

## Разработка и моделирование роботизированной системы контроля микроклимата для биотехнологических применений

У. Р. Тахаев, М. Р. Исаева<sup>✉</sup>, А. А-В. Садулаев, А. И. Насуханов

Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М. Д. Миллионщикова  
364051, Россия, г. Грозный, проспект имени Х. А. Исаева, 100

**Аннотация.** Актуальность работы связана с развитием агробототехники и автономных систем для биотехнологий, где точное управление параметрами среды является критически важной задачей. Важным условием эффективного функционирования тепличного комплекса в зимнее время года и получения хорошего урожая, даже в условиях идеальной герметизации, является создание оптимального климата.

**Цель исследования** – разработка автономной робототехнической системы управления микроклиматом с функциями этапного адаптивного управления, диагностики и удаленного взаимодействия на базе доступной микроконтроллерной платформы.

**Методы исследования** включали аппаратные испытания на физическом прототипе (контроллер ESP8266, датчик SCD40, исполнительные устройства), программный мониторинг данных через REST API с интервалом 6 секунд и протокол испытаний контуров влажности, CO<sub>2</sub> (релейное управление) и температуры (ПИД-регулятор). Обработка данных выполнялась на JavaScript с возможностью визуализации в MATLAB, Python или Excel.

**Результаты.** Разработана и апробирована автономная система управления микроклиматом на базе микроконтроллера ESP8266, реализующая этапное адаптивное управление и удаленный мониторинг. Экспериментально подтверждена эффективность ключевых алгоритмов: релейное управление обеспечивает надежное снижение избыточной влажности и концентрации CO<sub>2</sub>, а реализация ПИД-регулятора позволяет достигать плавного и точного температурного контроля без перерегулирования. Полученные данные выявили области для оптимизации, такие как учет тепловой инерции для совершенствования алгоритмов и доработка конструкции для повышения энергоэффективности, что подтверждает практическую значимость системы как готового, экономичного и масштабируемого решения для задач точного земледелия и биотехнологий.

**Ключевые слова:** робототехнический комплекс, управление микроклиматом, биотехнологии, автономная система, ESP8266, прецизионное сельское хозяйство, интеллектуальное управление

Поступила 13.12.2025, одобрена после рецензирования 26.01.2026, принята к публикации 10.02.2026

**Для цитирования.** Тахаев У. Р., Исаева М. Р., Садулаев А. А-В., Насуханов А. И. Разработка и моделирование роботизированной системы контроля микроклимата для биотехнологических применений // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2026. Т. 28. № 1. С. 57–74. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-1-57-74

## Development and modeling of a robotic microclimate control system for biotechnological applications

U.R. Takhaev, M.R. Isaeva<sup>✉</sup>, A.A-V. Sadulaev, A.I. Nasukhanov

Grozny State Oil Technical University named after academician M.D. Millionshchikov  
100, Isaev avenue, Grozny, 364051, Russia

**Abstract.** The relevance of this study is related to the development of agricultural robotics and autonomous systems for biotechnology, where precise control of environmental parameters is critical. Creating an optimal climate is essential for the efficient operation of a greenhouse complex during the winter and the production of a good harvest, even under ideal sealed conditions.

**Aim.** The study is to develop an autonomous robotic microclimate control system with stage-by-stage adaptive control, diagnostics, and remote interaction functions based on an affordable microcontroller platform.

**The research methods** include hardware testing on a physical prototype (ESP8266 controller, SCD40 sensor, actuators), software data monitoring via a REST API at 6-second intervals, and a test protocol for the humidity, CO<sub>2</sub> (relay control), and temperature (PID controller) circuits. Data processing was performed in JavaScript with the ability to visualize in MATLAB, Python, or Excel.

**Results.** An autonomous microclimate control system based on the ESP8266 microcontroller, implementing stage-by-stage adaptive control and remote monitoring, have been developed and tested. The effectiveness of the key algorithms have been experimentally confirmed: relay control ensures reliable reduction of excess humidity and CO<sub>2</sub> concentration, while the implementation of a PID controller enables smooth and precise temperature control without overshoot. The obtained data identified areas for optimization, such as taking into account thermal inertia to improve the algorithms and refining the design to increase energy efficiency, confirming the practical value of the system as a ready-made, cost-effective, and scalable solution for precision agriculture and biotechnology.

**Keywords:** robotic complex, microclimate control, biotechnology, autonomous system, ESP8266, precision agriculture, and intelligent control

Submitted 13.12.2025,

approved after reviewing 26.01.2026,

accepted for publication 10.02.2026

**For citation.** Takhaev U.R., Isaeva M.R., Sadulaev A.A-V., Nasukhanov A.I. Development and modeling of a robotic microclimate control system for biotechnological applications. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2026. Vol. 28. No. 1. Pp. 57–74. DOI: 10.35330/1991-6639-2026-28-1-57-74

### ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы связана с развитием агроробототехники и автономных систем для биотехнологий, где точное управление параметрами среды является критически важной задачей. Важным условием эффективного функционирования тепличного комплекса в зимнее время года и получения хорошего урожая, даже в условиях идеальной герметизации, является создание оптимального климата [9, 10].

Проблематика: сложность одновременного контроля нескольких взаимосвязанных параметров (Т, Н, СО<sub>2</sub>, свет), необходимость длительной автономной работы, обеспечение отказоустойчивости.



Content is available under license [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Постановка задачи: разработка автономной робототехнической системы управления микроклиматом с функциями этапного адаптивного управления, диагностики и удаленного взаимодействия на базе доступной микроконтроллерной платформы.

#### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для верификации работоспособности и оценки эффективности разработанной системы управления микроклиматом был проведен комплекс испытаний на физическом прототипе. Методология включала следующие этапы:

*Аппаратная конфигурация.* Испытания проводились на изолированной тестовой камере (боксе) с внутренними размерами 42×28×22 см. В качестве управляющего контроллера использовался модуль ESP8266, сенсорного модуля – датчик SCD40 (I2C, адрес 0x62). Исполнительными устройствами выступали: нагревательная пластина (управление через ШИМ на GPIO5), вентилятор (цифровое управление, GPIO4) и пароувлажнитель (цифровое управление, GPIO15). Параметры окружающей среды в лаборатории составляли: температура 15.5 °C, влажность 78 %, концентрация CO<sub>2</sub> – ~620 ppm.

*Программное обеспечение для сбора данных.* Для объективной фиксации динамики процессов был разработан и запущен в браузере скрипт на JavaScript. Скрипт с интервалом в 6 секунд опрашивал REST API системы (GET /api/status), получая JSON-объект с текущими показаниями датчиков и состояниями исполнительных устройств. Все данные с привязкой ко времени записывались в массив для последующего анализа.

#### *Протокол испытаний*

Испытание контуров влажности и CO<sub>2</sub>. В камере искусственно создавались начальные условия, значительно превышающие заданные уставки: влажность ~99 %, концентрация CO<sub>2</sub> – ~3700 ppm. После этого система переводилась в автоматический режим, где контур управления по релейному закону должен был снизить параметры до целевых значений (уставки устанавливались программно). Вентилятор оставался включенным на протяжении всего эксперимента, что имитировало режим активного проветривания.

Испытание температурного контура. Начальная температура в камере соответствовала температуре окружающей среды (15.5 °C). Задачей системы было обеспечить нагрев и поддержание температуры на уровне 23 °C с использованием ПИД-регулятора, управляющего нагревателем через ШИМ. После достижения уставки и выключения нагревателя фиксировался процесс естественного остывания камеры.

Обработка и визуализация данных. Первичная обработка сырых данных (логов) проводилась средствами JavaScript с выводом в консоль. Для анализа динамики и построения графиков переходных процессов данные могут быть импортированы в специализированное ПО, такое как MATLAB, Python (библиотеки Matplotlib, Pandas) или даже в табличный процессор Excel.

#### *Краткое описание*

Система автоматизации на базе esp8266 для контроля выращивания грибов. Система позволяет задавать разные этапы с контролем разных параметров, а именно: температуры, влажности, CO<sub>2</sub>, света. Для управления устройствами использовался мосфет IRLB3034, так как esp8266 выдает сигнал 3.0 вольт и не более 200 мА, а для работы устройств нужно использовать до 12 вольт и до 4 ампер.

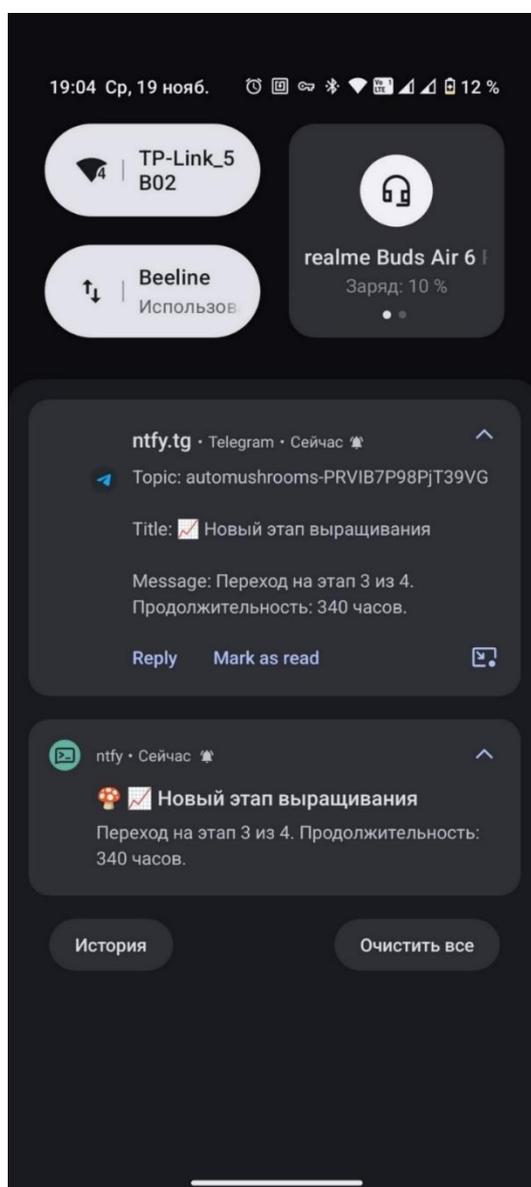
Также система подключается к внешней сети через WIFI, это нужно для отправки уведомлений через сервис ntfy.sh. Сам сервис ntfy.sh предоставляет большое количество разных вариантов получения уведомлений. Самые распространенные – через их мобильное приложение и через чат-боты в мессенджерах. Также используется светодиод с самого микроконтроллера для индикации корректности работы. Для удобной отладки во время разработки основные данные с датчиков и устройств выводятся в serial. Для предотвращения

перегрева нагревательной пластины используется широтно-импульсная модуляция, которая при работе с высокоскоростным транзистором снижает мощность.

Для выявления проблем с внешними устройствами используется алгоритм, который проверяет работу устройств больше определенного времени. К примеру, для вентилятора, нагревательной пластины, увлажнителя (парообразователя) если устройство включено более 5 минут и контролируемые значения не вернулись в норму, отправляется уведомление. Для светодиодной ленты время увеличено до 12 часов, это приблизительное максимальное время, нужное для освещения вешенок.

В коде заложена возможность конфигурировать систему с помощью веб-запросов. Есть запросы для получения актуальных значений с датчика и актуального состояния работы устройств. Также есть возможность получения списка этапов, установки списка этапов, сброс временного счетчика (рис. 1).

Устройство периодически сохраняет значения в постоянной памяти – нужно для контроля в случае проблем с питанием, чтобы при отключении питания устройство не начинало прогресс заново.



**Рис. 1.** Скриншот уведомлений / **Fig. 1.** Screenshot of notifications

ПОДРОБНОЕ ОПИСАНИЕ ФУНКЦИОНАЛА КОНТРОЛЛЕРА  
ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ ГРИБОВ*Общее описание*

Система автоматизации на базе ESP8266 для управления микроклиматом при выращивании грибов. Контролирует температуру, влажность, уровень CO<sub>2</sub> и освещение по заданным этапам выращивания.

*Аппаратная часть*

Датчик SCD40 (I2C, адрес 0x62) измеряет температуру, влажность и CO<sub>2</sub>. Использует I2C на пинах GPIO12 (D6) для SDA и GPIO13 (D7) для SCL. Частота I2C 50 кГц. Автоматически перезапускается при ошибках чтения.

*Управляемые устройства*

Нагреватель подключен к GPIO5 (D1), управляется через ШИМ с напряжением около 7 В для снижения мощности. Вентилятор на GPIO4 (D2), цифровое управление. Увлажнитель на GPIO15 (D8), цифровое управление. Лампа освещения на GPIO14 (D5), цифровое управление. Встроенный светодиод (LED\_BUILTIN) в самой ESP8266 для индикации состояния системы.

*Основной функционал**Система этапов выращивания*

Поддержка до 10 этапов. Для каждого этапа: название (до 31 символа), продолжительность в часах, для температуры, влажности, CO<sub>2</sub> есть возможность включения/выключения контроля на каждом этапе, минимальные и максимальные значения, а также уведомления в случае, если эти устройства работают более 5 минут. Настройки освещения (часы включения и выключения) с возможностью включения/выключения контроля, а также уведомлениями при работе более 12 часов. Автоматический переход между этапами по истечении времени. При завершении всех этапов отправляется уведомление и выключаются все устройства.

*Контроль параметров среды*

Температура: включение нагревателя при температуре ниже минимума, выключение при превышении максимума, использование ШИМ для снижения напряжения.

Влажность: включение увлажнителя при влажности ниже минимума, выключение при превышении максимума.

CO<sub>2</sub>: включение вентилятора при превышении максимума, выключение при достижении минимума, поддержка минимального уровня (заготовка для подачи CO<sub>2</sub>).

Освещение: циклическое управление на основе времени от начала этапа, цикл включает свет на заданное количество часов и выключает на заданное количество часов, автоматический пересчет при переходе между этапами.

*Система сохранения состояния*

Используется EEPROM для хранения конфигурации этапов и времени работы. Автоматическое сохранение времени каждые 30 минут в постоянной памяти в случае проблем с электропитанием для сохранения прогресса. Восстановление состояния после перезагрузки: текущий этап, прошедшее время этапа в минутах, все настройки этапов.

*Веб-интерфейс*

Эндпоинты APIGET / – главная страница, отдает файл interface.html из LittleFS, использует стриминг для экономии памяти.

GET /api/status – получение текущего состояния системы. Возвращает JSON с показаниями датчиков (температура, влажность, CO<sub>2</sub>), состоянием устройств (нагреватель, вентилятор,

увлажнитель, лампа), информацией о текущем этапе (номер, прогресс, продолжительность), настройками текущего этапа (диапазоны температуры, влажности, CO<sub>2</sub>, освещения), детальной информацией об освещении (включено/выключено, текущий час цикла, фаза света).

GET /api/config – получение конфигурации всех этапов выращивания.

POST /api/config – сохранение конфигурации. Принимает JSON с массивом этапов, сохраняет в EEPROM, не сбрасывает текущий этап при сохранении.

POST /api/reset – сброс системы на первый этап, выключение всех устройств, обнуление времени.

GET /api/notifications – получение статуса уведомлений.

POST /api/notifications – включение или выключение уведомлений.

POST /api/notifications/test – отправка тестового уведомления.

Система уведомлений через ntfy.sh

Использует сервис ntfy.sh для отправки push-уведомлений. Настраиваемый топик для уведомлений. Поддержка приоритетов от 1 (низкий) до 5 (критический). Уведомления отправляются при запуске системы, переходе на новый этап, завершении всех этапов, проблемах с датчиком, долгой работе устройств (более 5 минут), критических ошибках (зависание системы). Для получения уведомлений можно использовать мобильное приложение ntfy.sh или чат-бот в телеграмме.

*Мониторинг и защита*

Мониторинг датчика SCD40: проверка готовности данных каждые 6 секунд, счетчик ошибок (порог 3 подряд), автоматический перезапуск датчика при проблемах, уведомления о проблемах с датчиком.

Мониторинг времени работы устройств: предупреждение при работе более 5 минут для нагревателя, вентилятора, увлажнителя; для лампы предупреждение при работе более 12 часов подряд.

Индикация состояния через LED: нормальная работа – медленное мигание (1 раз в 2 секунды), ошибка датчика – быстрое мигание (3 раза по 200 мс), проблемы с WiFi – очень быстрое мигание (5 раз по 100 мс), все этапы завершены – длинные вспышки (2 раза по 1 секунде). Из-за задержек в выполнении кода все таймеры индикации работают дольше, чем положено.

*Сеть и подключение*

Подключение к WiFi сети с заданными учетными данными. mDNS для доступа по имени esp-m.local. Автоматическое переподключение при обрыве соединения. Восстановление mDNS после реконнекта. Настройка hostname как esp-m.

*Файловая система*

Использование LittleFS для хранения веб-интерфейса (interface.html). Стриминг больших файлов для экономии памяти.

*Временные интервалы*

Чтение датчиков каждые 6 секунд. Контроль параметров среды каждые 6 секунд. Сохранение времени в EEPROM каждые 30 минут. Обновление времени этапа каждую минуту. Мигание LED каждые 2 секунды

Валидация данных при загрузке конфигурации. Защита от переполнения (максимум 10 этапов). Восстановление после сбоев через сохранение состояния в EEPROM. Мониторинг свободной памяти с выводом в Serial.

*Особенности реализации*

ШИМ для нагревателя снижает напряжение вместо полных 12 В. Циклическое освещение рассчитывается на основе времени от начала этапа, а не абсолютного времени. Стриминг HTML файлов для экономии памяти при отправке больших файлов. Медленная частота I2C (50 кГц) для стабильной работы с датчиком SCD40. Отслеживание времени работы устройств с предупреждениями о долгой работе.

### Логирование

В Serial порт выводятся показания датчиков, состояния устройств, переходы между этапами, ошибки и предупреждения, состояние WiFi соединения, операции с EEPROM, статус отправки уведомлений.

Архитектурная модульность и программно-конфигурируемый интерфейс (веб-API) закладывают основу для последующей системной интеграции в распределенные робототехнические платформы, такие как мобильные агротехнические комплексы или сети управляемых биореакторов.

### Обзор системы

Система управления микроклиматом включает три независимых контура:

1. **Контур температуры** (PID регулятор + нагреватель).
2. **Контур влажности** (Relay регулятор + увлажнитель).
3. **Контур CO<sub>2</sub>** (Relay регулятор + вентилятор).

Точность управления температурным режимом достигается за счет применения классического метода робототехники – ПИД-регулирования, реализованного в контуре ШИМ-управления нагревательным элементом [2, 6].

## МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ КОМПОНЕНТОВ

### 1. Температурный контур

Уравнение теплового баланса камеры (1.1) и ее передаточная функция (1.2) получены на основе классической теории теплопередачи и модели инерционного звена [3, 5]. Параметры ПИД-регулятора (1.3) были подобраны на основе анализа модели и рекомендаций по настройке [2,6].

#### 1.1. Уравнение теплового баланса камеры:

$$C \frac{dT}{dt} = P_{heat} - \lambda(T - T_{env}),$$

где:

- $C = 10000 \text{ Дж/}^\circ\text{C}$  – теплоемкость камеры;
- $\lambda = 10 \text{ Вт/}^\circ\text{C}$  – коэффициент теплопотерь;
- $T_{env} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$  – температура окружающей среды;
- $P_{heat}$  – мощность нагревателя.

#### 1.2. Передаточная функция температурной модели:

$$G_T(s) = \frac{T(s)}{P_{heat}(s)} = \frac{K_T}{\tau_T s + 1}$$

с параметрами:

$K_T = 0,1 \text{ }^\circ\text{C/Вт}$  – статический коэффициент;

$\tau_T = \frac{C}{\lambda} = 1000 \text{ с}$  – постоянная времени.

#### 1.3. PID-регулятор температуры:

$$u_T(t) = K_P e_T(t) + K_I \int_0^t e_T(\tau) \cdot d\tau + K_D \cdot \frac{de_T(t)}{dt},$$

где:

- $e_T(\tau) = T_{set}(t) - T(t)$  – ошибка регулирования;
- $K_P = 5, K_I = 0.05, K_D = 2$ ;
- $T_{set}(t) = \begin{cases} 15 \text{ }^\circ\text{C}, & t < 100 \text{ с} \\ 23 \text{ }^\circ\text{C}, & t \geq 100 \text{ с} \end{cases}$

## 2. Влажностный контур

Управление в этих контурах построено по релейному (двухпозиционному) закону с гистерезисной зоной нечувствительности (2.2, 3.2). Такой подход, широко описанный в литературе [5, 12], обеспечивает простую и надежную реализацию для объектов с большой инерционностью, таких как влажность и концентрация газа. Динамические модели контуров (2.1, 3.1) соответствуют аperiodическим звеньям первого порядка [5, 8].

2.1. Динамика влажности:

$$\tau_H \frac{dH}{dt} + H = K_H u_H,$$

где:

$\tau_H = 200$  с – постоянная времени.

2.2. Relay – регулятор влажности:

$$u_H(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } e_H(t) \geq 1\% \\ 0, & \text{если } e_H(t) \leq -1\%, \\ \text{предыдущее состояние,} & \text{иначе} \end{cases}$$

где:

•  $e_H(t) = H_{set} - H(t)$  – ошибка регулирования;

•  $H_{set} = 90\%$  – уставка влажности.

2.3. Ограничение выходного сигнала:

$$0 \leq H(t) \leq 100\%.$$

## 3. Контур CO<sub>2</sub>

3.1. Динамика концентрации CO<sub>2</sub>:

$$\tau_C \frac{dC}{dt} + C = C_{base} - K_C u_C,$$

где:

•  $\tau_C = 500$  с – постоянная времени;

•  $C_{base} = 800$  ppm – базовая концентрация;

•  $K_C = 100$  ppm/ ед. управления.

3.2. Relay-регулятор CO<sub>2</sub>:

$$u_C(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } e_C(t) \geq 50 \text{ ppm} \\ 0, & \text{если } e_C(t) \leq -50 \text{ ppm}, \\ \text{предыдущее состояние,} & \text{иначе} \end{cases}$$

где:

•  $e_C(t) = C(t) - C_{set}$  – ошибка регулирования;

•  $C_{set} = 1000$  ppm – уставка CO<sub>2</sub>.

3.3. Ограничение выходного сигнала:

$$300 \leq C(t) \leq 2000 \text{ ppm}.$$

Для возможности изучения разработанной системы регулирования была разработана математическая модель в программе MATLAB SIMULINK [15]. Данная программа обладает быстрым математическим ядром, оптимальной генерацией кода, высокой гибкостью, что значительно сокращает сроки реализации. На рисунке 2 представлена разработанная модель, где каждый компонент представлен в виде блока, что упрощает визуальный вид.

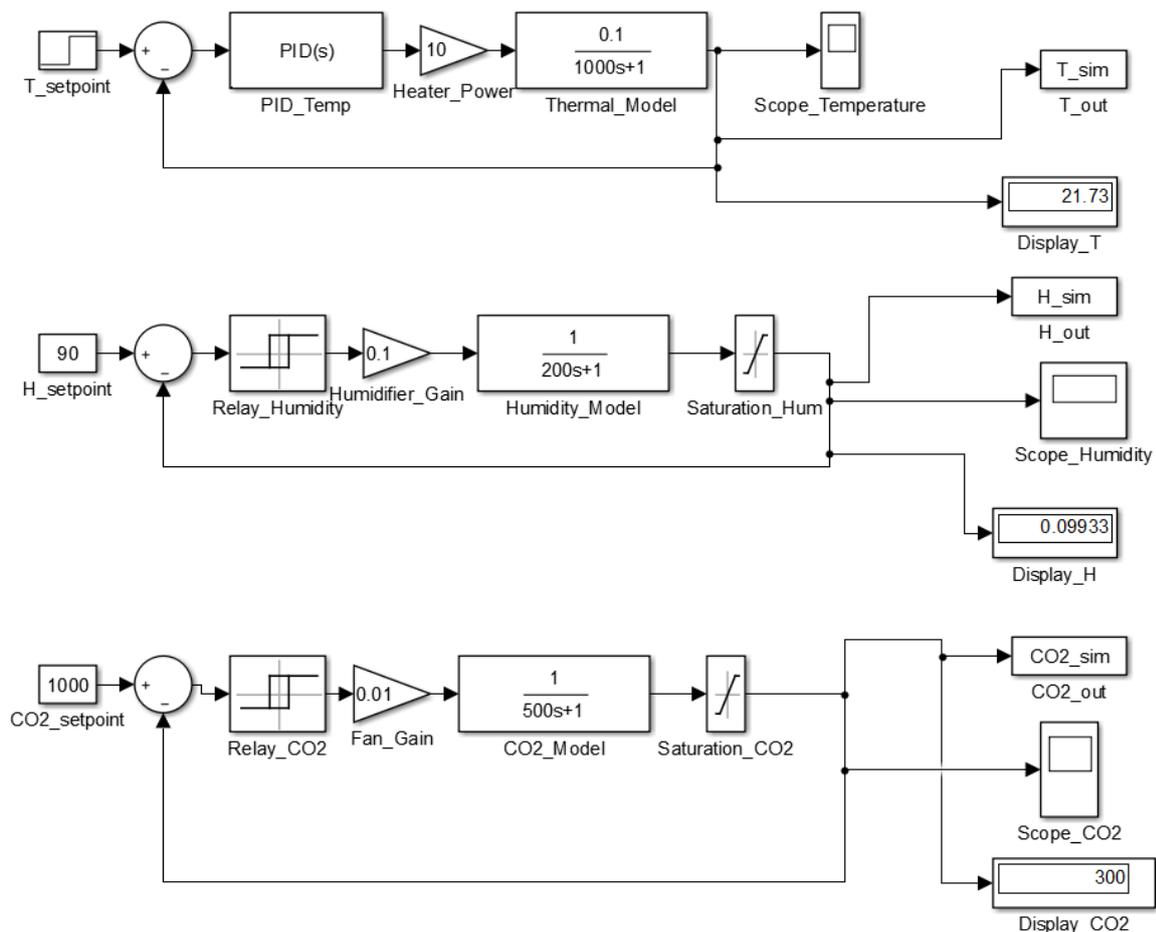


Рис. 2. Математическая модель / Fig. 2. Mathematical model

После компиляции модели были получены графики основных параметров процесса (рис. 3).

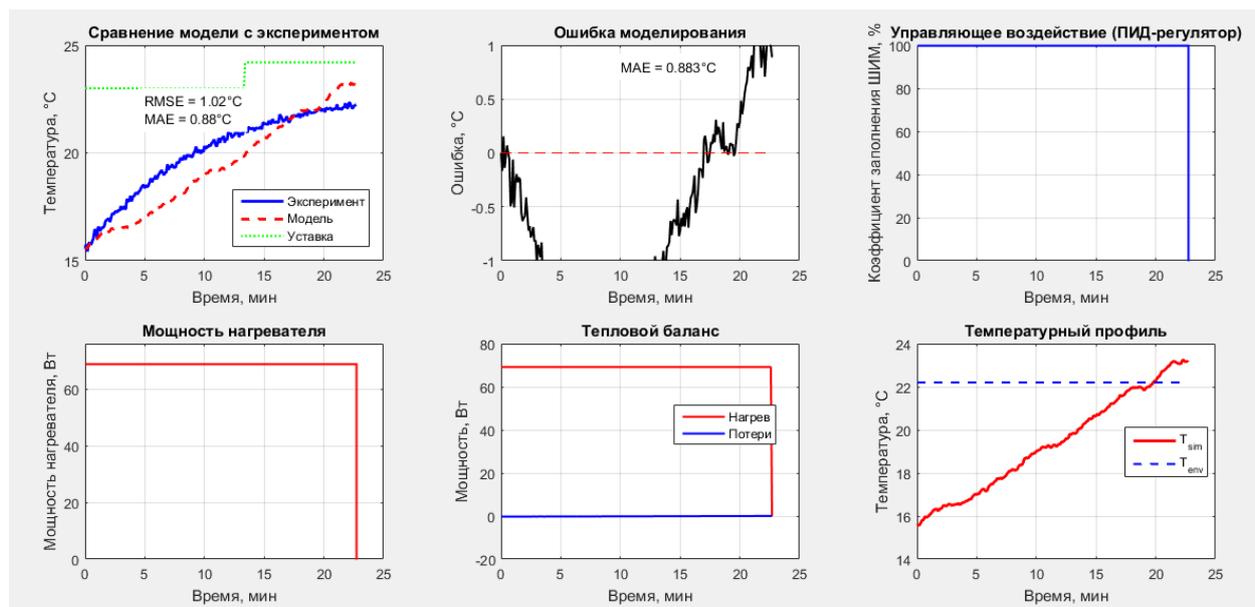
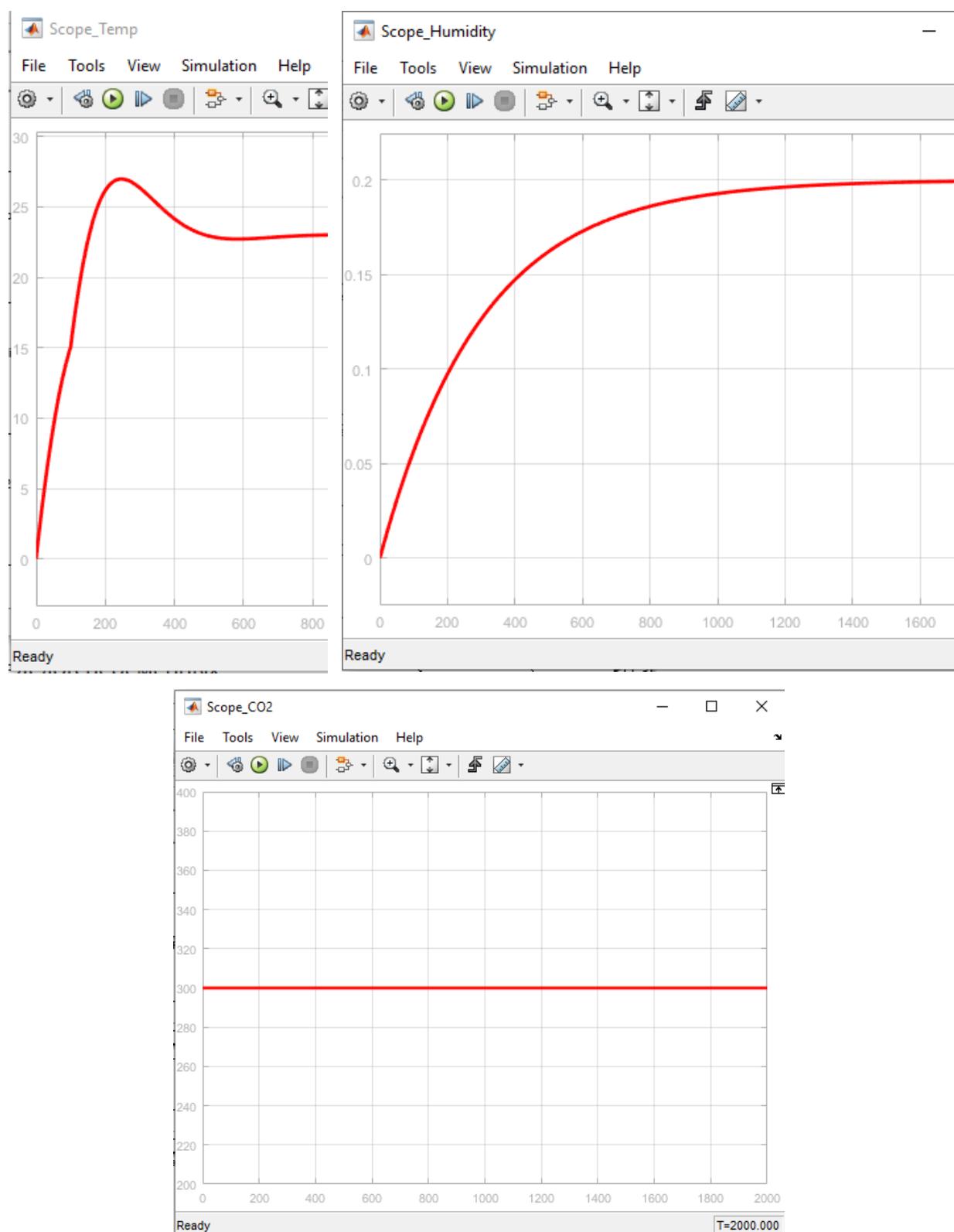


Рис. 3. График основных параметров системы

Fig. 3. Graph of the main system parameters

А также были получены графики переходных процессов каждого контура (рис. 4). Моделирование позволило оценить переходные процессы и согласовать параметры регуляторов до натурных испытаний, что соответствует современному инженерному подходу к проектированию систем управления [5, 15].



**Рис. 4.** Графики переходных процессов / **Fig. 4.** Graphs of transient processes

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Экспериментальные испытания подтвердили работоспособность основных контуров управления и позволили количественно оценить их динамические характеристики.

*Эффективность снижения влажности и концентрации CO<sub>2</sub>.*

Принудительная вентиляция продемонстрировала высокую эффективность в выравнивании параметров микроклимата камеры с внешней средой.

*По влажности.* За 600 секунд (10 минут) работы вентилятора влажность была снижена с 99,0 до 88,1 % ( $\Delta H = -10,9\%$ ). Наиболее интенсивное снижение (с 99 до ~92 %) произошло в первые 180 секунд (рис. 5).

*По CO<sub>2</sub>.* Концентрация диоксида углерода упала с 3717 ppm до примерно 647 ppm ( $\Delta CO_2 = -3070$  ppm) за тот же промежуток времени. Критический уровень в 1000 ppm был преодолен примерно за 160 секунд. Данные показывают экспоненциальный характер снижения концентрации, что соответствует теоретической модели первого порядка.

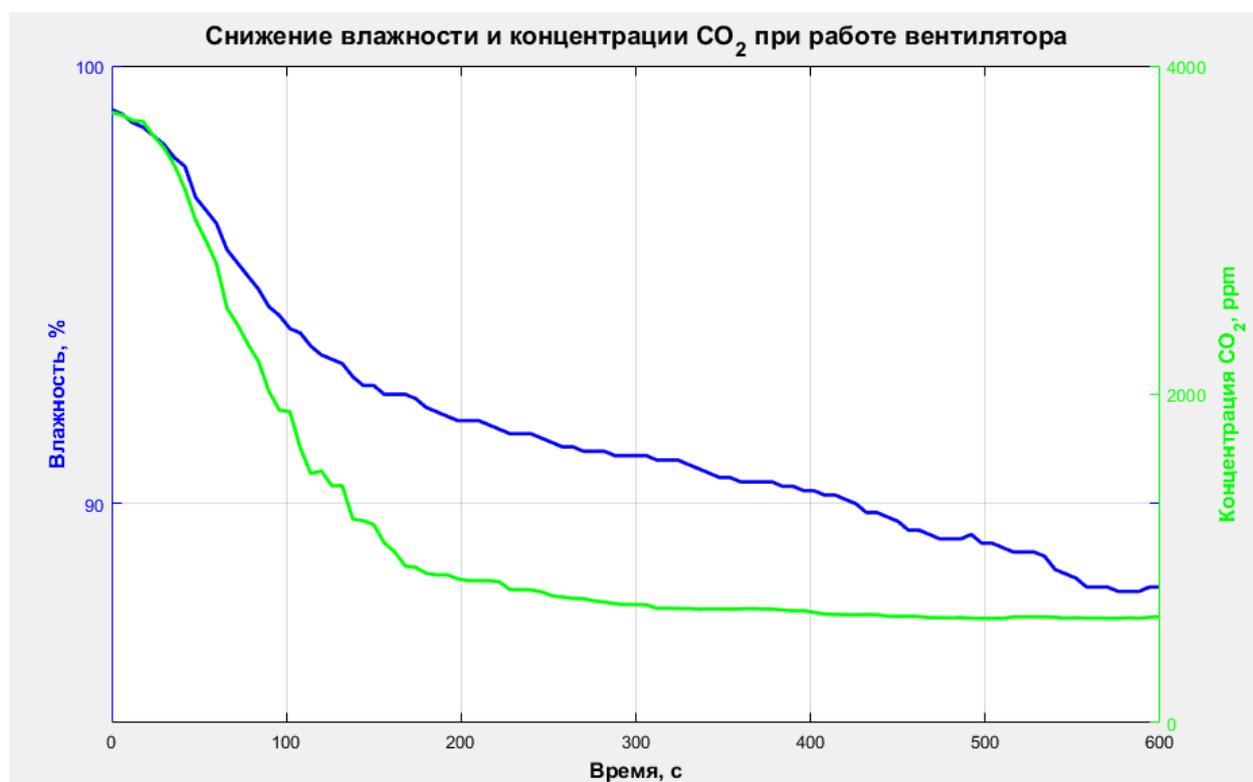


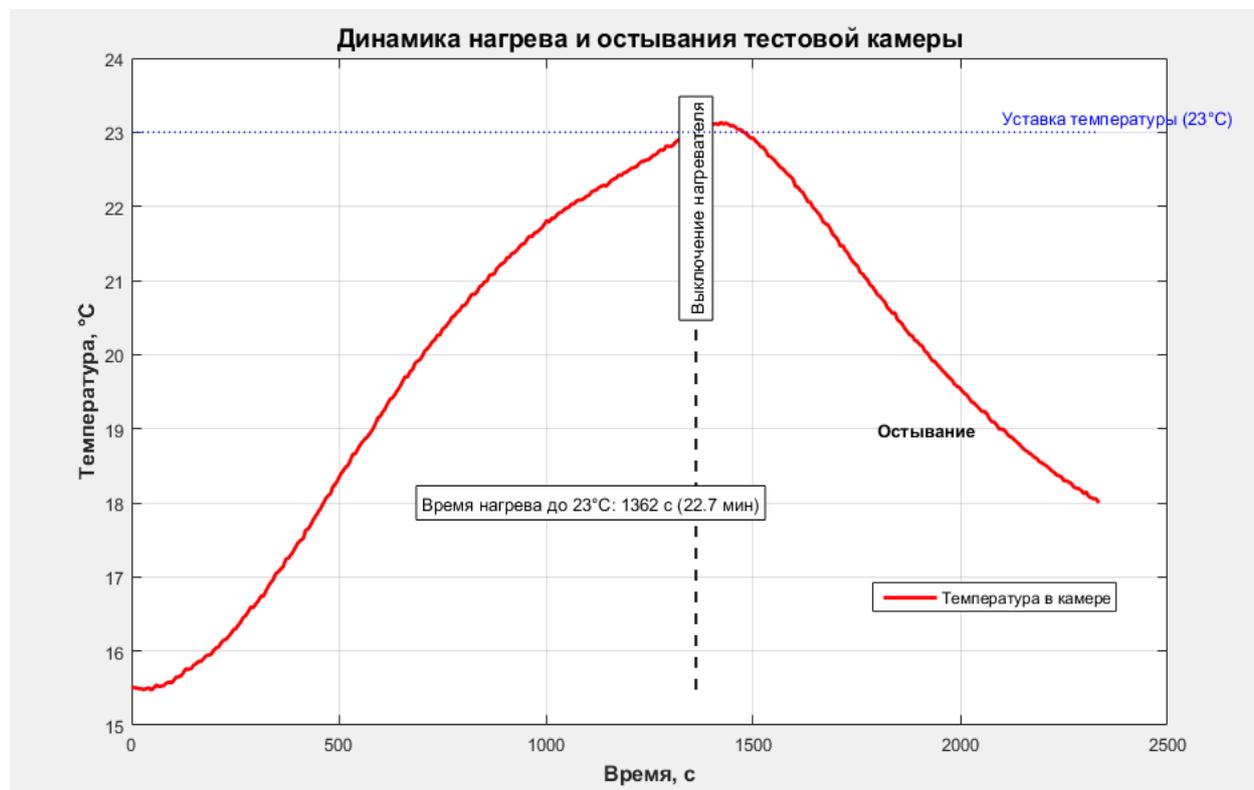
Рис. 5. График влажности и CO<sub>2</sub> / Fig. 5. Graph for Humidity and CO<sub>2</sub>

*Динамика температурного контура.* Реализованный ПИД-регулятор успешно справился с задачей нагрева.

*Нагрев.* Подъем температуры с 15,5 °С до заданной уставки 23,0 °С занял 1362 секунды (около 22,7 минут). График нагрева (рис. 6) носит характер апериодического звена с практически постоянной скоростью нарастания на основном участке, что свидетельствует о сбалансированной мощности нагревателя и теплопотерях. Перерегулирование при выходе на уставку отсутствовало.

*Инерционность системы.* После отключения нагревателя в момент  $t = 1362$  с температура продолжила рост на 0,04 °С в течение следующих 6 секунд из-за тепловой инерции нагревательного элемента, достигнув локального максимума 23,04 °С. Это подтверждает необходимость учета инерционности в алгоритме управления.

*Охлаждение.* Процесс остывания камеры после выключения нагрева до температуры 18 °С занял примерно 900 секунд (15 минут). Анализ кривой охлаждения позволяет оценить постоянную времени теплового контура камеры, которая в данных условиях составила порядка нескольких сотен секунд.



*Рис. 6. График изменения температуры*

*Fig. 6. Graph for Temperature change*

*Работоспособность систем мониторинга и взаимодействия.* В течение всех испытаний штатно функционировали вспомогательные подсистемы:

- Веб-интерфейс (API /api/status) обеспечивал стабильную и бесперебойную выдачу данных для внешнего скрипта сбора.
- Система диагностики корректно отслеживала состояние датчика SCD40, не зафиксировав сбоев за время эксперимента.
- Работа вентилятора непрерывно в течение 10 минут и нагревателя в течение 22.7 минут не вызвала срабатывания алгоритма отправки уведомлений о "долгой работе", так как это время было в пределах заданных лимитов (5 минут для вентилятора и нагревателя), что подтверждает корректность настройки порогов.

Представленная система, реализующая этапное адаптивное управление, позволяет программно задавать и точно поддерживать уникальные наборы параметров (Т, Н, CO<sub>2</sub>, свет) для каждой фазы развития биологического объекта (инкубация, плодоношение, созревание). Это напрямую создает предпосылки для:

- повышения выхода биомассы (урожайности) за счет оптимизации условий на каждом этапе;
- улучшения качества продукции (форма, размер, цвет) за счет точного контроля морфогенных факторов (CO<sub>2</sub>, свет);

- сокращения продолжительности производственного цикла за счет исключения периодов стресса и задержки развития;
- снижения риска бактериального и грибкового загрязнения за счет исключения периодов экстремальной влажности и застоя воздуха.

На основе предоставленных технических характеристик исполнительных устройств проведен анализ энергопотребления системы в различных режимах работы. Это позволяет оценить экономическую эффективность и требования к источнику питания (табл. 1).

**Таблица 1.** Энергопотребление компонентов системы

**Table 1.** Power consumption of system components

Устройство	Напряжение (В)	Ток (А)	Мощность (Вт)	Примечание
Нагревательный прибор	12	4,3	51,6	Основной потребитель. Управляется ШИМ, что снижает среднюю мощность
Светодиодная лента	12	0,8	9,6	Циклическое включение по программе этапов
Вентилятор	12	0,3	3,6	Включается периодически для регулировки CO <sub>2</sub> и влажности
Парогенератор	5	0,3	1,5	Включается периодически для повышения влажности
Микроконтроллер ESP8266	5	0,2	1,0	Потребляет энергию постоянно, с небольшими колебаниями

Расчет сценариев потребления:

1. Максимальная пиковая нагрузка (включены все устройства одновременно):

$$P_{\max} = 51.6 + 9.6 + 3.6 + 1.5 + 1.0 = 67.3 \text{ Вт.}$$

2. Типичная нагрузка при активном регулировании (работают нагреватель на 50 % ШИМ, вентилятор и контроллер):

$$P_{\text{typical}} = (51.6 * 0.5) + 3.6 + 1.0 = 25.8 + 3.6 + 1.0 = 30.4 \text{ Вт.}$$

3. Энергия, потребляемая за сутки (оценочно для фазы активного роста грибов):

- Нагреватель: 6 часов работы на 50 % ШИМ –  $51.6 \text{ Вт} * 0.5 * 6 \text{ ч} = 154.8 \text{ Вт}\cdot\text{ч}$ .
- Светодиоды: 12 часов работы –  $9.6 \text{ Вт} * 12 \text{ ч} = 115.2 \text{ Вт}\cdot\text{ч}$ .
- Вентилятор и увлажнитель: 3 часа работы суммарно –  $(3.6+1.5) \text{ Вт} * 3 \text{ ч} = 15.3 \text{ Вт}\cdot\text{ч}$ .
- Контроллер: 24 часа –  $1.0 \text{ Вт} * 24 \text{ ч} = 24 \text{ Вт}\cdot\text{ч}$ .
- Итого за сутки:  $\approx 309.3 \text{ Вт}\cdot\text{ч}$  ( $\sim 0.31 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ ).

Система является энергоэффективным решением для задач лабораторного и маломасштабного применения. Использование ШИМ-управления для самого мощного потребителя (нагревателя) и циклической работы остальных устройств позволяет минимизировать расход энергии. Для автономной работы от аккумуляторов потребуется источник емкостью не менее  $\approx 65 \text{ А}\cdot\text{ч}$  при 12В (с учетом глубины разряда и потерь).

Сопоставим разработанную систему с существующими рыночными и открытыми решениями, чтобы оценить ее конкурентные преимущества и рыночную нишу. Сравнение проведено по ключевым параметрам: функциональность, стоимость, гибкость и открытость платформы (табл. 2).

**Таблица 2.** Сравнительный анализ систем управления микроклиматом**Table 2.** Comparative analysis for microclimate control systems

Параметр	Разработанная система (на ESP8266)	Промышленные ПЛК (Siemens, Schneider Electric)	Популярные open-source проекты (Arduino/RPi)
Целевая сфера	Научные исследования, малые биореакторы, образование	Крупные промышленные и агрокомплексы	Хобби-проекты, частные теплицы, прототипирование
Стоимость внедрения	Крайне низкая (< \$50 за контур)	Очень высокая (от \$200 за контроллер + монтаж)	Низкая/умеренная (\$50-\$200)
Функциональность	Готовый комплекс: этапное управление, ПИД/релейное регулирование, REST API, облачные уведомления	Максимальная: интеграция в SCADA, резервирование, диагностика	Базовая/кастомная: требует глубокой самостоятельной разработки
Гибкость	Очень высокая (открытый код, модульность)	Очень низкая («закрытые» системы)	Высокая (требует компетенций пользователя)
Ключевое преимущество	Оптимальное соотношение «цена/функциональность/гибкость» для исследовательских и малых прикладных задач	Надежность и соответствие пром. стандартам	Максимальная доступность и образовательная ценность

#### ВЫВОДЫ

1. Достигнута основная цель работы: разработана и апробирована в лабораторных условиях автономная робототехническая система управления микроклиматом на базе микроконтроллера ESP8266. Система реализует заданный функционал этапного адаптивного управления, мониторинга и удаленного взаимодействия.

2. Разработанная система занимает уникальную рыночную нишу, заполняя пробел между дорогими промышленными комплексами и любительскими open-source проектами. Ее ключевое конкурентное преимущество – предоставление индустриального уровня функциональности (ПИД-регулирование, этапное управление, REST API) при стоимости и гибкости DIY-решения. Это делает ее идеальным инструментом для научно-исследовательских лабораторий, образовательных учреждений (таких как ГГНТУ) и технологических стартапов на ранней стадии валидации гипотез. В отличие от многих open-source аналогов представленная система является законченным, полнофункциональным продуктом, готовым к использованию без глубокой доработки, что подтверждается проведенными испытаниями.

3. Подтверждена работоспособность ключевых алгоритмов:

- Релейное управление вентилятором эффективно и предсказуемо снижает избыточную влажность и концентрацию CO<sub>2</sub>, приводя параметры к равновесию с внешней средой [12].

- Реализация ПИД-регулирования для температурного контура обеспечивает плавный и безударный нагрев до заданной уставки без перерегулирования [2, 6]. Экспериментально определенное время выхода на режим и динамика остывания служат основой для дальнейшей тонкой настройки коэффициентов регулятора под конкретную тепловую нагрузку.

4. Выявлены области для оптимизации и дальнейших исследований:

- Наблюдаемая тепловая инерция нагревательного элемента указывает на целесообразность внедрения в алгоритм управления элемента прогноза или использования ПИД-регулятора с учетом производной по выходу [2].

- Для сокращения времени нагрева и уменьшения энергопотребления в реальных условиях необходима доработка конструкции камеры (утепление), что отмечено в ходе испытаний.

- Полученные экспериментальные кривые являются ценным материалом для уточнения параметров математической модели (постоянных времени  $\tau_T$ ,  $\tau_H$ ,  $\tau_C$ ), что повысит точность симуляций.

- Разработанная система, несмотря на автономное выполнение заданных программ, не обеспечивает полную независимость от участия оператора на этапе планирования. Переход между технологическими этапами выращивания и их параметры (уставки, длительность) требуют предварительной ручной настройки через веб-интерфейс. Таким образом, автономность системы проявляется в циклическом поддержании заданных параметров в рамках установленного этапа, но не в самостоятельном планировании полного производственного цикла.

5. Практическая значимость: разработанный комплекс представляет собой законченное, функциональное и масштабируемое решение для автоматизации биотехнологических процессов, требующих точного контроля микроклимата [9, 10]. Использование доступной элементной базы (ESP8266, SCD40) и открытых облачных сервисов (ntfy.sh) делает систему экономически эффективной и легко воспроизводимой для задач точного земледелия, лабораторных фитотронов и малогабаритных биореакторов.

Таким образом, проведенное исследование подтвердило корректность выбранных архитектурных и алгоритмических решений. Система готова к более длительным испытаниям на реальных биологических объектах (например, на различных стадиях выращивания грибов) для сбора агротехнических данных и окончательной валидации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анучин А. С. Системы управления электроприводов. М.: Издательский дом МЭИ, 2015. 373 с.

2. Астрём К. Й., Хэггунд Т. Расширенные возможности ПИД-регулирования / пер. с англ. под ред. В. В. Клёнова. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2006. 365 с. ISBN: 5-94774-355-6

3. Байбикова Т. Н., Доморацкий Е. П. Система имитационного моделирования операций, геометрических характеристик и методов импульсной оптической томографии микрообъектов ядерного топлива // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2020. № 5(244). С. 34–41. DOI: 10.25728/datsys.2020.5.4. EDN: QZWQIW

4. Бараусов К. В., Винниченко А. В. Сравнительный анализ существующих систем обслуживания оборудования // Метрологическое обеспечение инновационных технологий: сборник статей VII Международного форума (Санкт-Петербург, 2025 г.). 2025. С. 387–388. EDN: CUYNQR

5. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического управления. 4-е изд., перераб. и доп. СПб.: Профессия, 2004. 747 с. (Специалист). ISBN: 5-93913-035-6

6. Вальнев В. В., Котелева Н. И. К вопросу об автоматизации технического обслуживания и ремонта промышленного оборудования // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2024. № 5-2. С. 276–283. DOI: 10.17513/snt.40040. EDN: JUVMAN

7. Горькавый М. А., Горькавый А. И., Мельниченко М. А. Оптимизация роботизированного технологического процесса на базе нейросетевой имитационной модели энергопотребления // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2023. Т. 66. № 2. С. 85–95. DOI: 10.17213/0136-3360-2023-2-85-95. EDN: WYKEWQ

8. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления / пер. с англ. Б. И. Копылова. М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. 832 с.

9. Кокиева Г. Е., Дабаев А. Б. Система автоматизации управления микроклиматом теплицы // Ларионовские чтения-2021: сборник научно-исследовательских работ по итогам научно-практической конференции. 2021. С. 139–143. EDN: HSCPXI
10. Кокиева Г. Е., Друзьянова В. П. Исследование автоматизированной системы управления микроклиматом парника // Дальневосточный аграрный вестник. 2021. № 1(57). С. 70–78. DOI: 10.24412/1999-6837-2021-1-70-78. EDN: WYISMN.
11. Котелева Н. И., Вальнев В. В., Марков В. В. Программный сервис для контроля качества выполнения сварочных работ // Цветные металлы. 2025. № 9. С. 68–76. DOI: 10.17580/tsm.2025.09.07.
12. Матвеев Н. Н., Семенов В. В. Системы автоматического управления с релейными элементами. М.: Наука, 1986. 336 с.
13. Минцаев М. Ш., Якубов Т. В., Барзаева М. А. Технико-экономическое обоснование использования геотермальных ресурсов для отопления тепличных комплексов // Вести газовой науки. 2021. № 4(49). С. 176–183. DOI: 10.52823/2073-5069-2021-4-49-176-183. EDN: NYHDIB
14. Федоренко В. Ф., Харитонов М. П., Смирнов И. Г., Аристов Э. Г. Перспективы роботизации процессов внутрипочвенного полива и подкормки растений // Агроинженерия. 2024. Т. 26. № 1. С. 11–17. DOI: 10.26897/2687-1492-2024-1-11-17
15. Simulink for Control System Design and Simulation // MathWorks: Documentation Center. 2024. URL: <https://www.mathworks.com/help/simulink/control-system-design-and-tuning.html> (дата обращения: 17.03.2025).

## REFERENCES

1. Anuchin A.S. *Sistemy upravleniya elektroprivodov* [Electric Drive Control Systems]. Moscow: Izdatel'skiy dom MEI. 2015. 373 p. (In Russian)
2. Åström K.J., Hägglund T. *Rasshirennye vozmozhnosti PID-regulirovaniya* [Advanced PID Control]. Translated from English; ed. by V.V. Klyonov. Moscow: Binom. Laboratoriya znaniy. 2006. 365 p. ISBN: 5-94774-355-6. (In Russian)
3. Baybikova T.N., Domoratskiy E.P. Simulation modeling system for operations, geometric characteristics, and methods of pulsed optical tomography of nuclear fuel micro-objects. *Avtomatizatsiya i IT v energetike* [Automation and IT in Energy]. 2020. No. 5(244). Pp. 34–41. DOI: 10.25728/datsys.2020.5.4. EDN: QZWQIW. (In Russian)
4. Barausov K.V., Vinnichenko A.V. Comparative analysis of existing equipment maintenance systems. In: *Metrologicheskoe obespechenie innovatsionnykh tekhnologiy: sbornik statey VII Mezhdunarodnogo foruma* [Metrological Support of Innovative Technologies: Proceedings of the VII International Forum]. Saint Petersburg, 2025. Pp. 387–388. EDN: CUYHQR. (In Russian)
5. Besekerskiy V.A., Popov E.P. *Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Theory of Automatic Control Systems]. 4th ed., revised and expanded. Saint Petersburg: Professiya. 2004. 747 p. (Spetsialist). ISBN: 5-93913-035-6. (In Russian)
6. Val'nev V.V., Koteleva N.I. On the automation of industrial equipment maintenance and repair. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii. Regional'noe prilozhenie* [Modern high technologies. regional application]. 2024. No. 5-2. Pp. 276–283. DOI: 10.17513/snt.40040. EDN: JUVMAH. (In Russian)
7. Gor'kavyu M.A., Gor'kavyu A.I., Mel'nichenko M.A. Optimization of a robotic technological process based on a neural network simulation model of energy consumption. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Electromechanics]. 2023. No. 66(2). Pp. 85–95. DOI: 10.17213/0136-3360-2023-2-85-95. EDN: WYKEWQ. (In Russian)

8. Dorf R.C., Bishop R.H. *Sovremennye sistemy upravleniya* [Modern Control Systems]. Translated from English by B.I. Kopylov. Moscow: Laboratoriya Bazovyykh Znaniy. 2002. 832 p. (In Russian)

9. Kokieva G.E., Dabaev A.B. Greenhouse microclimate control automation system. In: *Larionovskie chteniya-2021: sbornik nauchno-issledovatel'skikh rabot po itogam nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Larionov Readings-2021: Collection of Research Papers Based on the Results of the Scientific and Practical Conference]. 2021. Pp. 139–143. EDN: HSCPXI. (In Russian)

10. Kokieva G.E., Druzyanova V.P. Research of an automated greenhouse microclimate control system. *Dal'nevostochnyy agrarnyy vestnik* [Far Eastern Agrarian Bulletin]. 2021. No. 1(57). Pp. 70–78. DOI: 10.24412/1999-6837-2021-1-70-78. EDN: WYISMN. (In Russian)

11. Koteleva N.I., Val'nev V.V., Markov V.V. Software service for quality control of welding work performance. *Tsvetnye metally* [Non-ferrous Metals]. 2025. No. 9. Pp. 68–76. DOI: 10.17580/tsm.2025.09.07. (In Russian)

12. Matveev N.N., Semenov V.V. *Sistemy avtomaticheskogo upravleniya s releynymi elementami* [Automatic Control Systems with Relay Elements]. Moscow: Nauka, 1986. 336 p. (In Russian)

13. Mintshev M.Sh., Yakubov T.V., Barzaeva M.A. Technical and economic justification for the use of geothermal resources for heating greenhouse complexes. *Vesti gazovoy nauki* [Gas Science News]. 2021. No. 4(49). Pp. 176–183. DOI: 10.52823/2073-5069-2021-4-49-176-183. EDN: HYHDIB. (In Russian)

14. Fedorenko V.F., Kharitonov M.P., Smirnov I.G., Aristov E.G. Prospects for the robotization of subsurface irrigation and plant fertilization processes. *Agroinzheneriya* [Agricultural Engineering]. 2024. No. 26(1). Pp. 11–17. DOI: 10.26897/2687-1492-2024-1-11-17. (In Russian)

15. Simulink for Control System Design and Simulation. (2024). MathWorks: Documentation Center. Available at: <https://www.mathworks.com/help/simulink/control-system-design-and-tuning.html> (accessed: 17.03.2025)

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

**Вклад авторов:**

Тахаев У. Р., Исаева М. Р. – разработка методологии;

Тахаев У. Р., Садулаев А. А-В. – программная реализация и валидация;

Садулаев А. А-В. – математическое моделирование и формальный анализ;

Насуханов А. И. – расследование и сбор данных;

Исаева М. Р. – подготовка исходного варианта рукописи.

Все авторы – написание, рецензирование и редактирование рукописи. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

**Author's contribution:**

Takhaev U.R. and Isaeva M.R. – methodology development;

Takhaev U.R. and Sadulaev A. A-V. – software implementation and validation;

Sadulaev A.A-V. – mathematical modeling and formal analysis;

Nasukhanov A.I. – investigation and data collection;

Isaeva M.R. – manuscript preparation;

All authors – writing, reviewing, and editing the manuscript. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Финансирование.** Исследование проведено без спонсорской поддержки.

**Funding.** The study was performed without external funding.

**Информация об авторах**

**Тахаев Усам Русланович**, аспирант кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств», Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М. Д. Миллионщикова;

364051, Россия, г. Грозный, проспект имени Х. А. Исаева, 100;

takhaev.usam@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2931-0099>, SPIN-код: 4551-8286

**Исаева Мадина Ризвановна**, канд. техн. наук, доцент, заведующая кафедрой «Автоматизация технологических процессов и производств», Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М. Д. Миллионщикова;

364051, Россия, г. Грозный, проспект имени Х. А. Исаева, 100;

atppdissovet@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3068-9482>, SPIN-код: 7791-1120

**Садулаев Аюб Абдул-Вахидович**, ассистент кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств», Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М. Д. Миллионщикова;

364051, Россия, г. Грозный, проспект имени Х. А. Исаева, 100;

akhmed.nasukhanov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7072-1424>, SPIN-код: 9593-4929

**Насуханов Ахмед Ибрагимович**, старший лаборант кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств», Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М. Д. Миллионщикова;

364051, Россия, г. Грозный, проспект имени Х. А. Исаева, 100;

akhmed.nasukhanov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7723-9464>, SPIN-код: 4823-6877

**Information about the authors**

**Usam R. Takhaev**, Postgraduate Student, Department of Automation of Technological Processes and Production, Grozny State Oil Technical University named after academician M.D. Millionshchikov;

100, Isaev avenue, Grozny, 364051, Russia;

takhaev.usam@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2931-0099>, SPIN-code: 4551-8286

**Madina R. Isaeva**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Automation of Technological Processes and Production, Grozny State Oil Technical University named after academician M.D. Millionshchikov;

100, Isaev avenue, Grozny, 364051, Russia;

atppdissovet@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3068-9482>, SPIN-code: 7791-1120

**Ayub A.-V. Sadulaev**, Assistant Professor, Department of Automation of Technological Processes and Production, Grozny State Oil Technical University named after academician M.D. Millionshchikov;

100, Isaev avenue, Grozny, 364051, Russia;

akhmed.nasukhanov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7072-1424>, SPIN-code: 9593-4929

**Ahmed I. Nasuhanov**, Senior Laboratory Assistant, Department of Automation of Technological Processes and Production, Grozny State Oil Technical University named after academician M.D. Millionshchikov;

100, Isaev avenue, Grozny, 364051, Russia;

akhmed.nasukhanov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7723-9464>, SPIN-code: 4823-6877