретических моделей, корректно описывать тепловые процессы в камере фитотрона. Исследование выполнено на основе разработанного многопрофильного компактного фитотрона. Проведена проверка математической модели динамики нагрева воздуха, модели распределения температурного поля и компьютерной модели поддержания заданной температуры воздуха и субстрата, реализованной в программном комплексе Comsol Multiphysics. Теоретические модели основаны на описании естественной конвекции нагретого воздуха, определяемой по уравнению Бернулли, и методе разделения переменных для решения дифференциального уравнения энергии воздушного потока. Экспериментальная проверка включала два режима: высокотемпературный (37 °C для воздуха и 42 °C для субстрата) и низкотемпературный (22 °C для воздуха и 27 °C для субстрата). Оценка корректности моделей проводилась путем сравнения экспериментальных и расчетных данных. В исходных вариантах моделей зафиксированы значительные отклонения от экспериментальных данных, обусловленные несоответствием вводимых параметров реальной конструкции и условий эксперимента.

После корректировки параметров моделей максимальные отклонения температур воздуха и субстрата не превышали ± 1 °С, а показатели неравномерности температурного поля находились в пределах допустимой погрешности. Формы распределения температур, полученные в результате моделирования и эксперимента, показали качественное совпадение. Проведено экспериментальное обоснование теоретических моделей работы системы нагрева фитотрона. Установлено, что при корректном задании входных параметров разработанные модели адекватно описывают динамику нагрева и распределение температур и могут быть использованы для дальнейших расчетов и проектных решений без дополнительной корректировки.

Ключевые слова: фитотрон, регулирование температуры, система нагрева, математическое моделирование, компьютерное моделирование, закрытый грунт.

Для цитирования: Гусеников Е. Н., Юран С. И. Экспериментальное обоснование теоретических моделей работы системы нагрева фитотрона // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. 2026. № 1(85). С. 166-173. https://doi.org/10.48012/1817-5457_2026_1_166-173.

Введение. Фитотроны представляют собой высокотехнологичные системы для контролируемого выращивания растений, в которых ключевую роль играет стабильное и равномерное поддержание температурного режима. Эффективность работы системы нагрева напрямую влияет на параметры микроклимата, физиологическое состояние растений и воспроизводимость экспериментальных результатов [9–12].

Теоретическое моделирование тепловых процессов позволяет на этапе проектирования прогнозировать температурные поля, оценивать динамику нагрева и оптимизировать конструктивные и режимные параметры системы. Теплотехнические расчеты и их дальнейший анализ позволяет в первом приближении определить качество работы систем поддержания микроклимата, что крайне важно при проектировании систем с оригинальными техническими решениями, так как тепловые показатели имеют большое влияние на процессы жизнедеятельности растений. Однако достоверность таких моделей определяется степенью их соответствия реальным физическим процессам, что требует обязательного экспериментального подтверждения. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных является необходимым этапом для оценки применимости выбранных допущений, параметров материалов и граничных условий.

Актуальность. Экспериментальная проверка разработанных теоретических моделей, описывающих тепловые процессы в фитотроне, позволяет оценить работоспособность и обосновать их применение при разработке, корректировке и модернизации разрабатываемых устройств для обеспечения заданного температурного режима в процессе контролируемого выращивания растений.

Цель исследования: подтвердить способность разработанных теоретических моделей, корректно описывать тепловые процессы в камере фитотрона.

Задачи:

1. Провести сравнительный анализ данных, характеризующих работу системы нагрева фитотрона, полученных теоретическим и экспериментальными методами.
2. При отсутствии сходимости теоретических и экспериментальных данных скорректировать теоретические модели.

Материал и методы. Для проверки сходимости результатов, полученных с помощью теоретических моделей, с экспериментальными данными был разработан многопрофильный компактный фитотрон, конструкция которого представлена на рисунке 1 [3].

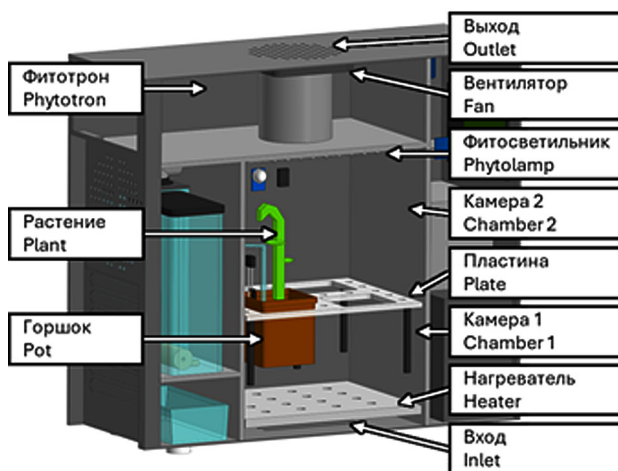


Рисунок 1 – Трехмерная модель многопрофильного компактного фитотрона

В данном исследовании были проведены проверки разработанных ранее математической модели динамики нагрева воздуха, математической модели распределения температурного поля и компьютерной модели поддержания заданной температуры в фитотроне. Отметим основные элементы теоретических моделей.

Основой нагрева воздуха в камере 2 служит явление перетекания нагретого воздуха из камеры 1 под действием естественной конвекции,

скорость которого определяется по уравнению Бернулли [8]:

$$w_{(flow,q)}(t) = S_q \cdot v_q(t) \cdot \rho_q(t), \quad (1)$$

где $w_{flow,q}(t)$ – скорость перетекания (притока или оттока) массы воздуха через q -тое отверстие в момент времени t , кг;

S_q – площадь сечения отверстия q -того отверстия, м²;

$v_q(t)$ – скорость воздушного потока через q -тое отверстие в момент времени t , м/с;

$\rho_q(t)$ – плотность воздуха, проходящего через q -тое отверстие в момент времени t , кг/м³.

В свою очередь изменение тепловой энергии за счет перетока воздуха определяется по формуле:

$$\frac{dQ_{flow,i}}{dt} = c_{air} \cdot \sum_{u=0}^n \left(\frac{dm_{in,u}}{dt} \cdot (T_u(t) - T_i(t)) \right), \quad (2)$$

где $dm_{in,u}/dt$ – масса притекающего воздуха из внешнего u -того объема в i -тую камеру за единицу времени t , кг;

n – количество отверстий в i -той камере (входные и выходные отверстия), через которые перетекает воздух, шт.;

$T_u(t)$ – температура воздуха в u -том объеме в момент времени t , К;

$T_i(t)$ – температура воздуха в i -той камере в момент времени t , К.

Для описания поля распределения температуры воздуха в камере 1 и камере 2 используется метод разделения переменных дифференциального уравнения энергии воздушного потока, которое имеет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + \vec{v} \cdot \text{grad}(T) = a_{\tau} \cdot \nabla^2(T), \quad (3)$$

где T – температура воздушного потока, К;

τ – время, с;

v – скорость воздушных масс, м/с;

a_{τ} – коэффициент теплопроводности воздушных масс, м²/с.

Поля относительного распределения температуры камеры 1 и камеры 2 описываются уравнениями:

$$\theta_2 = e^{\left(\ln\left(\frac{T_{21}}{T_{20}}\right) \cdot \left(\frac{x}{a}\right)^2 + \ln\left(\frac{T_{22}}{T_{20}}\right) \cdot \left(\frac{y}{b}\right)^2 \right)}, \quad (4)$$

где θ_2 – функция температурного поля в камере 2;

$T_{20} \dots T_{24}$ – значения температур в реперных точках камеры 2, К;

a – полуширина половины камеры, м;

b – полуввысота половины камеры, м; и

$$\theta_1 = e^{\left(\ln\left(\frac{T_{11}}{T_{10}}\right) \cdot \left(\frac{x}{a}\right)^2 + \ln\left(\frac{\sqrt{T_{12} \cdot T_{14}}}{T_{10}}\right) \cdot \left(\frac{y}{b}\right)^2 + \ln\left(\sqrt{\frac{T_{12}}{T_{14}}}\right) \cdot \frac{y}{b} \right)}, \quad (5)$$

где θ_1 – функция температурного поля в камере 1;

$T_{10} \dots T_{14}$ – значения температуры в реперных точках камеры 1, К;

a – полуширина камеры 1, м;

b – полуввысота камеры 1, м [4].

Предложенные функции θ_1 и θ_2 позволяют построить на основе измеренной температуры поля неравномерности в относительных величинах. Для получения абсолютных значений полученное поле умножается на показание температуры в центре камеры.

Положение реперных точек основывается на проведенном ранее исследовании построения математической модели температурных полей [4]. В результате работы было определено, что положение точек соответствует четырем крайним и одной центральной точкам. Исходя из симметрии камеры 2 роста растений, в моделировании рассматривается одна половина воздушного объема камеры.

Для моделирования процесса поддержания температуры субстрата и воздуха в камерах фитотрона была разработана компьютерная модель в программном комплексе Comsol Multiphysics [2, 5]. В модели используется метод конечных элементов, разбивающий расчетный объем на объемную сетку, упрощая расчет к определению параметров в расчетных узлах на пересечении сетки. Для моделирования процесса изменения температуры воздуха и субстрата использовался интерфейс Multiphysics Nonisothermal Flow (неизотермический поток), объединяющий два физических интерфейса Laminar Flow (ламинарный поток) и Heat Transfer in Solids and Fluids (передача тепла в твердых и жидких средах).

Интерфейс Laminar Flow используется для моделирования воздушных потоков. Его принцип основывается на уравнении Навье-Стокса, который представляет собой выражение закона сохранения импульса для вязкой ньютоновской жидкости, которое действительно и для воздушных масс. Система уравнений интерфейса Laminar flow имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho(\vec{v} \cdot \nabla)\vec{v} = \nabla \cdot (-pI + K) + F + \rho g, \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0, \end{cases} \quad (6)$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м³;
 t – время, с;
 v – вектор скорости воздуха, м/с;
 ∇ – оператор набла (векторный дифференциальный оператор), м⁻¹;
 p – давление, Па;
 I – единичный тензор;
 K – тензор вязких напряжений, описывающий внутренние силы, возникающие из-за вязкости воздуха;
 F – внешние объемные силы, Н/м³;
 g – ускорение свободного падения, м/с².

Первое уравнение системы описывает закон сохранения импульса. В его левой части слагаемое $\rho(v \cdot \nabla)v$ представляет собой член адвекции, который учитывает изменение скорости за счет перемещения частиц воздуха в пространстве. В правой части выражение $\nabla \cdot (-pI + K)$ определяет внутренние силы (давление и вязкое трение), действующие в объеме. Второе уравнение является уравнением неразрывности и выражает закон сохранения массы: изменение плотности в точке компенсируется дивергенцией потока массы $\nabla(\rho v)$.

Интерфейс Heat Transfer рассчитывает процесс нагрева электронагревателя и изменение температуры субстрата за счет контактного теплообмена.

Принцип основывается на уравнении переноса тепла, выражающего закон сохранения энергии для сплошной среды. Благодаря данному интерфейсу происходит расчет изменения температуры воздуха и субстрата. Система уравнений интерфейса Heat Transfer имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p \bar{v} \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q + Q_{ted}, & (7) \\ q = -k \nabla T, \end{cases}$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м³;
 c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(кг·К);
 t – время, с;
 T – температура, К;
 ∇T – градиент температуры, К/м;
 v – вектор скорости воздуха, м/с;
 q – вектор плотности теплового потока, Вт/м²;
 Q – объемный источник и сток тепла, Вт/м³;
 Q_{ted} – член диссипации вязкой энергии (тепло трения).

В свою очередь $v \cdot \nabla T$ – конвективный член, описывает перенос тепла движением воздуха, $\nabla \cdot q$ – дивергенция вектора плотности теплового потока.

Данная система описывает перенос тепла в движущейся среде. Слагаемое $\rho c_p v \cdot \nabla T$ характеризует конвективный перенос энергии потоком воздуха. Вектор q , определяемый согласно закону Фурье как $-k \nabla T$, описывает теплопередачу в объеме субстрата за счет теплопроводности. Член Q_{ted} учитывает «тепло трения» — необратимый переход кинетической энергии движения в тепловую из-за вязких эффектов (диссипацию).

Проверка теоретических моделей основана на сравнении полученных в результате эксперимента данных с расчетными. Рассмотрим методу ранее проведенных экспериментов.

Эксперименты включали в себя процесс автоматического поддержания заданного температурного режима для воздуха и субстрата. Для всех экспериментов общими параметрами являются: время эксперимента $t_{exp} = 6$ ч, кроме эксперимента 5 по стабилизации температуры, в котором $t_{exp} = 9$ ч, частота записи показаний $t_{write} = 30$ сек, коэффициенты ПИД-регулятора $k_{p1} = 0,35$, $k_{i1} = 0,5$, $k_{d1} = 120$ для электронагревателя и $k_{p2} = 2$, $k_{i2} = 8$, $k_{d2} = 6$ для вентилятора. Для поддержания умеренного уровня влажности перед началом эксперимента заливалось по 5 мл теплой воды в каждый горшок с субстратом. Согласно критерию Стьюдента, для технических средств рекомендуется проводить 3...5 испытаний, все описанные эксперименты выполнялись по 4 раза, после чего их значения усреднялись.

При проведении экспериментов в камерах фитотрона в реперных точках были установлены датчики температуры воздуха на основе NTC-резисторов, подключенных по схеме делителя напряжения. На рисунке 2 представлено расположение датчиков.

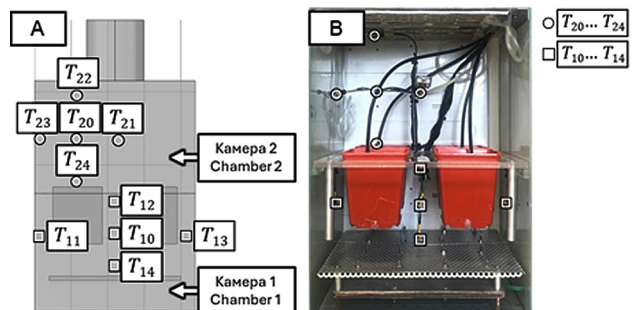


Рисунок 2 – Расположение датчиков температуры в реперных точках: А – схема расположения; В – фото датчиков в камерах фитотрона

Первый эксперимент представляет собой высокотемпературную проверку с заданным значением 37 °С для воздуха и 42 °С для субстрата

при внешней температуре 26 °С, что соответствует агрономическим рекомендациям по проведению термотерапии зараженных растений патогенами [1, 6]. Указанный режим работы моделирует проведение длительной термотерапии для инактивации патогенов больных растений.

Второй эксперимент обеспечивает низкотемпературный режим работы с заданным значением 22 °С для воздуха и 27 °С для субстрата при внешней температуре 12 °С, соответствующей промышленным помещениям. Данный режим моделирует выращивание распространенных на территории РФ растений, например, томатов [7].

Результаты исследования. Для проверки модели динамики нагрева воспользуемся данными проверки системы поддержания температур высокотемпературного эксперимента. Поскольку в процессе разработки фитотрона были изменены его конструкционные параметры, а именно, количество отверстий в касете-перегородке, то при сравнении результатов моделирования динамики нагрева воздуха ($T_{air.M}$) и экспериментальных данных ($T_{air.E}$) возможно значительное расхождение. На рисунке 3 представлены сравнительные графики результатов моделирования и проведения эксперимента.

При моделировании в первоначальном варианте максимальное отклонение от экспериментальных данных составило 5,6 °С, а среднее 2,1 °С. Это обусловлено более быстрым нагревом воздуха, который происходит из-за более низко-

го воздушного сопротивления кассеты. Приведем вводные параметры математической модели в соответствии с разработанной конструкцией. Изменим суммарное количество отверстий в касете с 18 на 4 шт., температуру окружающей среды с 23 на 24,5 °С и коэффициенты ПИД-регулятора электроннагревателя с $k_{p1} = 0,35$, $k_{i1} = 0$, $k_{d1} = 0$ на $k_{p1} = 0,35$, $k_{i1} = 0,5$, $k_{d1} = 120$. В результате скорректированного моделирования (см. рис. 3) максимальное отклонение составило 0,6 °С, а среднее 0,1 °С. Данный уровень точности входит в пределы допустимой погрешности ± 1 °С, следовательно, примем уровень качества моделирования приемлемым.

Для построения трехмерных графиков относительной неравномерности температурного поля выберем установившийся режим, соответствующий временной точке $t = 330$ мин., в которой показания температуры NTC-термисторов равно: $T_{10} = 64,74$ °С, $T_{11} = 47,41$ °С, $T_{12} = 69,59$ °С, $T_{13} = 49,83$ °С, $T_{14} = 72,53$ °С, $T_{20} = 36,47$ °С, $T_{21} = 36,52$ °С, $T_{22} = 36,91$ °С, $T_{23} = 35,85$ °С, $T_{24} = 38,67$ °С. Переведем температурные показания камеры 1 в относительное поле неравномерности по формуле (5).

На рисунке 4 представлены поля в безразмерных величинах неравномерности температуры относительно центральной точки T_{10} для камеры 1.

Максимальная неравномерность нагрева воздушной среды в камере 1 при моделировании составила $\theta_{1.M.max} = \pm 2,51$ %, а при обработке экспериментальных данных – $\theta_{1.E.max} = \pm 3,56$ %.

Рисунок 3 – Графики сравнения динамики нагрева воздуха: А – первоначальный вариант; В – скорректированный вариант

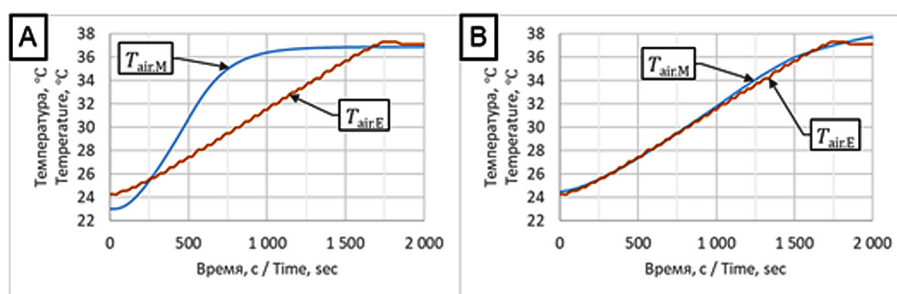
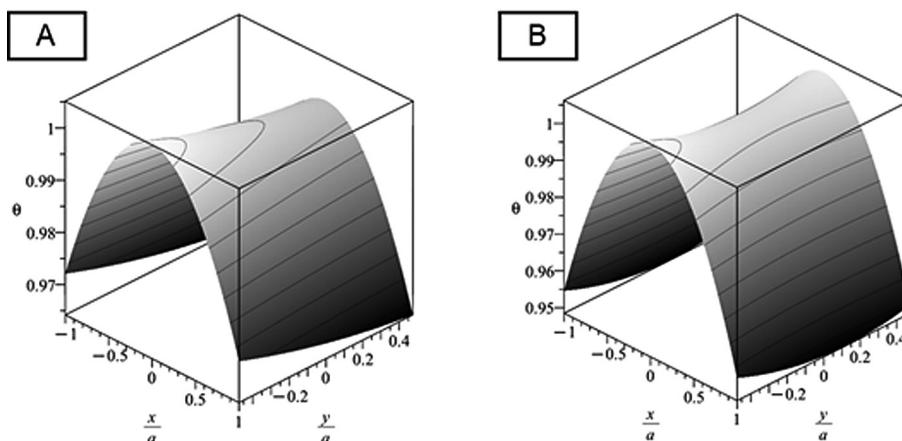


Рисунок 4 – Графики неравномерности температурного поля в камере 1: А – моделирование; В – эксперимент



Переведем температурные показания камеры 2 в относительное поле неравномерности по формуле (4). На рисунке 5 представлены поля в безразмерных величинах неравномерности температуры относительно центральной точки T_{20} для камеры 2.

Максимальная неравномерность нагрева воздушной среды в камере 2 при моделировании составила $\theta_{2.M.max} = \pm 0,66\%$, а при обработке экспериментальных данных $\theta_{2.E.max} = \pm 0,19\%$. Полученные показатели лежат в пределах допустимой погрешности $\pm 5\%$. При этом визуально формы трехмерных графиков моделирования и эксперимента совпадают, график поля температур в камере 2, полученный в ходе эксперимента, имеет обратную направленность, однако общая форма холма сохраняется. Следовательно, прием уровень качества моделирования приемлемым.

Для проверки компьютерной модели системы поддержания температуры воздуха и субстрата воспользуемся данными проверки системы поддержания температур низкотемпературного эксперимента. Как указывалось ранее, в процессе разработки фитотрона была уменьшена площадь отверстий в фитотроне. Следовательно, данные моделирования температуры воздуха и субстрата ($T_{air.M}$ и $T_{soil.M}$) не будут совпадать с экспериментальными ($T_{air.E}$ и $T_{soil.E}$). На рисунке 6 представлены сравнительные графики моделирования измерения и экспериментальные измеренные значения температуры воздуха и субстрата.

При моделировании в первоначальном варианте отклонение от экспериментальных данных составило для воздуха: максимальное $\Delta T_{air.max} = 7,8\text{ }^\circ\text{C}$, среднее $\Delta T_{air.avr} = 0,58\text{ }^\circ\text{C}$, для субстрата – максимальное $\Delta T_{soil.max} = 15,2\text{ }^\circ\text{C}$, среднее $\Delta T_{soil.avr} = 2,3\text{ }^\circ\text{C}$. Быстрый нагрев как воздуха, так и субстрата связан с большей площадью отверстий в кассете, меньшей разницей температуры внешней среды и заданным значением, и меньшей теплоемкостью выбранного материала субстрата. Проведем коррекцию вводных параметров компьютерной модели: количество отверстий в кассете уменьшено с 18 до 4 шт., температура окружающей среды снижена с 19 до 10 $^\circ\text{C}$, теплопроводность субстрата увеличена с 0,25 до 0,3 Вт/мК, теплоемкость субстрата – с 1,1 на 2,3 МДж/м³К. После коррекции параметров компьютерной модели в результате моделирования (см. рис. 6) получены следующие значения: для воздуха максимальное $\Delta T_{air.max} = 0,75\text{ }^\circ\text{C}$, среднее $\Delta T_{air.avr} = 0,1\text{ }^\circ\text{C}$, для субстрата – максимальное $\Delta T_{soil.max} = 0,79\text{ }^\circ\text{C}$, среднее $\Delta T_{soil.avr} = 0,27\text{ }^\circ\text{C}$. Данный уровень точности входит в пределы допустимой погрешности $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$, следовательно, прием уровень качества моделирования приемлемым.

Выводы:

1. Проведено сравнение данных, характеризующих работу систем нагрева разработанного фитотрона, полученных теоретическим и экспериментальными методами.
2. Результаты, полученные с помощью разработанных моделей изменения температуры

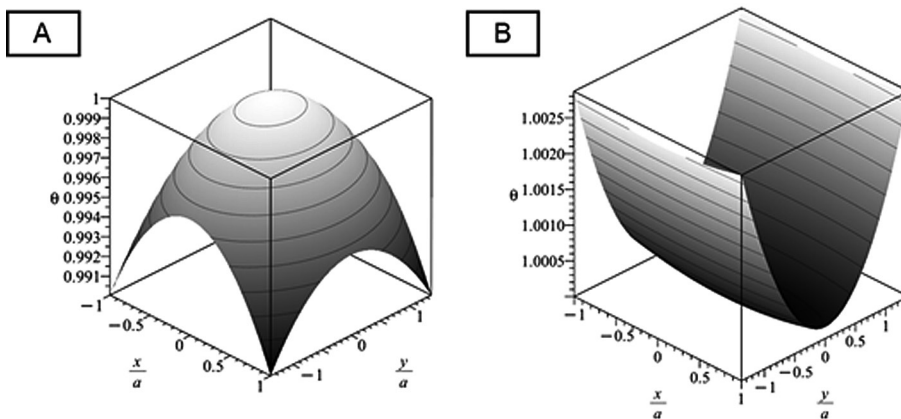


Рисунок 5 – Графики неравномерности температурного поля в камере 2: А – моделирование; Б – эксперимент

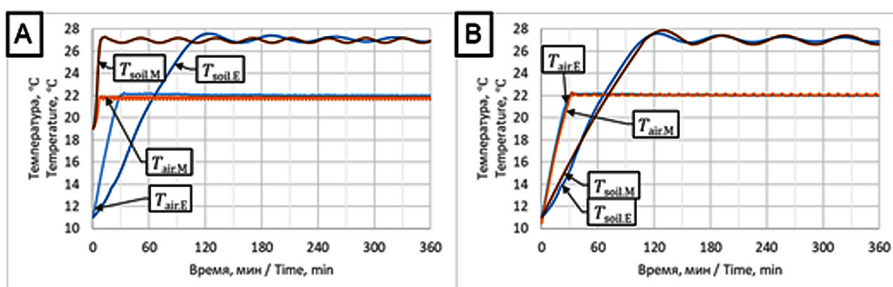


Рисунок 6 – Графики сравнения работы системы нагрева: А – первоначальный вариант; Б – скорректированный вариант

воздуха и субстрата при первичном моделировании, значительно отклоняются от экспериментальных данных, что связано с измененными вводными данными. После изменения вводных параметров в соответствии с проведенным экспериментом отклонение этих результатов моделирования не превышало пределы допустимой погрешности ± 1 °С. Результаты моделирования температурного поля соответствуют экспериментальным, следовательно, данная модель не требует корректировок.

Список источников

1. Баматов И. М. Современные методы оздоровления растений // Плодоводство и виноградарство Юга России. 2018. № 53(05). С. 67–79. DOI: 10.30679/2219-5335-2018-5-53-67-79.
2. Гусенников Е. Н., Юран С. И. Использование Comsol Multiphysics для моделирования автоматизированных процессов создания микроклимата в фитотроне // Современные энергетические аспекты развития аграрной сферы: материалы Нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Ижевск, 19 дек. 2024 г. Ижевск: УдГАУ, 2024. С. 110–117. EDN: SSESTA.
3. Гусенников Е. Н., Юран С. И. Разработка автоматизированной системы термотерапии растений на базе фитотрона // Вестник НГИЭИ. 2025. № 10(173). С. 59–70. DOI: 10.24412/2227-9407-2025-10-59-70. EDN: PFHNBW.
4. Математическое моделирование температурного поля при конвективном теплообмене в камере фитотрона / П. В. Дородов [и др.] // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 6. С. 109–117. DOI: 10.26897/2687-1149-2025-6-109-117.
5. Повышение эффективности работы теплиц / Д. А. Благодаров [и др.] // Потенциал современной науки. 2016. № 6(23). С. 20–23.
6. Повышение эффективности технологии оздоровления и первичного размножения земляники садовой в культуре in vitro / И. М. Баматов [и др.] // Известия Горского государственного аграрного университета. 2020. Т. 57, № 4. С. 183–191. DOI: 10.26897/0021-342X-2022-5-21-34. EDN: MIKMEP.
7. Сириева Т. А., Сириева Я. Н. Необходимые условия выращивания томата // Современные проблемы естествознания: материалы IV Регион. науч.-практ. конф. студентов и молодых ученых, 30 апр. 2020 г. Грозный: ЧГПУ; Махачкала: АЛЕФ, 2020. С. 141–146.
8. Сосновы В. В. Уравнение Бернулли и его практическое применение // Наука. Техника. Инновации: материалы VII Междунар. науч.-техн. конф. Усинск, 2017. С. 186–190. EDN: YNNTMX.
9. Akpenpuun T., Ogunlowo Q., Rabi A. [et al.]. Review of Temperature Management Strategies and Techniques in the Greenhouse Microenvironment. 2023; 6: 126–147.
10. Cheng S., Dang Q., Cai T. A Soil Temperature Control System for Ecological Research in Greenhouses.

Journal of Forest Research. 2012; 5: 205–208. DOI: 10.1007/BF02762403.

11. Zhang H., Sun X., Song W. Physiological and Growth Characteristics of Tomato Seedlings in Response to Low Root-zone Temperature. HortScience. 2023; 58: 442–448. DOI: 10.21273/HORTSCI16924-22.

12. Shamshiri R., Jones J., Thorp K. [et al.]. Review of optimum temperature, humidity, and vapour pressure deficit for microclimate evaluation and control in greenhouse cultivation of tomato: A review. International Agrophysics. 2018; 32: 287–302. DOI: 10.1515/intag-2017-0005.

References

1. Bamatov I. M. Sovremennyye metody` ozdorovleniya rastenij // Plodovodstvo i vinogradarstvo Yuga Rossii. 2018. № 53(05). S. 67–79. DOI: 10.30679/2219-5335-2018-5-53-67-79.
2. Gusennikov E. N., Yuran S. I. Ispol`zovanie Comsol Multiphysics dlya modelirovaniya avtomatizirovanny`x processov sozdaniya mikroklimate v fitotrone // Sovremennyye `nergeticheskie aspekty` razvitiya agrarnoj sfery: materialy` Nacz. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem, Izhevsk, 19 dek. 2024 g. Izhevsk: UdGAU, 2024. S. 110–117. EDN: SSESTA.
3. Gusennikov E. N., Yuran S. I. Razrabotka avtomatizirovannoj sistemy` termoterapii rastenij na baze fitotrona // Vestnik NGIE'I. 2025. № 10(173). S. 59–70. DOI: 10.24412/2227-9407-2025-10-59-70. EDN: PFHNBW.
4. Matematicheskoe modelirovanie temperaturnogo polya pri konvektivnom teploobmene v kamere fitotrona / P. V. Dorodov [i dr.] // Agroinzheneriya. 2025. T. 27, № 6. S. 109–117. DOI: 10.26897/2687-1149-2025-6-109-117.
5. Povy`shenie `ffektivnosti raboty` teplic / D. A. Blagodarov [i dr.] // Potencial sovremennoj nauki. 2016. № 6(23). S. 20–23.
6. Povy`shenie `ffektivnosti texnologii ozdorovleniya i pervichnogo razmnozheniya zemlyaniki sadovoj v kul`ture in vitro / I. M. Bamatov [i dr.] // Izvestiya Gorskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2020. T. 57, № 4. S. 183–191. DOI: 10.26897/0021-342X-2022-5-21-34. EDN: MIKMEP.
7. Sirieva T. A., Sirieva Ya. N. Neobxodimy`e usloviya vy`rashhivaniya tomata // Sovremennyye problemy` estestvoznaniya: materialy` IV Region. nauch.-prakt. konf. studentov i molody`x ucheny`x, 30 apr. 2020 g. Groznyj: ChGPU; Maxachkala: ALEF, 2020. S. 141–146.
8. Sosnovy`j V. V. Uravnenie Bernulli i ego prakticheskoe primenenie // Nauka. Texnika. Innovacii: materialy` VII Mezhdunar. nauch.-texn. konf. Usinsk, 2017. S. 186–190. EDN: YNNTMX.
9. Akpenpuun T., Ogunlowo Q., Rabi A. [et al.]. Review of Temperature Management Strategies and Techniques in the Greenhouse Microenvironment. 2023; 6: 126–147.
10. Cheng S., Dang Q., Cai T. A Soil Temperature Control System for Ecological Research in Greenhouses. Journal of Forest Research. 2012; 5: 205–208. DOI: 10.1007/BF02762403.

11. Zhang H., Sun X., Song W. Physiological and Growth Characteristics of Tomato Seedlings in Response to Low Root-zone Temperature. *HortScience*. 2023; 58: 442–448. DOI: 10.21273/HORTSCI16924-22.

12. Shamshiri R. [et al.]. Review of optimum temperature, humidity, and vapour pressure deficit for microclimate evaluation and control in greenhouse cultivation of tomato: A review. *International Agrophysics*. 2018; 32: 287–302. DOI: 10.1515/intag-2017-0005.

Сведения об авторах:

Е. Н. Гусеников[✉], аспирант, <https://orcid.org/0009-0003-0723-4221>;

С. И. Юран, доктор технических наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0003-0440-0012>

Удмуртский ГАУ, 426069, Россия, Ижевск, ул. Студенческая, 11

ujhuf99@gmail.com

Original article

EXPERIMENTAL SUBSTANTIATION OF THEORETICAL MODELS OF THE PHYTOTRON HEATING SYSTEM OPERATION

Evgeniy N. Gusennikov[✉], **Sergey I. Yuran**

Udmurt State Agricultural University, Izhevsk, Russia

ujhuf99@gmail.com

Abstract. *The efficiency of a phytotron heating system directly impacts microclimate parameters, plant physiological conditions, and the reproducibility of experimental results. Therefore, experimental validation of the developed theoretical models is essential. This validation confirms the correctness of the descriptions of thermal processes and the validity of their application in the design, adjustment, and modernization of phytotrons. The aim of the study was to confirm the ability of the developed theoretical models to correctly describe thermal processes in the phytotron chamber. The study was conducted using the developed multi-purpose compact phytotron. A mathematical model of air heating dynamics, a temperature field distribution model, and a computer model for maintaining a given air and substrate temperature, implemented in the Comsol Multiphysics software package, were tested. The theoretical models are based on a description of natural convection of heated air, determined by the Bernoulli equation, and a method for separating variables to solve the differential equation for airflow energy. The experimental testing included two modes: high-temperature (37 °C for air and 42 °C for soil) and low-temperature (22 °C for air and 27 °C for soil). The validity of the models was assessed by comparing experimental and simulated data. The initial versions of the models showed significant deviations from the experimental data due to inconsistencies between the input parameters of the actual design and the experimental conditions. After adjusting the model parameters, the maximum deviations in air and soil temperatures did not exceed ± 1 °C, and the temperature field unevenness indicators were within the permissible error limits. The temperature distribution shapes obtained as a result of the simulation and experiment showed qualitative agreement. The theoretical models of the phytotron heating system operation were experimentally validated. It has been established that with correct input parameters the developed models adequately describe the heating dynamics and temperature distribution and can be used for further calculations and design solutions without additional adjustments.*

Keywords: *phytotron, temperature control, heating system, mathematical modeling, computer modeling, protected ground.*

For citation: *Gusennikov E. N., Yuran S. I. Experimental substantiation of theoretical models of the phytotron heating system operation. The Bulletin of Izhevsk State Agricultural Academy. 2026; 1 (85): 166-173. (In Russ.). https://doi.org/10.48012/1817-5457_2026_1_166-173.*

Authors:

E. N. Gusennikov[✉], Postgraduate student, <https://orcid.org/0009-0003-0723-4221>;

S. I. Yuran, Doctor of Technical Sciences, Professor, <https://orcid.org/0000-0003-0440-0012>

Udmurt State Agricultural University, 11 Studencheskaya St., Izhevsk, Russia, 426069

ujhuf99@gmail.com

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: the authors declare that they have no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 28.10.2025; одобрена после рецензирования 19.02.2026; принята к публикации 03.03.2026.

The article was submitted 28.10.2025; approved after reviewing 19.02.2026; accepted for publication 03.03.2026.