

EDN: FIGRSQ

DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-2-37-44



Научная статья

УДК 631.544.45



## Камера с управляемым микроклиматом и освещением для адаптации микроклонов растений к условиям *ex vitro*

**Андрей Александрович Гришин**,  
кандидат экономических наук,  
старший научный сотрудник,  
e-mail: 5145412@mail.ru;

**Артём Александрович Дорохов**,  
кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник,  
e-mail: dorokhov-91@yandex.ru;

**Дмитрий Витальевич Поручиков**,  
научный сотрудник,  
e-mail: dv.poruchikov@yandex.ru;

**Елена Валерьевна Павлова**,  
младший научный сотрудник,  
e-mail: elena\_pavlova85@mail.ru;

**Мария Сергеевна Широкова**,  
младший научный сотрудник,  
e-mail: m\_shirokova98@mail.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

**Реферат.** Отметим, что перевод микрорастений из стерильной среды *in vitro* в нестерильную среду *ex vitro* сопряжен с резким изменением микроклиматических параметров, прежде всего влажности и газообмена. Разработана климатическая камера для адаптации растений, полученных методом микроклонального размножения, к условиям *ex vitro*. (*Цель исследования*) Экспериментальная верификация камеры, оснащенной программируемыми светодиодными фитосветильниками и системой прецизионного контроля микроклимата. (*Материалы и методы*) Адаптация проведена на растениях-регенерантах красной смородины (*Ribes rubrum L.*) в кассетах с субстратом. Параметры микроклимата и спектрального состава излучения измеряли по стандартизованным методикам. (*Результаты и обсуждение*) Камера обеспечивает поддержание температуры от 10 до 35 градусов Цельсия, относительной влажности от 40 до 95 процентов, скорость изменения температуры при нагреве 0,9 градуса Цельсия в минуту, при охлаждении 0,4 градуса Цельсия в минуту, амплитуду колебаний температуры  $\pm 0,6$  градуса Цельсия, влажности  $\pm 3$  процента. Освещение реализовано на базе светодиодных фитосветильников с независимым управлением по четырем спектральным каналам (синий 460 нанометров, красный 660 нанометров, дальний красный 720 нанометров, белый широкополосный 400-700 нанометров, опционально ультрафиолетовый 380-400 нанометров). Плотность фотосинтетического фотонного потока регулируется от 34 до 805,7 микромоля на квадратный метр в секунду. Управление осуществляется через сенсорный интерфейс с ручным и автоматическим режимами, программированием уставок, плавным изменением интенсивности освещения и сохранением шаблонов. Предусмотрена интеграция с системами интернета вещей. (*Выводы*) Подтвержденные характеристики соответствуют заявленным, что обеспечивает эффективную адаптацию микроклонов растений к условиям *ex vitro*.

**Ключевые слова:** адаптация растений, климатическая камера, светодиодные фитосветильники, замкнутая агроэкосистема, *in vitro*, *ex vitro*.

■ **Для цитирования:** Гришин А.А., Дорохов А.А., Поручиков Д.В., Павлова Е.В., Широкова М.С. Камера с управляемым микроклиматом и освещением для адаптации микроклонов растений к условиям *ex vitro* // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2026. Т. 20. №2. С. 37-44. DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-2-37-44. EDN: FIGRSQ.

Scientific article

## Climate Chamber with Controlled Microclimate and Lighting for the Adaptation of Plant Microclones to *ex vitro* Conditions

**Andrey A. Grishin**,  
Ph.D.(Eng.), senior researcher,  
e-mail: 5145412@mail.ru;

**Artem A. Dorokhov**,  
Ph.D.(Eng.), senior researcher,  
e-mail: dorokhov-91@yandex.ru;

**Dmitry V. Poruchikov**,  
researcher, e-mail: dv.poruchikov@yandex.ru;

**Elena V. Pavlova**,  
junior researcher,  
e-mail: elena\_pavlova85@mail.ru;

**Maria S. Shirokova**,  
junior research,  
e-mail: m\_shirokova98@mail.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

**Abstract.** The transition of microplants from sterile *in vitro* conditions to a non-sterile *ex vitro* environment is accompanied by abrupt changes in microclimatic parameters, particularly humidity and gas exchange. This study presents the development of a climate chamber designed to support the adaptation of micropropagated plants to *ex vitro* conditions. (*Research purpose*) The study aimed to experimentally verify the performance of a chamber equipped with programmable LED phytolamps and a precision microclimate control system. (*Materials and methods*) The adaptation experiments were conducted on regenerated redcurrant plants (*Ribes rubrum L.*) grown in substrate-filled trays. Microclimatic parameters and the spectral composition of radiation were measured using standardized methods. (*Results and discussion*) The chamber maintains a temperature range of 10 to 35 degrees Celsius and a relative humidity range of 40 to 95 percent. The temperature change rate is 0.9 degrees Celsius per minute during heating and 0.4 degrees Celsius per minute during cooling, while temperature and relative humidity fluctuations do not exceed  $\pm 0.6$  degrees Celsius and  $\pm 3$  percent, respectively. Lighting is provided by LED phytolamps with independent control of four spectral channels: blue, 460 nanometers; red, 660 nanometers; far-red, 720 nanometers; and broad-spectrum white, 400–700 nanometers, with optional ultraviolet radiation in the 380–400 nanometers range. Photosynthetic photon flux density can be adjusted from 34 to 805.7 micromoles per square meter per second. The chamber is operated through a touch-screen interface that enables manual and automatic control, setpoint programming, smooth light-intensity adjustment, and storage of preset templates. Integration with Internet of Things systems is also supported. (*Conclusions*) The verified characteristics correspond to the declared parameters, confirming the chamber's suitability for the effective adaptation of micropropagated plants to *ex vitro* conditions.

**Keywords:** plant adaptation, climate chamber, LED phytolamps, closed agroecosystem, *in vitro*, *ex vitro*.

■ **For citation:** Grishin A.A., Dorokhov A.A., Poruchikov D.V., Pavlova E.V., Shirokova M.S. Climate chamber with controlled microclimate and lighting for the adaptation of plant microclones to *ex vitro* conditions. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2026. Vol. 20. N2. 37-44 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2026-20-2-37-44. EDN: FIGRSQ.

**А**даптация регенерантов к нестерильным условиям выращивания относится к наиболее трудоемким и ответственным этапам клонального микроразмножения, во многом определяющим успешность укоренения растительного материала [1, 2]. Перевод микрорастений из стерильной среды *in vitro* в нестерильную *ex vitro* сопряжен с резким изменением микроклиматических параметров, прежде всего влажности и газообмена. На этой стадии в силу высокой чувствительности растений к смене микроклимата, а именно резкому падению относительной влажности воздуха со 100 до 60% и ниже, наблюдается максимальная гибель регенерантов, от 50 до 90% [2, 3]. Это становится лимитирующим фактором масштабирования технологий промышленного получения регенерантов и выхода качественного посадочного материала.

Оснащение климатических камер современными светодиодными фитосветильниками для адаптации растений, культивируемых *in vitro*, к условиям *ex vitro*, представляет собой перспективное направление агробиотехнологии [4, 5]. Существующие методы и технологические решения для выращивания растений *in vitro* зачастую не позволяют в полной мере создавать и динамически корректировать параметры среды, необходимые для последующей успешной адаптации. Многочисленные исследования показали, что полноценный рост и развитие растений возможны только при строго определенном, узком диапазоне температуры [6, 7]. Более того, интенсивность светового потока и его спектральный состав должны варьироваться не

только в зависимости от видовой принадлежности культуры, но и в соответствии с суточным ритмом освещения [8-10].

**Цель исследования.** Разработка и экспериментальная верификация климатической камеры, оснащенной программируемыми светодиодными фитосветильниками и системой прецизионного контроля микроклимата, для создания управляемых условий адаптации растений при их переводе из режима *in vitro* в *ex vitro*.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ.** В качестве объектов адаптации на этапе отработки режимов камеры использовались растения-регенеранты красной смородины (*Ribes rubrum L.*), полученные методом клонального микроразмножения. Адаптация проводилась в кассетах 8×8 ячеек, заполненных субстратом «Пельгорское-М», обеспечивающим благоприятные условия для укоренения. Спектральный состав излучения и верификация микроклиматических параметров разработанной камеры оценивали в соответствии с ГОСТ 25051.2-82 «Система государственных испытаний продукции. Камеры тепла и холода испытательные. Методы аттестации».

Температуру и влажность воздуха измеряли с помощью комбинированного прибора ТКА-ПКМ (модель 42), скорость циркуляции воздуха фиксировалась цифровым анемометром *BTMETER BT-100*. Спектральные распределения и интенсивность светового потока регистрировались спектрометром *UPRtek PG200N PAR* (погрешность  $\pm 1$  нм). Измерения выполнены при двух режимах работы осветительной системы: мощности 100% и минимально

возможном уровне интенсивности. Датчик прибора размещался на дне лотка для растений. В каждом режиме проводилось пять замеров (по углам и в центре лотка). Итоговое значение определялось как среднее арифметическое.

Контрольно-измерительная аппаратура при оценке температурно-влажностного режима и параметров воздухообмена размещалась по схеме, регламентированной для испытательных камер кубической конфигурации. Измерения проводились в шести контрольных точках, расположенных перед центрами каждой из шести внутренних поверхностей рабочего объема (рис. 1).

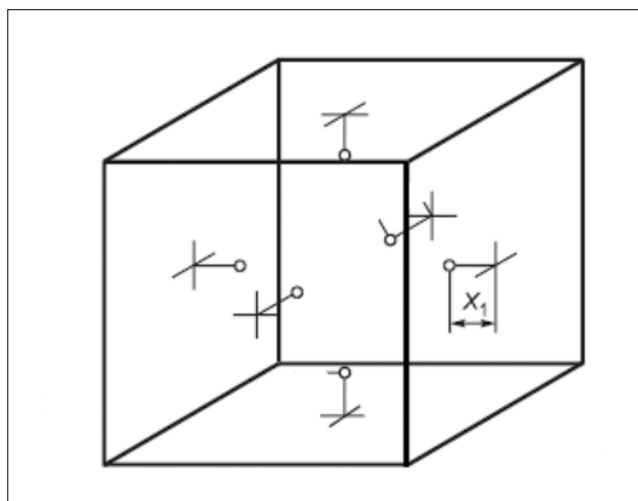


Рис. 1. Размещение точек измерения температуры, относительной влажности и скорости циркуляции воздуха в камере ( $x_1 = H/10$ ,  $H$  – длина камеры)

Fig. 1. Arrangement of measurement points for temperature, relative humidity, and airflow velocity in the chamber ( $x_1 = H/10$ , where  $H$  – is the chamber length)

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ.** Обработку экспериментальных данных и расчет нормируемых характеристик выполняли согласно методикам ГОСТ 25051.2-82 и ГОСТ Р 53618-2009 (МЭК 60068-3-5:2001) «Требования к характеристикам камер для испытаний технических изделий на стойкость к внешним воздействующим факторам. Методы аттестации камер (без загрузки) для испытаний на стойкость к воздействию температуры».

**Конструкция и система управления климатической камеры.** Для управляемого перехода растений к условиям *ex vitro* разработана специализированная климатическая камера (рис. 2). Работа камеры управляется по программе для ЭВМ с сенсорной панели (Гришин А.А., Измайлов А.Ю., Дорохов А.С. и др. Программа управления климатической камерой для адаптации микроклонов культурных растений *in vitro*. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025618595 Российская Федерация).

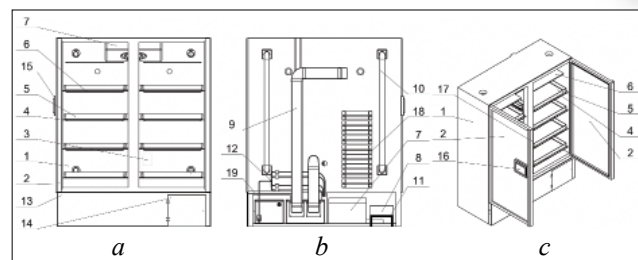


Рис. 2. Схема климатической камеры: а – вид спереди; б – вид сзади; с – изометрическая проекция; 1 – камера; 2 – двери; 3 – датчик температуры и влажности; 4 – полки; 5 – поддон (лоток) для гидропонии; 6 – светодиодный фитосветильник; 7 – холодильный компрессор и испаритель (теплообменник); 8 – блок автоматики; 9 – система увлажнения; 10 – каналы циркуляции воздуха; 11 – кронштейн блока управления; 12 – система полива; 13 – декоративная панель; 14 – дверца декоративной панели; 15 – крепление сенсорной панели; 16 – сенсорный дисплей; 17 – ручка дверцы; 18 – блоки питания светильников; 19 – шланг отвода конденсата

Fig. 2. General view of the climate chamber: a – front view; b – back view; c – isometric view; 1 – chamber; 2 – doors; 3 – temperature and humidity sensor; 4 – shelves; 5 – hydroponic tray; 6 – LED phytolamp; 7 – refrigeration compressor and evaporator/heat exchanger; 8 – automation unit; 9 – humidification system; 10 – airflow channels; 11 – control unit bracket; 12 – irrigation system; 13 – decorative panel; 14 – decorative panel door; 15 – touch-screen display mount; 16 – touch-screen display; 17 – door handle; 18 – lamp power supply units; 19 – condensate drain hose.

Графический интерфейс управления (рис. 3, табл. 1) включает разделы: «Главная», «Режимы», «Параметры», «График», «Журнал событий», «Рецепты», «Корректировка». Функционал системы предусматривает ручной и автоматический режимы. Температура и влажность поддерживаются в автоматическом режиме на основе непрерывного мониторинга показаний датчиков в соответствии с программными уставками дня/ночи. Предусмотрены алгоритмы плавного изменения интенсивности освещения (рассвет/закат).

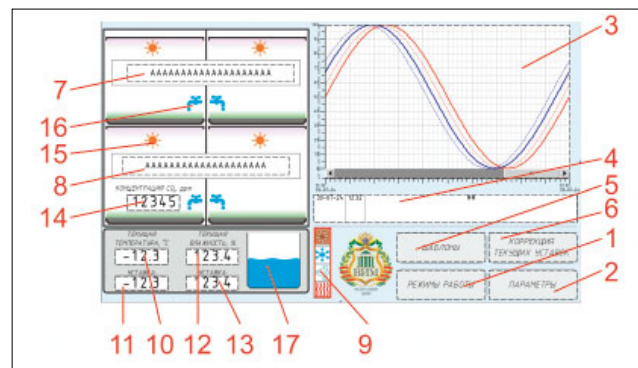


Рис. 3. Интерфейс управления

Fig. 3. User control interface

Таблица 1 / Table 1	
ИНТЕРФЕЙС УПРАВЛЕНИЯ / USER CONTROL INTERFACE	
1	Кнопка перехода на страницу выбора режима работы исполнительных устройств
2	Кнопка перехода на страницу установки параметров работы
3	Малый график температуры и влажности воздуха. Нажать на график для перехода к полноэкранному графику температуры и влажности воздуха, а также графику показания датчика CO <sub>2</sub>
4	Отображение текущих (активных) сообщений журнала событий. Нажать на таблицу для перехода к полноэкранному журналу событий
5	Кнопка перехода на страницу управления и настройки шаблонов параметров
6	Кнопка перехода на страницу корректировки текущих уставок параметров работы
7 и 8	Индикация текущего выбранного шаблона уставок параметров работы для верхнего и для нижнего яруса
9	Индикация работы исполнительных устройств: вытяжка, охлаждение, увлажнение, нагрев
10	Индикация текущей температуры воздуха в камере
11	Индикация текущей уставки температуры воздуха (изменяется в зависимости от режима день/ночь)
12	Индикация текущей влажности воздуха в камере
13	Индикация текущей уставки влажности воздуха (изменяется в зависимости от режима день/ночь)
14	Отображение текущей концентрации CO <sub>2</sub>
15	Индикация работы освещения на соответствующем ярусе
16	Индикация работы полива на соответствующем ярусе
17	Индикация уровня воды в баке полива по сигналам поплавковых датчиков уровня (ДУ), установленных в баке

Анализ динамики параметров реализован путем ретроспективного просмотра данных (при активации соответствующей области на поле графика отображаются численные значения температуры и относительной влажности воздуха, зафиксированные в интересующий момент времени, а также дата и время их регистрации). С целью повышения оперативности и воспроизводимости настроек реализован режим работы по шаблонам, который позволяет сохранять комбинации уставок для различных экспериментальных задач. Сформированная таким образом база данных исключает необходимость повторного ввода значений при многократном использовании отработанных режимов, что существенно упрощает подготовку оборудования к работе и минимизирует вероятность ошибок оператора. Интерфейс также содержит индикацию концентрации CO<sub>2</sub>, реализованную как резервный канал для подключения соответствующих датчиков в будущих модификациях.

При отклонении от заданных уставок контроллер корректирует работу исполнительных устройств, обеспечивая стабильные условия в рабочем объеме камеры. Для компенсации инерционности системы

увлажнения и предотвращения переувлажнения увлажненный воздух подается в импульсном (дозированном) режиме. Параметры дозирования определяются эмпирически и могут варьироваться в зависимости от режима работы и особенностей культуры.

В целях сервисного обслуживания интерфейс предусматривает функцию игнорирования сигналов поплавкового датчика уровня воды в резервуаре системы полива, позволяя осуществлять принудительную промывку. Состав и компоновка элементов системы автоматического управления приведены на рисунке 4.

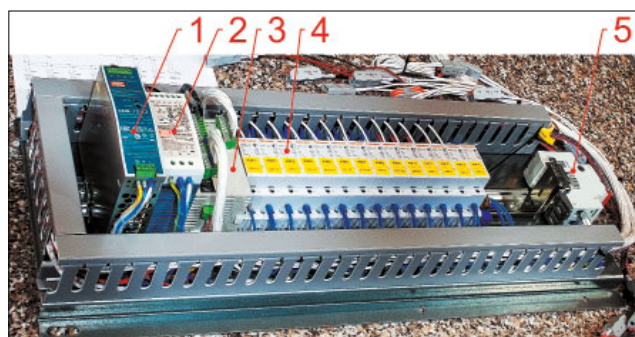


Рис. 4. Система автоматического управления: 1 – блок питания мембранных насосов; 2 – блок питания программируемого контроллера; 3 – программируемый контроллер; 4 – группа контакторов; 5 – вводной автомат  
 Fig. 4. Automatic control system: 1 – power supply unit for the diaphragm pumps; 2 – power supply unit for the programmable controller; 3 – programmable controller; 4 – contactor assembly; 5 – main circuit breaker

**Верификация климатических параметров.** Результаты испытаний подтвердили заявленные технические характеристики климатической камеры адаптации (табл. 2).

**Светотехнические характеристики.** Осветительная система организована по ярусному принципу. Светодиодные фитосветильники каждого яруса обеспечивают независимую плавную регулировку интенсивности по четырем спектральным каналам (белый, синий, красный, дальний красный). Спектральный состав измеряли при 100% и при минимальной мощности (табл. 3, рис. 5). Полученные данные свидетельствуют о возможности избирательного регулирования параметров световой среды для управления морфогенетическими процессами растений, что согласуется с выводами других исследователей [8-11].

Количественные характеристики – температурно-влажностные, спектральные распределения и интенсивность излучения взяты за основу формирования исходных аналитических зависимостей. Указанные зависимости, верифицированные экспериментальными данными (рис. 6), послужили базой

Таблица 2 Table 2

**ПОДТВЕРЖДАЕМЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КЛИМАТИЧЕСКОЙ КАМЕРЫ АДАПТАЦИИ**  
**VERIFIED SPECIFICATIONS OF THE CLIMATE CHAMBER FOR PLANT ADAPTATION**

Характеристика	Номинальное значение	Допустимое отклонение
Скорость изменения температуры, °С/мин: при охлаждении при нагреве		0,4 0,9
Предельная температура, °С: отрицательная положительная	10 35	±1 ±1
Промежуточная температура, °С	15; 20; 30	±1
Градиент температуры, °С		1,5
Градиент относительной влажности, %		8
Амплитуда колебания температуры в камере, °С		±0,6
Относительная влажность воздуха, %: повышенная пониженная	95 40	±3 ±3
Амплитуда колебания влажности в камере, %		±3
Средняя скорость циркуляции воздуха, м/с		0,38

Таблица 3 Table 3

**ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА ИЗЛУЧЕНИЯ СВЕТОДИОДНЫХ ФИТОСВЕТИЛЬНИКОВ ПО ЯРУСАМ ПРИ 100% И МИНИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ**  
**CHARACTERISTICS OF THE SPECTRAL COMPOSITION OF LED PHYTOLAMP RADIATION BY TIER AT 100% AND MINIMUM POWER**

Показатель	Ярус			
	1	2	3	4
PFD-B (синий)	От 9,281 до 124,5	От 10,266 до 172,9	От 5,27 до 77,35	От 5,423 до 79,93
PFD-G (зеленый)	От 14,747 до 183,5	От 15,379 до 241,7	От 9,525 до 140,5	От 12,206 до 182,3
PFD-R (красный)	От 31,191 до 497,7	От 11,384 до 174,9	От 19,22 до 288,7	От 16,997 до 258,7
PFD-UV (ультрафиолетовый)	От 0,013 до 0,243	От 0,0122 до 0,103	От 0,006 до 0,04	От 0,0023 до 0,056
PFD-FR (дальний красный)	От 0,5095 до 6,91	От 0,9033 до 13,58	От 4,888 до 74,26	От 1,454 до 21,4
PFD (полный)	От 55,742 до 812,	От 37,945 до 603,2	От 38,91 до 580,8	От 36,087 до 542,4
Плотность фотосинтетического фотонного потока (PPFD), мкмоль/(м <sup>2</sup> ·с)	От 55,22 до 805,7	От 37,029 до 589,5	От 34,016 до 506,5	От 34,63 до 521

для построения основного алгоритма компьютерной программы управления ростом и развитием растений в условиях регулируемой среды, что согласуется с подходами, изложенными в работах [13, 14].

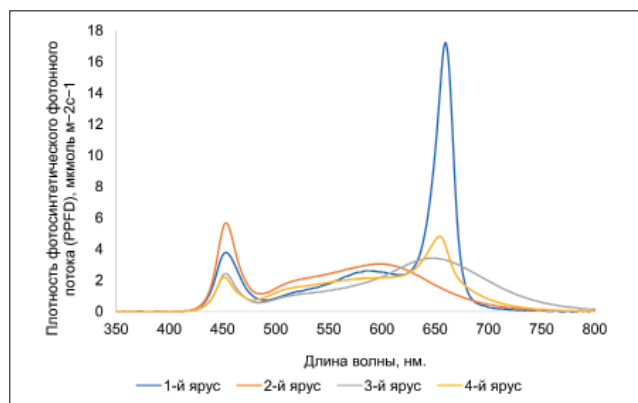


Рис. 5. Диаграммы спектра излучения светодиодных фитосветильников и их плотность фотосинтетического фотонного потока по ярусам при мощности 100%  
Fig. 5. Spectral distribution of LED phytolamp radiation and photosynthetic photon flux density by tier at 100% power

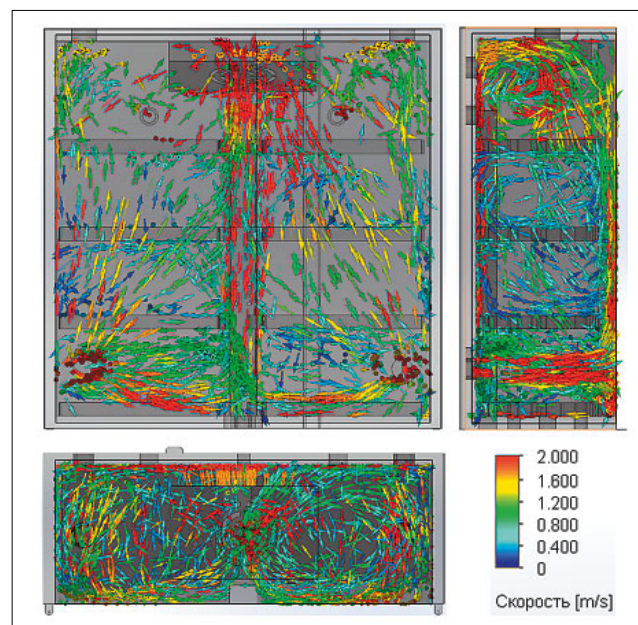


Рис. 6. Распределение воздушных потоков в рабочем объеме камеры  
Fig. 6. Airflow distribution within the working chamber

Таблица 4

Table 4

## СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КЛИМАТИЧЕСКИХ КАМЕР / COMPARISON OF CLIMATE CHAMBER CHARACTERISTICS

Параметр	Разработанная камера	Камера Binder KBF P	Камера Snijders Micro Clima	Камера CLF PlantClimatics
Диапазон температуры, °C	10-35	0-70	10-60	10-40
Диапазон RH, %	40-95	10-80	40-95	50-95
Стабильность температуры, ±°C	±0,6	±0,1–0,3	±0,2–0,5	±0,5
Тип освещения	Программируемый LED, 4 канала	Люминесцентное/ LED (опция)	Люминесцентное/ LED (фиксированный спектр)	Программируемый LED
Регулировка спектра	Да, независимо по каналам	Нет	Нет/ограниченно	Да

Сравнение с существующими решениями. Сравнительный анализ технических характеристик разработанной камеры и некоторых распространенных моделей климатического оборудования (табл. 4) показывает, что предлагаемое решение соответствует современному уровню техники по основным параметрам (диапазон температуры и влажности, точность поддержания).

Ключевая особенность состоит в наличии программируемых светодиодных фитосветильников с отдельным управлением по четырем спектральным каналам. Это в комплексе с прецизионным контролем микроклимата создает условия, максимально приближенные к потребностям конкретных культур на этапе адаптации. В большинстве стандартных климатических камер (например, серий *Binder*, *Snijders Scientific*) используется либо стандартное люминесцентное освещение, либо его светодиодный аналог без тонкой спектральной настройки. В специализированных фитотронах (например, *CLF PlantClimatics*) спектральная настройка возможна, однако регулировка интенсивности по отдельным спектральным диапазонам не предусмотрена.

Разработанное техническое решение позволяет гибко настраивать параметры освещения и микроклимата, адаптируя их под биологические особенности конкретных культур. Эффективность работы камеры подтверждена в ходе эксперимента по адаптации растений-регенерантов четырех сортов красной смородины (*Red Lake*, *Englische Grosse Weisse*, Мармеладница, Подарок лета). В течение 28 дней в камере поддерживались оптимальные условия: температура  $22 \pm 2$  °C, фотопериод 16 ч, при этом влажность воздуха плавно снижалась с 96 до 45%.

Для оценки влияния световой среды на физиологическое состояние растений использовались три варианта спектра: белый (*W*), красно-белый с ультрафиолетом (*RWUV-A*, 625-740 нм) и красно-белый (*RW*). Полученные результаты подтвердили высокую эффективность разработанной камеры. Наиболее благоприятные условия для адаптации обеспечил спектр *RWUV-A*, который способствовал максимальному накоплению биомассы и хлорофилла у большинства сортов, что было подтверждено

наивысшими значениями вегетационного индекса (*NDVI*), указывающего на улучшенное физиологическое состояние и биомассу. Во всех вариантах эксперимента было зафиксировано сохранение тургора и отсутствие некротических и хлоротичных повреждений листовых пластин в течение адаптационного периода, что в совокупности доказывает способность разработанной климатической камеры эффективно управлять процессом адаптации растений при их переводе из стерильных условий *in vitro* в нестерильные *ex vitro* [14].

**Выводы.** Разработана и экспериментально верифицирована климатическая камера, оснащенная программируемыми светодиодными фитосветильниками и системой прецизионного контроля микроклимата, обеспечивающая создание управляемых условий для адаптации растений к нестерильным условиям *ex vitro*.

Реализованное техническое решение позволяет стабильно поддерживать видоспецифичные режимы температуры (10-35 °C), относительной влажности воздуха (40-95%) и спектрального состава освещения с возможностью независимой регулировки по четырем спектральным каналам.

Подтвержденные характеристики камеры (скорость изменения температуры, амплитуда колебаний, равномерность воздушных потоков) соответствуют требованиям ГОСТ и создают предпосылки для эффективной адаптации растений. Новизна разработанного технического решения подтверждена патентом RU 2832305, 2024 г.

Авторы выражают благодарность кандидату биологических наук Инне Валерьевне Князевой и кандидату технических наук Александру Анатольевичу Смирнову за ценные научные консультации и экспертные рекомендации по совершенствованию конструкции климатической камеры, разработку и изготовление светодиодных фитосветильников, за содействие в оптимизации режимов работы камеры.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гушин А.В., Киракосян Р.Н., Калашникова Е.А. и др. Применение aeropонных технологий для адаптации микроклонов *Vitis vinifera* к условиям *ex vitro* // *Проблемы развития АПК региона*. 2025. N2(62). С. 26-35. DOI: 10.52671/20790996\_2025\_2\_26.
2. Grzelak M., Pacholczak A., Nowakowska K. Challenges and insights in the acclimatization step of micropropagated woody plants. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*. 2024. Vol. 159. 72. DOI: 10.1007/s11240-024-02923-1.
3. Бондарева Л.Л., Минейкина А.И. Ускоренное размножение родительских линий капусты белокочанной с использованием штеклингов и камер искусственного климата // *Овощи России*. 2024. N5. С. 26-30. DOI: 10.18619/2072-9146-2024-5-26-30.
4. Семенова Н.А., Гришин А.А., Дорохов А.А. Аналитический обзор климатических камер для выращивания овощных культур // *Вестник НГИЭИ*. 2020. N1(104). С. 5-15. EDN: DWMJSZ.
5. Стребков Д.С., Юферев Л.Ю., Александров Д.В., Соколов А.В. Повышение эффективности систем освещения и облучения // *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2014. N1. С. 13-16. EDN: UXQOER.
6. Jiang Y., Lindsay D.L., Davis A.R. et al. Impact of heat stress on pod-based yield components in field pea (*Pisum sativum L.*). *Journal of Agronomy and Crop Science*. 2020. 206:76-89. DOI: 10.1111/jac.12365.
7. Silva D.A., Pinto-Maglio C.A.F., Oliveira E.C. et al. Influence of high temperature on the reproductive biology of dry edible bean (*Phaseolus vulgaris L.*). *Scientia Agricola*. Vol. 77. Rel. 3. 2020. DOI: 10.1590/1678-992X-2018-0233.
8. Лисина Т.Н., Бурдышева О.В., Шолгин Е.С. Влияние светодиодного освещения различного спектра на растения картофеля (*Solanum tuberosum L.*) при выращивании *in vitro* (обзор) // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2023. Т. 24. N6. С. 913-923. DOI: 10.30766/2072-9081.2023.24.6.913-92.
9. Chen Y., Bian Z., Marcelis L.F.M. et al. Green light is similarly effective in promoting plant biomass as red/blue light: a meta-analysis. *Journal of Experimental Botany*. 2024. Vol. 75. N18. 5655-5666. DOI: 10.1093/jxb/erae267.
10. Hitz T., Graeff S., Hartung J., Munz S. Morphological response of soybean (*Glycine max (L.) Merr.*) Cultivars to light intensity and red to far-red ratio. *Agronomy*. 2019. Vol. 9. Rel. 8. N428. DOI: 10.3390/agronomy9080428.
11. Лях П.А., Колошина К.А., Попова К.И., Лях А.А. Влияние спектрального состава светодиодного излучения на рост и развитие растений // *Инновации и продовольственная безопасность*. 2022. N(1). С. 108-120. DOI: 10.31677/2311-0651-2022-35-1-108-120.
12. Moustaka J., Moustakas M. Early-stage detection of biotic and abiotic stress on plants by chlorophyll fluorescence imaging analysis. *Biosensors*. 2023. Vol. 13. N8. 796. DOI: 10.3390/bios13080796.
13. Плотникова Л.Я., Самойлов В.Н. Перспективные направления повышения продуктивности растений в интенсивной светокультуре // *Научный альманах*. 2015. N12-2 (14). С. 428-431. DOI: 10.17117/na.2015.12.02.428.
14. Panfilova O., Ryago N., Ondrasek G. et al. Optimizing microclonal propagation of red currant cultivars: the role of nutrient media, sterilizers, and led lighting in plant adaptation. *Horticulturae*. 2025. Vol. 11. N2. 149. DOI: 10.3390/horticulturae11020149.

## REFERENCES

1. Gushchin A.V., Kirakosyan R.N., Kalashnikova E.A. et al. Application of aeroponic technologies for adaptation of *Vitis vinifera* microclones to *ex vitro* conditions. *Development problems of regional agro-industrial complex*. 2025. N2(62). 26-35 (In Russian). DOI: 10.52671/20790996\_2025\_2\_26.
2. Grzelak M., Pacholczak A., Nowakowska K. Challenges and insights in the acclimatization step of micropropagated woody plants. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*. 2024. Vol. 159. 72. DOI: 10.1007/s11240-024-02923-1.
3. Bondareva L.L., Mineykina A.I. Accelerated reproduction of the parental lines of white cabbage using rosette plants (steckling) and artificial climate chambers. *Vegetable Crops of Russia*. 2024. N5. 26-30 (In Russian). DOI: 10.18619/2072-9146-2024-5-26-30.
4. Semenova N.A., Grishin A.A., Dorokhov A.A. Analytical review of climatic chambers for vegetable crops growing. *Bulletin NGIEI*. 2020. N1(104). 5-15 (In Russian). EDN: DWMJSZ.
5. Strebkov D.S., Yuferev L.Yu., Aleksandrov D.V., Sokolov A.V. Improving the efficiency of lighting and exposure. *Mechanization and Electrification of Agriculture*. 2014. N1. 13-16 (In Russian). EDN: UXQOER.
6. Jiang Y., Lindsay D.L., Davis A.R. et al. Impact of heat stress on pod-based yield components in field pea (*Pisum sativum L.*). *Journal of Agronomy and Crop Science*. 2020. 206:76-89. DOI: 10.1111/jac.12365.
7. Silva D.A., Pinto-Maglio C.A.F., Oliveira E.C. et al. Influence of high temperature on the reproductive biology of dry edible bean (*Phaseolus vulgaris L.*). *Scientia Agricola*. Vol. 77. Rel. 3. 2020. DOI: 10.1590/1678-992X-2018-0233.
8. Lisina T.N., Burdysheva O.V., Sholgin E.S. Effect of different LEDs light spectrum on potato (*Solanum tuberosum L.*) *in vitro* (review). *Agricultural Science Euro-North-East*. 2023. N24(6). 913-923 (In Russian). DOI: 10.30766/2072-9081.2023.24.6.913-923.
9. Chen Y., Bian Z., Marcelis L.F.M. et al. Green light is similarly effective in promoting plant biomass as red/blue light: a meta-analysis. *Journal of Experimental Botany*. 2024. Vol. 75. N18. 5655-5666. DOI: 10.1093/jxb/erae267.
10. Hitz T., Graeff S., Hartung J., Munz S. Morphological response of soybean (*Glycine max (L.) Merr.*) Cultivars to

- light intensity and red to far-red ratio. *Agronomy*. 2019. Vol. 9. 8. N428. DOI: 10.3390/agronomy9080428.
11. Lyakh P.A., Koloshina K.A., Popova K.I., Lyakh A.A. Influence of the spectral composition of led radiation on plant growth and development. *Innovations and Food Safety*. 2022. N(1). 108-120 (In Russian). DOI: 10.31677/2311-0651-2022-35-1-108-120.
  12. Moustaka J., Moustakas M. Early-stage detection of biotic and abiotic stress on plants by chlorophyll fluorescence imaging analysis. *Biosensors*. 2023. Vol. 13. N8. 796. DOI: 10.3390/bios13080796.
  13. Plotnikova L.Ya., Samoylov V.N. Perspective directions of increasing plant productivity in intensive light crop production. *Scientific Almanac*. 2015. N12-2 (14). 428-431 (In Russian). DOI: 10.17117/na.2015.12.02.428.
  14. Panfilova O., Ryago N., Ondrasek G. et al. Optimizing microclonal propagation of red currant cultivars: the role of nutrient media, sterilizers, and led lighting in plant adaptation. *Horticulturae*. 2025. Vol. 11. N2. 149. DOI: 10.3390/horticulturae11020149.

#### Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.  
*Автор прочитал и одобрил окончательный вариант.*

#### Заявленный вклад соавторов:

Гришин А.А. – научное руководство, формулирование основных направлений исследования;  
 Дорохов А.А. – подготовка начального варианта статьи, формулирование цели и задачи исследования, разработка теоретических предпосылок;  
 Поручиков Д.В. – компьютерное моделирование, доработка текста;  
 Павлова Е.В. – формирование общих выводов;  
 Широкова М.С. – графическое сопровождение, литературный анализ.  
*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант*

#### Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.  
*The author read and approved the final manuscript.*

#### Coauthors' contribution:

Grishin A.A. – scientific supervision and conceptualization of the main research directions;  
 Dorokhov A.A. – preparation of the draft manuscript, formulation of the research aim and objectives, and development of the theoretical framework;  
 Poruchikov D.V. – computer modelling, revision and editing of the manuscript;  
 Pavlova E.V. – formulation of the general conclusions;  
 Shirokova M.S. – preparation of graphical materials and literature review.  
*The authors read and approved the final manuscript.*

Статья поступила в редакцию  
 Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on  
 The paper was accepted for publication on

02.04.2026  
 25.05.2026