

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
«Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»

На правах рукописи

**Дорохов Артём Александрович**

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ  
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЗАКРЫТОЙ АГРОЭКОСИСТЕМЫ  
ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ ЗЕЛЕННЫХ КУЛЬТУР  
НА ПРИМЕРЕ ШПИНАТА**

**Специальность 4.3.1. – Технологии, машины и оборудование для  
агропромышленного комплекса**

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, академик РАН,  
Шогенов Юрий Хасанович

Москва – 2024

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....                                                                                                                                              | 4  |
| <b>1 ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ВЫРАЩИВАНИЯ<br/>ЗЕЛЕННЫХ КУЛЬТУР</b> .....                                                                             | 10 |
| 1.1 Анализ структуры производства и потребления зеленных культур промышленного<br>выращивания на территории РФ .....                                               | 10 |
| 1.2 Факторы, воздействующие на рост и развитие зеленных культур.....                                                                                               | 15 |
| 1.2.1 Температурный режим.....                                                                                                                                     | 18 |
| 1.2.2 Световой режим .....                                                                                                                                         | 19 |
| 1.2.3 Водный режим.....                                                                                                                                            | 22 |
| 1.2.4 Воздушно газовый режим .....                                                                                                                                 | 24 |
| 1.2.5 Пищевой режим .....                                                                                                                                          | 25 |
| 1.3 Технические средства для выращивания зеленных культур .....                                                                                                    | 28 |
| 1.4 Анализ моделей и технических средств по выращиванию зеленных культур в<br>закрытых агроэкосистемах .....                                                       | 34 |
| 1.5 Выводы по главе 1 .....                                                                                                                                        | 42 |
| 1.6 Цели и задачи исследования.....                                                                                                                                | 43 |
| <b>2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ<br/>ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЗАКРЫТОЙ АГРОЭКОСИСТЕМЫ ПО<br/>ВЫРАЩИВАНИЮ ЗЕЛЕННЫХ КУЛЬТУР НА ПРИМЕРЕ ШПИНАТА</b> ..... | 44 |
| 2.1 Исследование факторов, влияющих на эффективность выращивания шпината... 44                                                                                     | 44 |
| 2.2 Исследование параметров и режимов работы закрытой агроэкосистемы по<br>выращиванию зеленных культур .....                                                      | 47 |
| 2.3 Разработка алгоритма управления процессом выращивания шпината .....                                                                                            | 54 |
| 2.4 Разработка климатической камеры для выращивания шпината в закрытой<br>агроэкосистеме с цифровым управлением .....                                              | 60 |
| 2.5 Выводы по главе 2 .....                                                                                                                                        | 78 |
| <b>3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ</b> .....                                                                                                                      | 79 |
| 3.1 Программа экспериментальных исследований .....                                                                                                                 | 79 |

|          |                                                                                                                                                                  |            |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.2      | Методика экспериментальных исследований по выращиванию шпината в закрытой агроэкосистеме с цифровым управлением.....                                             | 81         |
| 3.2.1    | Материально-техническое обеспечение эксперимента .....                                                                                                           | 81         |
| 3.2.2    | Определение лабораторной всхожести семян шпината .....                                                                                                           | 82         |
| 3.2.3    | Методика проведения экспериментальных исследований по выращиванию шпината.....                                                                                   | 85         |
| 3.3      | Выводы по главе 3 .....                                                                                                                                          | 92         |
| <b>4</b> | <b>РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ВЫРАЩИВАНИЮ ШПИНАТА В ЗАКРЫТОЙ АГРОЭКОСИСТЕМЕ С ЦИФРОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ.....</b>                                                      | <b>93</b>  |
| 4.1      | Зависимости продуктивности шпината от режимов оптического излучения .....                                                                                        | 93         |
| 4.2      | Рекомендации по выращиванию зелени шпината в закрытой агроэкосистеме ...                                                                                         | 101        |
| 4.3      | Выводы по главе 4 .....                                                                                                                                          | 103        |
| <b>5</b> | <b>ОЦЕНКА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫРАЩИВАНИЯ ШПИНАТА В ЗАКРЫТОЙ АГРОЭКОСИСТЕМЕ С ЦИФРОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ .....</b>                                     | <b>105</b> |
| 5.1      | Оценка экономической эффективности разработанных технологий выращивании зелени шпината в закрытой агроэкосистеме с цифровым управлением.....                     | 105        |
| 5.2      | Выводы по главе 5 .....                                                                                                                                          | 112        |
|          | <b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>                                                                                                                                           | <b>114</b> |
|          | <b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>                                                                                                                                   | <b>116</b> |
|          | ПРИЛОЖЕНИЕ А Патент на изобретение «Климатическая камера для выращивания растений» .....                                                                         | 129        |
|          | ПРИЛОЖЕНИЕ Б Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа управления микроклиматом вегетационной климатической камеры Фитотрон»..... | 130        |
|          | ПРИЛОЖЕНИЕ В Акт о внедрении результатов диссертационной работы в производственный процесс фитотронно-тепличного комплекса ФГБНУ ФНЦ ВНИИМК (г.Краснодар) .....  | 131        |

## ВВЕДЕНИЕ

Состояние развития сельского хозяйства влияет на продовольственную безопасность, социально-экономическую и политическую стабильность в Российской Федерации.

Растениеводство, как источник белков, жиров, углеводов, минералов и витаминов определенно играет важнейшую роль в обеспечении человечества продуктами питания.

Одной из ключевых подотраслей растениеводства является производство овощных культур, которая составляет 8% и занимает третье место в общей структуре продукции растениеводства [1].

С целью увеличения доли овощей, произведенных в сельскохозяйственных организациях внутри страны и повышения уровня самообеспеченности населения, утверждена Государственная программа развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013–2020 годы, утвержденной постановлением Правительства Российской Федерации от 14 июля 2012 г. № 717 [2].

Доля России в мировом производстве овощей составляет 1,5 %, что позволяет ей входить в десятку ведущих стран мира по данному показателю, однако по урожайности Россия находится на 57-м месте. Необходимо отметить, что производство овощей в закрытом грунте в России за последние пять лет выросло в полтора раза. Тем не менее, в отличие от ведущих стран по выращиванию овощей в промышленных масштабах, где насчитывается 50-55 видов овощных культур, в России их не более 15 видов [3].

Диверсификация производства агропромышленного комплекса РФ позволит наиболее эффективно произвести импортозамещение по продовольствию, а также обеспечит переход на новые рынки сбыта овощной продукции.

В последние годы, в производстве овощей наблюдается переход к новым технологиям и способам производства.

Открываются современные городские автоматизированные вертикальные фермы с закрытой агроэкосистемой по выращиванию зеленных культур. Основное отличие таких ферм от традиционных теплиц – многоуровневое размещение

объектов выращивания, что обеспечивает максимальную эффективность использования пространства. Так один квадратный метр под многоуровневой вертикальной фермой, обеспечивает увеличение количества объектов выращивания в два раза и более, относительно обычной теплицы [4].

Технология контролируемого микроклимата позволяет работать таким фермам круглогодично и получать по несколько урожаев в год, а для некоторых видов продукции и по несколько раз в месяц.

Основным направлением для вертикальных ферм на сегодняшний день является производство зеленных культур, таких как пряные травы, микрозелень, шпинат, салаты, базилик и другие.

**Актуальность темы исследования.** Выращивание зеленных культур в закрытом грунте или закрытых агроэкосистемах на вертикальных фермах зависит от оптического излучения (спектрального состава и интенсивности облучения), микроклиматических условий (температуры, влажности, газового состава воздуха) и качественно подобранных составов питательного раствора.

Для определения точных значений вышеизложенных параметров и отработки технологических процессов выращивания овощных культур в условиях закрытых агроэкосистем, а также селекции новых овощных культур применяются климатические камеры.

Применение климатических камер для отработки технологий выращивания зеленных культур, путём проведения многофакторных опытов, позволяет оптимизировать процесс их производства. Однако, для проведения многофакторных опытов требуется достаточное техническое и цифровое обеспечение [5].

Анализ отечественных и зарубежных климатических камер с закрытой агробиосистемой для выращивания овощных культур показал, что уровень внедрения в практику технических решений, сопутствующих интенсификации производства остается низким [5]. Проблемы, сопутствующие данному уровню, выражаются в отсутствии средств хранения и передачи данных микроклиматического мониторинга, непрерывного контроля и регулирования режимов оптического излучения и

микроклиматических параметров, влияющих на рост растения, его всхожесть, урожайность и устойчивость к фитопатогенам.

Для развития закрытых агроэкосистем, отвечающих современным требованиям к выращиванию зеленных культур, необходимо их дальнейшие исследования с применением интеллектуально-цифровых технологий и новых технических средств.

**Степень разработанности темы.** Разработкой систем и методов выращивания растений для закрытых условий в разное время занимались Аверчева О.В., Алферова Л.К., Башилов А.М., Беркович Ю.А., Валеев Р.А., Владыкин И.Р., Воскресенская Н.П., Гришин А.П., Дорохов А.С., Ерохин А.Н., Живописцев Е.Н., Жилинский Ю.М., Клешнин А.Ф., Ключка Е.П., Кожевникова Н.Ф., Козинский В.А., Козырева И.Н., Коломиец А.П., Кондратьева Н.П., Косицын О.Г., Леман В.М., Лисовский Г.М., Лямцов А.К., Максимов Н.А., Малышев В.В., Мальчевский В.П., Мошков Б.С., Ничипорович А.А., Овчукова С.А., Прищеп Л.Г., Протасова Н.Н., Растимешин С.А., Сарычев Г.С., Свентицкий И.И., Сидько Ф.Я., Сибирев А.В., Тихомиров А.А., Шарупич В.П., Шульгин И.А., B. Singh, J. Bonnet, M. Fischer, P. Harris, P. Mekkel, R. McCree и др.

Данные ученые внесли значительный вклад в изучение вопроса повышения эффективности и продуктивности выращивания овощных культур. При этом существующее разнообразие конструктивно-технологических схем климатических камер не исчерпало возможности повышения эффективности технологии выращивания в закрытых агроэкосистемах. Кроме того, результаты известных теоретических и экспериментальных исследований могут быть непосредственно применены при разработке методов и технических средств для управления ростом и развитием зеленных с использованием цифровых технологий.

**Цель исследований** – разработка системы и технических средств управления ростом и развитием шпината в закрытых агроэкосистемах с использованием цифровых технологий.

#### **Задачи исследований.**

1. Проанализировать технологии и технические средства по выращиванию шпината.

2. Теоретически обосновать параметры и режимы функционирования закрытой агроэкосистемы для выращивания шпината.

3. Разработать техническое средство для выращивания шпината в закрытой агроэкосистеме с применением цифровых технологий управления ростом растений за счет спектрального оптического излучения.

4. Провести экспериментальные исследования по определению влияния спектрального оптического излучения на продуктивность выращиваемого шпината в закрытой агроэкосистеме до товарной спелости.

5. Оценить экономическую эффективность выращивания шпината в разработанной закрытой агроэкосистеме.

**Объект исследований** – процесс управляемого выращивания шпината в закрытой агроэкосистеме в зависимости от спектра оптического излучения.

**Предмет исследований** – параметры технических средств выращивания шпината в закрытой агроэкосистеме.

**Научная гипотеза** – получение высокой продуктивности растений шпината, выращиваемого в закрытой агроэкосистеме, возможно за счёт создания технических и программных средств управления микроклиматическими параметрами и режимами оптического излучения в процессе вегетационного развития растений.

**Научная новизна** заключается в полученных зависимостях влияния спектрального состава света на биометрические параметры растений шпината, выращиваемых в закрытых искусственных условиях с цифровой системой управления светом и микроклиматом.

Новизна полученных результатов исследований подтверждена патентом РФ на изобретение № 2739604 «Климатическая камера для выращивания растений».

**Теоретическая значимость** работы заключается в полученных теоретических зависимостях, позволяющих определить конструктивные и технологические параметры климатической камеры для выращивания шпината; обосновании системы управления выращиванием шпината в закрытых искусственных условиях с учётом изменения микроклиматических параметров и режимов оптического излучения.

**Практическая значимость** исследования заключается в параметрах и режимах работы разработанной закрытой агроэкосистемы, конструктивно-технологической схеме и конструкции закрытой агроэкосистемы, практических рекомендациях по выращиванию шпината в закрытой агроэкосистеме с цифровыми системами управления.

**Реализация результатов.** Подтверждается актом о внедрении результатов диссертационной работы в производственный процесс фитотронно-тепличного комплекса ФГБНУ ФНЦ ВНИИМК (Краснодарский край, г.Краснодар) (Приложение В).

**Методология и методы исследований.** При решении поставленных задач использовались методологии системного анализа и синтеза, физического моделирования, основанные на теории вероятностей и математической статистики, численные методы решения аналитических зависимостей, общепринятые методы проведения лабораторных исследований.

Достоверность полученных данных обеспечена применением статистического метода ANOVA и необходимой повторяемости экспериментов. Статистическую обработку осуществляли в программе Microsoft Excel.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Параметры закрытой агроэкосистемы и режимы оптического излучения для выращивания шпината;
2. Техническое решение для выращивания шпината в закрытой агроэкосистеме с применением цифровых технологий управления ростом растений;
3. Алгоритм работы закрытой агроэкосистемы с цифровым управлением микроклиматом, спектром оптического излучения светодиодного облучателя;
4. Зависимости продуктивности шпината выращиваемого в закрытых агроэкосистемах от спектров света.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы были доложены и одобрены на международных научно-практических конференциях: 10-я Международная научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов ФГБНУ ФНАЦ ВИМ по теме «Агроинженерные инновации в сельском хозяйстве» (г. Москва, 30-31.05.2019), доклад в соавторстве на тему «Цифровой регистратор

параметров роста растений»; международная научно-техническая конференция «Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства» (г. Москва, 12-13.12.2019), доклад в соавторстве на тему «Аналитический обзор климатических камер для выращивания зеленных и овощных культур»; международная научно-практическая конференция «Агроэкологическая безопасность, энергоэффективные спектральные и лазерные технологии в повышении продуктивности сельского хозяйства» (г. Санкт-Петербург, 18-20 мая 2021 г.) доклад на тему «Климатическая камера с цифровым управлением микроклиматическими и световыми параметрами для выращивания овощных культур».

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ в рецензируемых научных изданиях, из которых: 6 статей в перечне изданий, рекомендованных ВАК РФ, 2 статьи в перечне изданий Web of Science и Scopus, получен 1 патент РФ на изобретения, 5 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ.

### **Структура и объем работы**

Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и трех приложений, выполнена на 131 странице, включает 49 рисунков, 18 таблиц, 108 наименований источников литературы.

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства науки высшего образования Российской Федерации в рамках реализации крупного научного проекта № 075-15-2024-540 «Разработка природоподобных технологий управления свойствами и качественными показателями растений с использованием методов биофотоники и цифровых систем» по теме «Разработка системы управления процессами вторичного метаболизма растений за счет динамического освещения в искусственных экосистемах с реализацией стратегии «управляемое солнце»» (получены зависимости оптимального условия освещения на культурные растения при выращивании в закрытых агроэкосистемах, разработаны алгоритм работы закрытой агроэкосистемы с цифровым управлением микроклиматом и спектром оптического излучения светодиодного облучателя, техническое решение для выращивания зеленных культур в закрытой агроэкосистеме с применением цифровых технологий управления ростом растений).

# 1 ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ВЫРАЩИВАНИЯ ЗЕЛЕННЫХ КУЛЬТУР

## 1.1 Анализ структуры производства и потребления зеленных культур промышленного выращивания на территории РФ

Продукция овощеводства является востребованной в ежедневном рационе человека и отличается большим разнообразием видов и сортов овощных растений. Многолетние исследования ученых в области здравоохранения показали, что для поддержания здоровья и обеспечения долголетия, необходимо употреблять не менее 375г овощей, фруктов и бобовых в день, что эквивалентно ~137кг/г на душу населения. При этом они должны присутствовать в рационе в течение всего года и в широком ассортименте [6].

Важное место во всем многообразии овощных культур принадлежит зеленым, пряно-вкусовым и ценным многолетним культурам. Эти культуры богаты витаминами, минеральными веществами, органическими кислотами, содержат белки, углеводы, имеют целебные и диетические свойства, предупреждают заболевания, повышают работоспособность человека [7].

Однако потребление овощных культур, в целом, на душу населения в России остается на низком уровне (рисунок 1) [8].

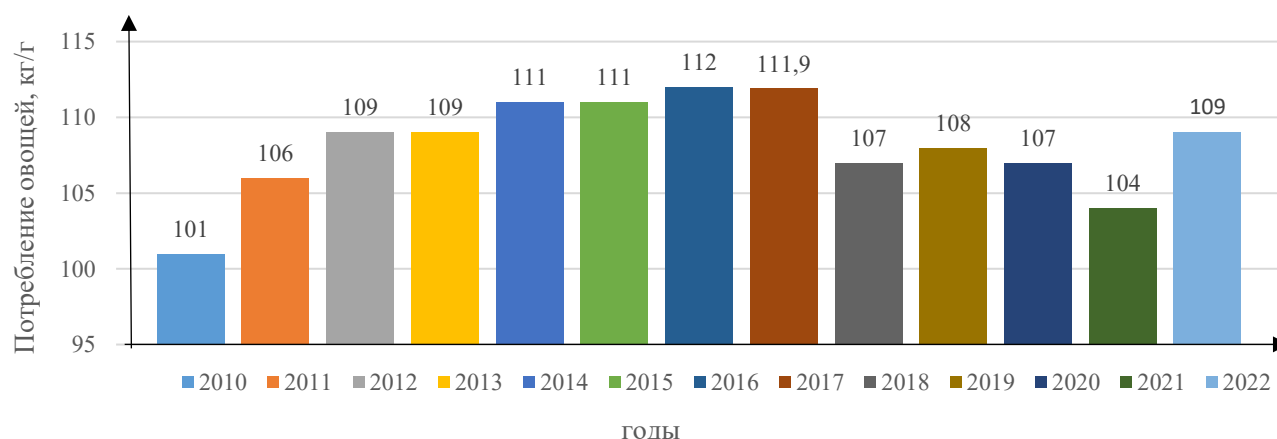


Рисунок 1 – Потребление овощей в России на душу населения, кг/г

Так, в среднем, за последние 10 лет дефицит потребления овощной продукции на душу населения составил 21% от годовой нормы.

Формирование валовых сборов овощей открытого и защищенного грунта, в промышленном секторе овощеводства России, происходит из сельскохозяйственных организаций и крестьянско-фермерских хозяйств.

В производстве овощей промышленного выращивания с 2010 по 2017 год на сборы овощей защищенного грунта приходится до 15%, овощей открытого грунта - 85% (рисунок 2) [8].

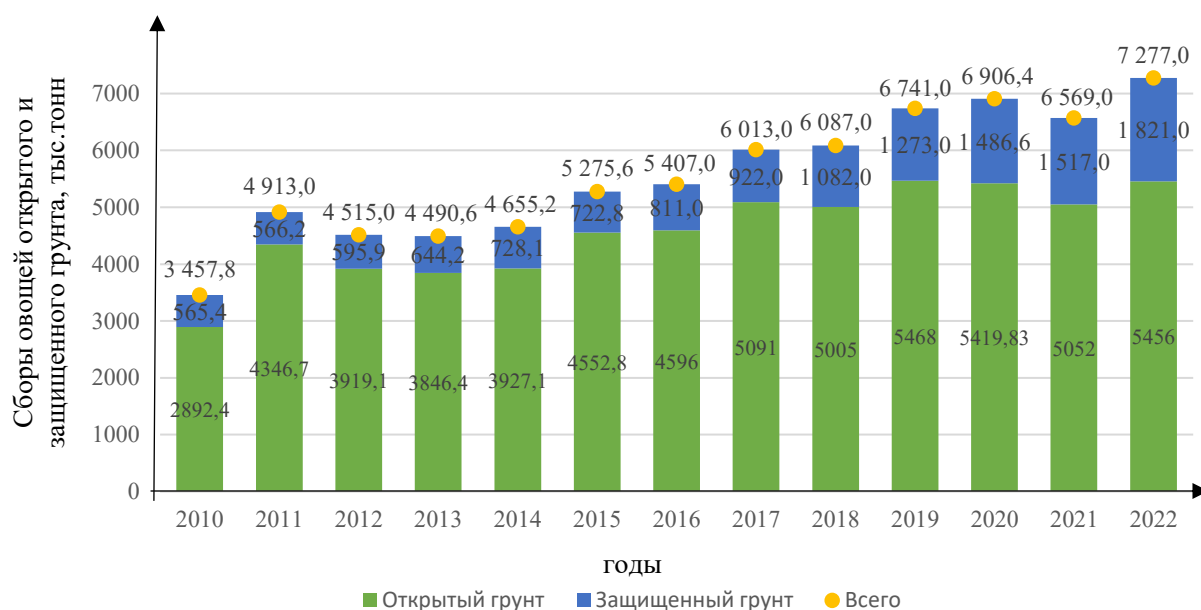


Рисунок 2 – Сборы овощей открытого и защищенного грунта в промышленном секторе овощеводства России в 2010-2022гг. (данные по сельскохозяйственным организациям и фермерским хозяйствам, без учета хозяйств населения), тыс. тонн

С 2018-го года по настоящее время, наблюдается существенное увеличение сборов овощей защищенного грунта (рисунок 3) [8].

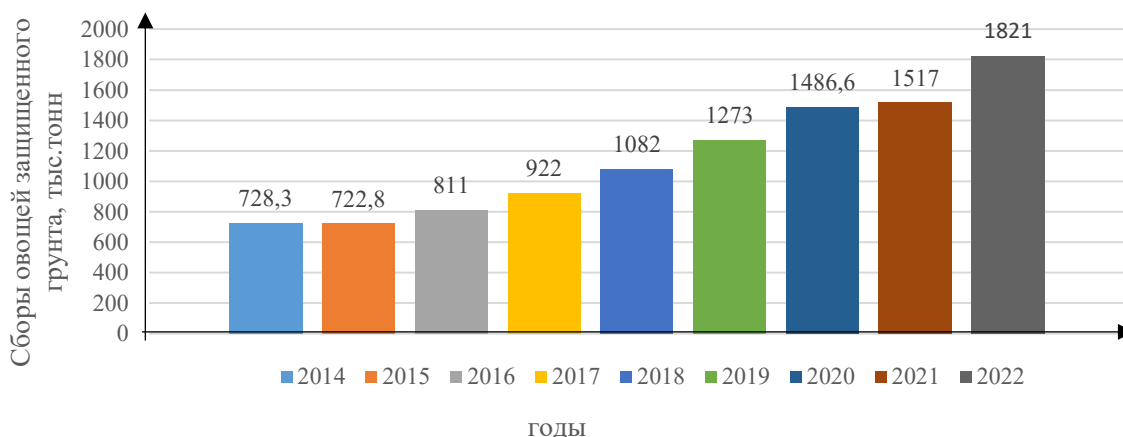


Рисунок 3 – Динамика сборов овощей защищенного грунта в промышленном секторе овощеводства, тыс.тонн

Причиной положительной динамики сборов овощей защищенного грунта, является исполнение государственных программ развития сельского хозяйства и импортозамещения сельскохозяйственной продукции, а также стимулирование инвестиционной активности в агропромышленном комплексе путем создания благоприятных инфраструктурных условий в сельской местности [9], [10].

В результате, за период с 2014г. по 2022г. удалось сократить импорт овощной сельскохозяйственной продукции на 32% (рисунок 4) [11].

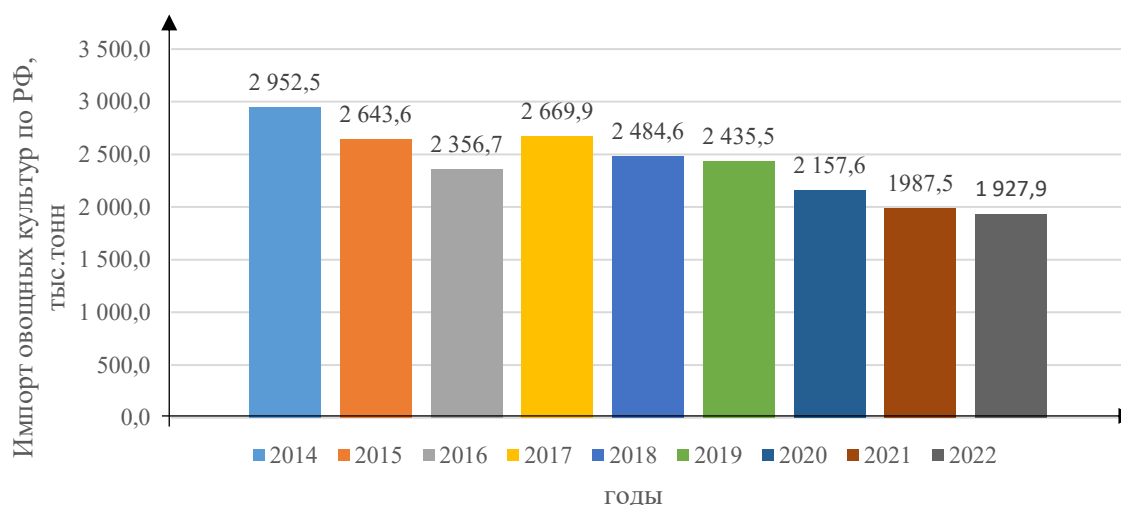


Рисунок 4 – Импорт овощных культур по РФ, тыс.тонн

В силу климатических особенностей России свежесобранные овощи, в частности зеленные, не всегда и не везде доступны потребителю в течение всего календарного года. Основная часть производимых сборов овощей защищенного грунта в России (42% от общего объема личного потребления граждан), естественно, используется в течение короткого летнего периода. На все оставшееся время, более полугода приходится создавать запасы продукции или прибегать к импорту. Поэтому доля импортируемых овощей преобладает в общем объеме личного потребления граждан и составляет 58%. Этот факт определенно приводит к увеличению окончательной стоимости продукции, что делает её менее привлекательной для конечного потребителя.

В этой связи альтернативой является применение интенсивных технологий круглогодичного выращивания овощных культур в закрытых агроэкосистемах.

Синтез таких условий с малообъемной технологией при выращивании зеленных культур, которые составляют порядка 15% от общего объема импортируемых овощей, позволяет повысить их урожайность и качество, снизить энергетические затраты, оптимизировать питательный, водный и воздушный режимы. Для работы системы, четкого и регулярного обмена данными между происходящими в ней процессами, используются программно-аппаратный комплекс, который способствует интенсификации производства, снижению трудозатрат и расхода природных ресурсов, а также стандартизации агротехники и упрощению технологического процесса выращивания по видам культур [12].

В условиях глобального и постоянного роста цен на энергоносители главная задача закрытых агроэкосистем заключается в повышении эффективности производства. Решению этой задачи могут способствовать технологии, связанные с применением новых методов и технических средств выращивания, микроклиматического регулирования, внесения удобрений и автоматизированных систем полива.

В настоящее время зеленные культуры являются в питании человека поставщиком витаминов и микроэлементов. В последние 20-30 лет, данные культуры пользуются спросом в связи с их высокой скоростью роста и способностью расти в закрытых экосистемах круглый год.

Среди зеленных культур по витаминно-минеральному составу популярность набирает шпинат.

Кроме белков, жиров, углеводов, пищевых волокон, органических кислот, листья шпината содержат поливитаминный комплекс, в составе которого провитамин А, витамины группы В, С, Р, РР, Е, Н, а также сопровождаются необходимыми человеку макро- и микроэлементами [13].

Разнообразие витаминов в сочетании с минеральными веществами делает шпинат полезным зеленым овощем для людей любого возраста.

В современной научной медицине назначают зелень шпината при авитаминозах, анемиях. Антиоксидантные, противовоспалительные, нейропротективные, гипотензивные, антигипоксические свойства шпината

позволяют использовать его в качестве экстракта при лечении радиационным излучением злокачественных новообразований [14].

Полезные свойства шпината позволяют использовать его в качестве ингредиента для производства новых видов мучных, хлебобулочных, молочных и мясных изделий функционального и специализированного назначения. Ввиду специфических органолептических и технологических свойств шпината его рекомендуется использовать в переработанном виде в сочетании с другими ингредиентами растительного и животного происхождения.

В настоящее время шпинат возделывают в промышленных масштабах в США, странах Западной Европы, Китае, в Средней Азии.

Ежегодно растет импорт шпината в Россию (рисунок 5) [11].

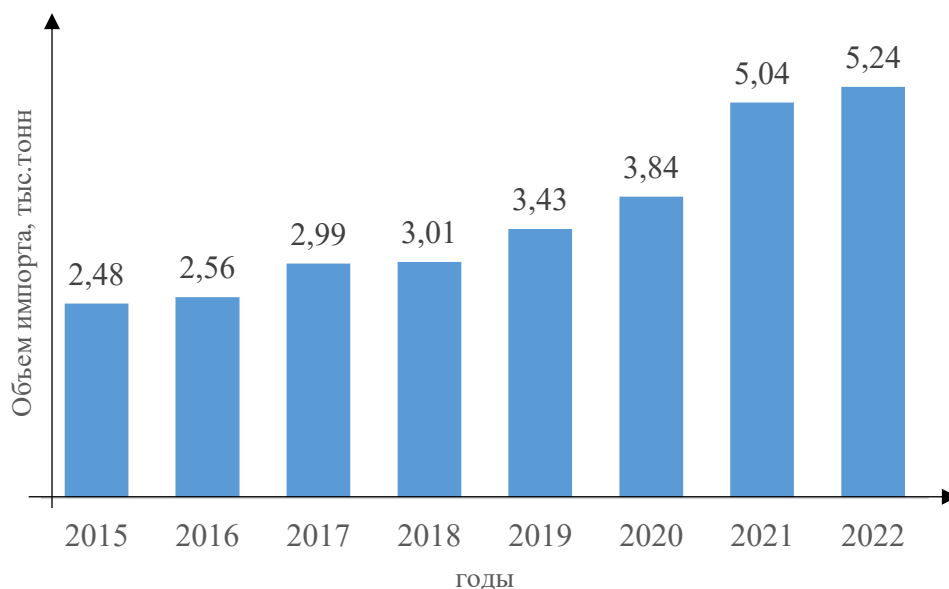


Рисунок 5 – Импорт шпината, сырого или вареного в воде или на пару, мороженного в тыс. тонн

При этом крупные производства внутри страны не занимаются выращиванием шпината в связи с отсутствием готовых технологий и ограниченным наличием отечественных сортов и семян.

Таким образом, требуется проведение исследований методов и технологии выращивания шпината в закрытых агроэкосистемах с использованием современных инновационных подходов.

## **1.2 Факторы, воздействующие на рост и развитие зеленных культур**

Главнейшим процессом аграрного производства является получение продукции растениеводства – урожая. Большинство операций и процессов, применяемых в агротехнологиях растениеводства при формировании урожая, направлены на повышение продуктивности растений путем управления факторами, воздействующими на их рост и развитие.

Параметры, значения и аналитические зависимости факторов, определяются и используются для создания алгоритма программы управления продуктивностью растений [15].

В каждом строго определенном случае можно выделить один или несколько внешних факторов, которые ограничивают формирование структуры и функциональную активность фотосинтетического аппарата растений. Если быстро определить и устранить ограничения, можно значительно повысить продуктивность растений с наименьшими экономическими затратами.

В естественных условиях роста растений параметры факторов постоянно меняется. Изменение параметров одного фактора, вызывает перемену условий окружающей среды растений. Так, повышение температуры часто сопровождается понижением влажности воздуха и почвы, повышение или понижение влажности и температуры от оптимальных значений влияет на состав почвенного воздуха и раствора.

На основании анализа литературных источников [16] – [20] были выявлены факторы, воздействующие на рост и развитие растений, которые были систематизированы по отношению к зеленым культурам (рисунок 6).

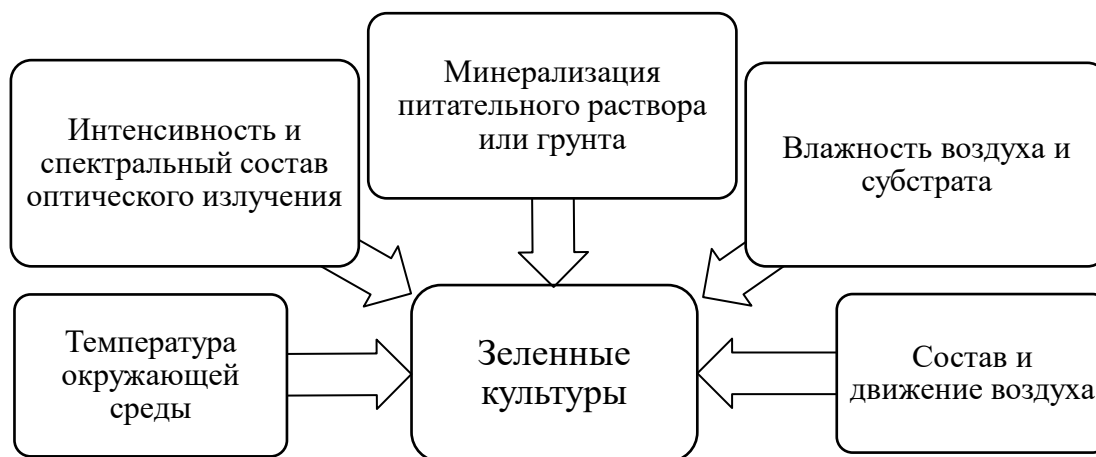


Рисунок 6 – Факторы, воздействующие на рост и развитие зеленных культур

Влияние этих факторов может быть оценено по ряду диагностических признаков, из которых мы используем биометрические показатели (площадь всех листьев, сырая масса растения и выход сухого вещества). Их комплекс наилучшим образом характеризует рост и развитие растений.

Исследуя взаимоотношения между растениями и средой, нельзя противопоставлять компоненты среды, представлять эти компоненты самостоятельными, изолированными друг от друга, наоборот, они тесно связаны, и взаимопроникают друг в друга.

Разработка теории и практики управления выращиванием зеленных культур в условиях искусственных источников оптического излучения, предполагает присутствие математических моделей продукционного процесса растений и их вегетации.

Процессом вегетации растения является фиксация в реальном времени его изменяющихся биометрических показателей. Данные, полученные в этом процессе, могут служить основой при разработке алгоритмов управляющего воздействия на продуктивность растений [21]. Задача фиксации изменения биометрических показателей во времени осложняется тем, что процессы преобразования вещества и энергии в структуре растения запускаются в

зависимости от его состояния или окружающих условий, что требует длительного наблюдения [22].

Наряду с математическими моделями, рассматривающими физические свойства и характеристики биологических объектов на уровне химических реакций клетки растений, существует простейшие модели агроэкосистем, задачей которых является описание скорости вегетации исследуемых растений в формирующихся микроклиматических условиях или краткосрочный прогноз скорости вегетации исходя из анализа микроклиматических данных, полученных ранее. Основываясь на практике выращивания растений, такие модели являются востребованными [23].

Для описания анализа экспериментальных данных, подбора формул или систем уравнений применяется эмпирический метод. Такой способ обработки экспериментальных данных, в некоторых случаях, позволяет понять систему реагирования растения на изменение микроклиматических параметров или режима оптического излучения [24].

Зависимость между факторами окружающей среды и продукционным процессом растений позволяет повысить эффективность вегетации и достичь наибольшей продуктивности растений методом варьирования параметров этих факторов [25].

Другим известным способом повысить эффективность процесса вегетации является снижение энергетических ресурсов, так как выращивание растений при искусственных источниках облучения является энергозатратным процессом. Основные энергозатраты, при этом, связаны с созданием условий для фотосинтеза. Наличие зависимостей между факторами окружающей среды и затратами энергии искусственных источников оптического излучения позволит устранить недочеты системы и разработать более эффективный алгоритм работы процесса выращивания растений по критерию минимума энергозатрат путем изменения условий окружающей среды, параметров облучения и других факторов [26].

В настоящее время проблема создания условий обеспечивающих высокий и стабильный урожай зеленных культур, при рациональном использовании ресурсов, являются важной задачей эффективного управления технологиями выращивания.

Важную роль в управлении процессами выращивания зеленных культур играют информационные технологии, которые позволяют оптимизировать параметры воздействующих на растение факторов, тем самым влияя на их продуктивность. Однако, исследование таких процессов, с точки зрения методологии и технологического обеспечения, является трудоемкой задачей, требующей тщательного планирования и проведения экспериментов. Важно определить оптимальные значения факторов и учитывать их сочетания для обеспечения максимального роста и развития растений.

### 1.2.1 Температурный режим

Температура – один из основных факторов, определяющий энергетические затраты, сроки и возможность возделывания зеленных культур в открытом и защищенном грунте.

Наличие достаточного количества тепла делает возможным осуществление процессов фотосинтеза, усвоения и движения питательных веществ от начала прорастания семян до конца вегетации.

Повышение температуры до критических значений может привести к свертыванию белков и последующей гибели растения, а при понижении температуры к снижению продуктивности фотосинтеза и дыхания [27].

В зависимости от теплотребовательности и способности растений противостоять неблагоприятным температурам, В.И. Эдельштейном предложена классификация растений, которая делит овощные культуры на пять групп (таблица 1) [28], [29].

Таблица 1 - Классификация овощных растений по их температурным особенностям

| Группы                      | Культуры                                   | Температура, °С  |              |                           |              |
|-----------------------------|--------------------------------------------|------------------|--------------|---------------------------|--------------|
|                             |                                            | Фаза прорастания |              | Фаза роста и плодоношения |              |
|                             |                                            | мини-мальная     | опти-мальная | мини-мальная              | опти-мальная |
| Морозостойкие (зимостойкие) | Многолетние растения, пастернак, лук-порей | 2...3            | 15...20      | -8...-10                  | 20...22      |

Продолжение таблицы 1

|                  |                                                 |         |         |    |         |
|------------------|-------------------------------------------------|---------|---------|----|---------|
| Холодостойкие    | Капусты,<br>корнеплоды, салат,<br>шпинат, укроп | 2...5   | 15...25 | -5 | 18...20 |
| Полутеплолюбивые | Картофель                                       | 12      | 20      | 0  | 18...20 |
| Теплолюбивые     | Огурец, томат,<br>перец, баклажан               | 12...15 | 25      | 0  | 18...25 |
| Жаростойкие      | Арбуз, дыня,<br>кукуруза, фасоль,<br>тыква      | 15      | 25...30 | 0  | 20...30 |

Температура оказывает большое влияние и на рост корней. При низких положительных температурах субстрата, около 0 °С, и высоких – в пределах 30...35 °С, происходит утолщение корней и уменьшение их длины. При температуре субстрата 22...26 °С формируется наиболее разветвленная корневая система, а при снижении температуры субстрата ниже данных значений, даже на относительно короткий срок, происходит снижение их продуктивности [27].

Оптимальные условия для роста корней овощных растений в целом, а также их высшей продуктивности, создаются при положительном вертикальном температурном градиенте, когда воздух холоднее, а почва теплее, в то время как при отрицательном вертикальном градиенте, свойственном внешней среде (воздух теплее, почва холоднее), корневой системе растений не представляется наилучших условий для развития [27].

Таким образом, температура для выращивания зеленных культур не постоянная, а является переменным значением. Она может сдвигаться в пределах генетически заложенной нормы реакции в результате приспособления к условиям среды.

### 1.2.2 Световой режим

Оптическое излучение является важным фактором в жизни растений. За счет энергии оптического излучения, углекислого газа, воды, элементов питания, в процессе фотосинтеза, растения создают и накапливают органическое вещество,

осуществляют транспирацию, синтез витаминов, ферментов, хлорофилла и других веществ, в результате чего обеспечивают формирование урожая [30].

Зеленные культуры, такие как шпинат, салат, базилик и другие, произошли из разных климатических зон земного шара, вследствие этого у них различны продолжительности дня и ночи (фотопериодизм), интенсивности облучения и отношение к спектральному составу.

В составе солнечного излучения выделяют три основных диапазона, влияющих на продуктивность, возникновение и развитие органов растений: длина волны до 380 нм – ультрафиолетовое излучение; 380–750 нм – физиологическое или фотосинтетическое излучение; 750–1400 нм – инфракрасное излучение [31].

Инфракрасные лучи с длиной волны 750–1400 нм в пределах оптимальных температур обеспечивают в растениях нормальное течение всех физиологических процессов, в частности повышают энергию фотосинтеза, влияют на фотопериодизм [27].

Видимые красные (720–620 нм) и оранжевые (620–595 нм) лучи – основной вид энергии, необходимой для фотосинтеза, формирования органов зеленных растений, их роста, цветения и плодоношения [27].

Желтые (595–565 нм) и зеленые (565–490 нм) лучи мало влияют на физиологические процессы. Растения в этих лучах растут и развиваются медленно [27].

Синие (490–440 нм) лучи и фиолетовые (440–380 нм) определяют нормальный обмен веществ, стимулируют формирование побегов и листьев [27].

Ультрафиолетовые лучи – невидимые. Наиболее длинные из них (380–315 нм) замедляют вытягивание стебля, повышают содержание в овощах витаминов. Так в тепличных комплексах защищенного грунта, данные лучи частично задерживаются стеклом, поэтому Витамина С в овощах, выращенных в таких условиях меньше в среднем на 20-30%, чем в овощах открытого грунта. Растения растут и развиваются нормально только при наличии всех видимых лучей [27].

В северных районах и средней части России, в связи с короткой длительностью солнечного излучения и его низкой интенсивностью с ноября по январь, успешное выращивание большей части зеленных культур в защищенном

грунте возможно и экономически целесообразно только при искусственном повышении интенсивности излучения и продлении светового дня (досвечивание).

Солнечное излучение в диапазоне 380–750 нм, достигающее до растений, является источником энергии фотосинтеза. Его годовое количество, зависит от географической широты территории. В связи с сезонными колебаниями длины дня и общего количества солнечного излучения в средних и высоких широтах, режим оптического излучения не обеспечивает в осенне-зимние сроки возможности получения урожая светотребовательных культур (томат, огурец, редис и листовые выращиваемые из семян) [27].

Реакция растений на снижение интенсивности облучения проявляется в сокращении темпов накопления биомассы, задержке развития растений, нарушении формирования репродуктивных органов, накоплении нитратов и снижении содержания витамина С [27].

Требовательность к интенсивности облучения у зеленных культур различна и может меняться в зависимости от фазы роста и развития, способов выращивания [27].

По требовательности к интенсивности облучения, обеспечивающей оптимальные условия для фотосинтеза и органогенеза, овощные культуры ориентировочно делятся на три группы [27]:

- *требовательные* (арбуз, дыня, тыква, огурец, томат, перец, баклажан, фасоль, горох, кукуруза, бамя, капуста кочанная и др.);
- *среднетребовательные* (капуста цветная, кольраби, лук репчатый, чеснок, свекла, морковь, редька, салат, картофель и др.);
- *малотребовательные* (укроп, сельдерей, петрушка, шпинат, щавель, ревень, лук порей, спаржа, многолетний лук и др.).

Кроме интенсивности облучения, для овощных растений имеет большое значение продолжительность светового дня. От его продолжительности происходит ускорение или замедление развития растений.

Растения длинного дня произошли из средних широт. Для образования репродуктивных органов им необходима продолжительность дня 15–17 часов. Поэтому однолетние культуры – редис, салат, шпинат, укроп, китайская капуста –

в условиях продолжительного режима облучения начинают преждевременно цвести, редис не образует корнеплод, а листовые овощи – товарную розетку листьев и кочанов. При сокращенном (10-часовом) дне эти длиннодневные растения не зацветают до осени, усиленно формируя вегетативные органы [27].

Растения короткого дня произошли из тропиков и субтропиков. Для образования репродуктивных органов (цветков, плодов) им необходима продолжительность режима облучения 10–12 часов. К этой группе относятся плодовые овощные: огурец, дыня, томат, перец, баклажан, бамя, фасоль, кукуруза; клубнеплодные: картофель, батат [27].

Фотопериодизмом можно управлять, с помощью различных спектральных составов оптического излучения в разное время суток [27]. Кратковременное облучение некоторых растений, чувствительных к фотопериоду во время длинной ночи, т. е. прерывание периода темноты с использованием красного спектра облучения, позволяет превратить короткий день в длинный [27]. При дневном досвечивании отдельных растений эффект длинного дня зависит от синего и инфракрасного излучения, а красный и зеленый спектры дают эффект короткого дня [27].

Для улучшения режима оптического излучения в защищенном грунте необходимо не допускать загущения и затенения, следить за чистотой облучателей, соблюдать сроки выращивания с учетом требования растений к оптическому излучению, досвечивать рассаду в зимне-весенний период, использовать пленку со светопропусканием не менее 85–90%, при строительстве теплиц сводить к минимуму количество непрозрачных элементов конструкции и окрашивать их в белый цвет, соблюдать ориентацию теплиц коньком с севера на юг [27].

### **1.2.3 Водный режим**

Вода играет важную роль в жизни растений и является незаменимым фактором их нормального роста и развития. Вода входит в состав тканей растения, обеспечивает передвижение питательных веществ, участвует во всех физиологических и биохимических процессах, регулирует температуру листьев.

Недостаток водоснабжения растений приводит к снижению урожая, огрубению тканей, потере товарных и вкусовых качеств овощей. При избыточном водоснабжении овощи становятся водянистыми, снижается содержание сахаров и солей, возникает кислородное голодание корневой системы [27].

Показателем расхода воды при транспирации является транспирационный коэффициент – количество воды в граммах, израсходованное на образование 1г сухого вещества. Коэффициент водопотребления и транспирационный коэффициент различаются у овощных культур и различных сортов. Меняются они в зависимости от условий выращивания, биомассы и продуктивности фотосинтеза. Чем выше эти показатели, тем ниже коэффициенты [27].

Наибольшая потребность в воде приходится на период прорастания семян. На первых этапах формирования растения, водопотребление относительно невелико, но значительно возрастает с началом формирования продуктивных органов. Во время созревания плодов, семян и луковиц потребность во влаге снижается, а избыток становится вредным [27].

Водный режим почвы регулируется поливами. Для этой цели нужно использовать воду, не содержащую вредных солей и имеющую близкую к нейтральной реакцию (рН 5,5-6). Температура воды для полива не должна быть ниже температуры воздуха. При поливе холодной водой в тканях растений требовательных к теплу овощных культур повышается вязкость протоплазмы, понижается сосущая сила, вследствие чего резко снижается поступление в растения воды и, несмотря на наличие воды в почве, наступает так называемая физиологическая засуха [27].

Водный режим в защищенном грунте имеет свои особенности, связанные с малым объемом субстрата, применением повышенных доз минеральных удобрений, высоким приходом солнечного излучения весной и летом, малым – осенью и зимой. Поэтому зимние теплицы имеют двойное регулирование водного режима – поверхностный полив (дождевание и капельный полив) и дренирование субстрата [27].

По требовательности к влажности субстрата овощные растения делят на три группы [27]: требующие влажность субстрата 60–65 % – томат, баклажан, перец,

фасоль, бахчевые; требующие влажность субстрата 70–75 % – капуста, морковь, свекла, укроп, петрушка, щавель, лук порей; требующие влажность субстрата 80–90 % – огурец, салат, шпинат, сельдерей, лук на зеленый лист.

Большое влияние на рост и развитие овощных растений оказывает относительная влажность воздуха. Значительное снижение относительной влажности воздуха при повышенной температуре замедляет транспирацию и фотосинтез, способствует распространению опасных вредителей. Избыточная влажность воздуха способствует формированию у растений рыхлых листьев с небольшим количеством устьиц [27].

Особое внимание следует обращать на требование овощных растений к относительной влажности воздуха в защищенном грунте. Влажность воздуха можно снизить более редкими поливами и повышением температуры воздуха, а также усиленным проветриванием. Относительную влажность воздуха можно повысить снижением вентиляции, обильными поливами, опрыскиванием растений и сооружений защищенного грунта [27].

#### **1.2.4 Воздушно газовый режим**

Атмосферный воздух содержит 78 % азота (N), 21 % кислорода (O<sub>2</sub>), 0,03 % углекислого газа (диоксид углерода, CO<sub>2</sub>) и 0,97 % инертных газов. Из элементов воздушно газовой среды наибольшее значение для растений имеет кислород и углекислый газ [27].

Для дыхания растений необходим кислород, при котором освобождается энергия, необходимая для роста и протекания жизненных процессов. Доступ кислорода необходим надземной части растений и корням. Надземная часть растений не испытывает недостатка в кислороде, но корневая система при уплотнении субстрата и образовании на его поверхности корки, при избыточном увлажнении угнетается, ослабляется ее рост. Это приводит к снижению продуктивности или полной гибели растения [27].

В целях улучшения аэрации в защищенном грунте применяют хорошо аэрируемые субстраты и контролируют водный режим.

Углекислый газ (диоксид углерода,  $\text{CO}_2$ ) необходим растениям для фотосинтеза, так как 45% сухого вещества растения состоит из углерода, который растение усваивает из воздуха. В этой связи для обеспечения растений элементами минерального питания и водой необходимо создавать условия для повышения содержания углекислого газа в воздухе [27].

В условиях защищенного грунта обеспечение углекислым газом осуществляется с помощью сжигания природного газа в газогенераторах, отбора и очищения дымовых газов котельных и пищевой углекислоты «сухого льда». Оптимальные концентрации углекислого газа зависят от интенсивности облучения, а также от герметичности теплицы и площади листьев [27].

### **1.2.5 Пищевой режим**

Потребность овощных растений в минеральном питании различна в течение их индивидуального развития. Зародыш прорастающего семени расходует запасные вещества и не нуждается в минеральном питании, но по мере истощения запасов семени проросток быстро переходит на корневое питание. Потребление минеральных веществ в это время мало, но молодые растения очень чувствительны к составу и концентрации питательного раствора. Недостаточное содержание какого-либо элемента питания может отразиться на последующем росте и развитии растения. По мере роста и развития корневой системы и надземной массы, поглощение элементов питания усиливается, особенно быстро увеличивается интенсивность поглощения азота [27].

Требовательность растений к элементам минерального питания обусловлена биологическими особенностями растений и зависит от – скороспелости, темпов роста и развития, мощности корневой системы, чувствительности растений к реакции среды и концентрации солей в субстрате [27].

По требовательности к элементам минерального питания овощные культуры условно подразделяются на три группы [27]:

– очень требовательные растения – огурец, лук, морковь, чеснок, петрушка, перец, баклажан, капуста цветная и ранняя белокочанная, капуста брюссельская, салат, рассада, брокколи;

– требовательные растения – среднеспелые и поздние сорта белокочанной капусты, томат, свекла, шпинат, кольраби, сельдерей, хрен, фасоль, бобы, тыква, кабачок, дыня;

– среднетребовательные растения – щавель, репа, редька, горох, брюква, редис.

Корневое питание растений зависит не только от их биологических особенностей, но и от интенсивности роста корневой системы, структуры и аэрации почвы, влажности, реакции среды, содержания питательных веществ, форм и соотношений минеральных элементов в субстрате, деятельности микрофлоры, корневых выделений и т.д. [27].

Аэрация субстрата оказывает сильное воздействие на поглощательную функцию корней, почвенные микроорганизмы и связанные с их жизнедеятельностью процессы превращения питательных веществ в субстрате [27].

Наравне с аэрацией субстрата, его температура влияет не только на прорастание семян и развитие всходов, но и на поступление в растительный организм элементов питания. При температурах +10...+11 °С использование растениями фосфора и калия затрудняется, при температуре ниже +5...+6 °С ухудшается поступление азота [27].

Установлено, что содержание достаточного количества влаги в субстрате способствует увеличению общего поступления в растение N, P, K, Ca, Mg, Zn, Cu, Mn, Co, Fe, Mo и B. Недостаток влаги в субстрате затрудняет усвоение растением элементов питания. Избыток влаги приводит к угнетению корневой системы, вызывает голодание растений, в то время как элементов минерального питания может быть достаточно [27].

Недостаток элементов минерального питания проявляется у растений по внешнему виду. При недостатке азота листья бледнеют, желтеют и отмирают, а в

случае его избытка растения становятся темно зелеными. Недостаток фосфора можно определить по фиолетово-красному оттенку листьев на нижней стороне. Фосфорное голодание сильно ограничивает рост корней и надземной части, листья становятся мелкими, завязывание и созревание плодов задерживаются. При недостатке калия наблюдается пожелтение, побурение, а затем отмирание ткани краев листьев. Хлороз проявляется при недостатке магния, когда между жилками листьев появляется бледно желтая окраска. Недостаток кальция приводит к повреждению и отмиранию верхушечных почек и корней. Недостаток железа проявляется в пожелтении листьев (хлороз). Бледная окраска листьев при слабом недостатке железа бывает такой же, как и при недостатке азота. Острый недостаток железа приводит к сильному хлорозу молодых листьев [27].

Рассчитывая количество применяемых минеральных удобрений для выращивания овощных культур, особенно азотных, необходимо учитывать опасность последующего накопления в них нитратов. Повышению накопления нитратов способствует и слабая интенсивность облучения, а оптимальное водообеспечение напротив – снижает накопление нитратов [27].

Так же, снизить содержание нитратов можно с помощью подбора сорта и создания условий, препятствующих их избыточному накоплению – прежде всего скорректировать минеральное питание за счет снижения содержания солей азотной кислоты в субстрате [27].

Исследованиями установлена относительно высокая способность к накоплению нитратов листовыми культурами (шпинат, салат, пекинская капуста, листья сельдерея и петрушки) [31] – [33].

Специфические условия минерального питания складываются в защищенном грунте, где используют почвенные смеси и искусственные субстраты, обеспечивающие снабжение растений водой и элементами минерального питания. Небольшой объем субстрата, интенсивное потребление элементов минерального питания, воды и кислорода требуют постоянного контроля за составом питательного раствора и его корректировки.

### 1.3 Технические средства для выращивания зеленных культур

Важнейшие практические задачи сельского хозяйства базируются на получении новых, более глубоких и обширных представлений о жизни растений, об основных закономерностях их роста, развития и продуктивности.

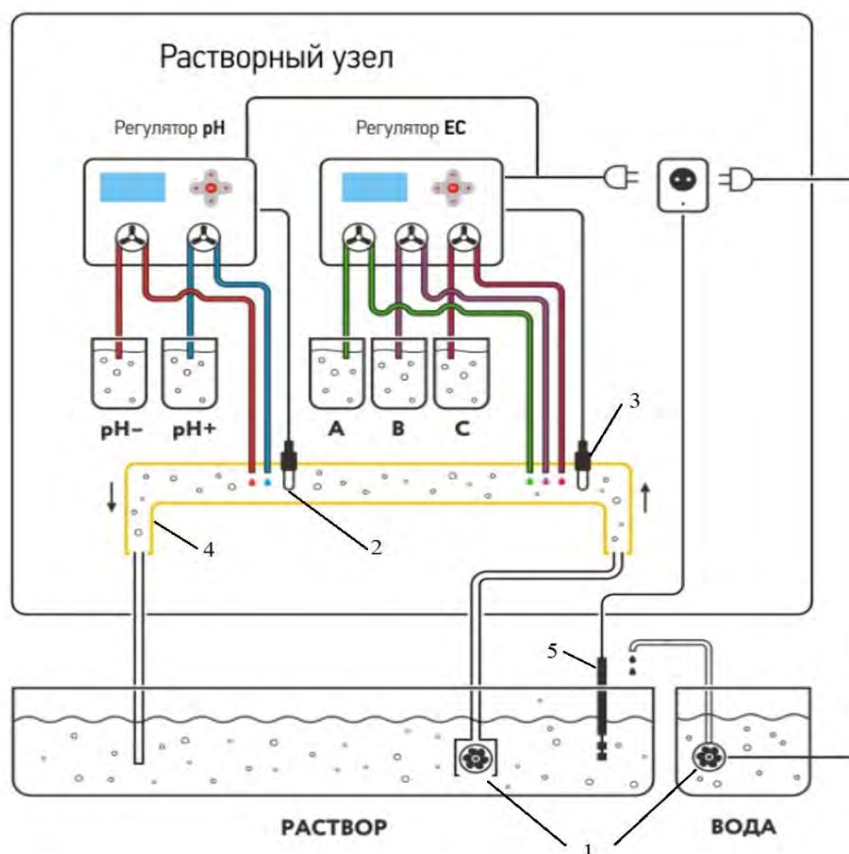
Существующий уровень развития информационно-измерительных и технических систем позволяет исследовать поведение растений в контролируемых искусственных условиях, создаваемых в специальных технических средствах с закрытой агроэкосистемой.

Главным преимуществом и уникальностью таких средств является полная автоматизация процессов регулирования параметров выращивания растений, управляемых вычислительной техникой с системой датчиков, регулирующих посредством технических устройств температуру, интенсивность облучения, влажность и другие важные условия роста и развития растений.

Главная цель создаваемых закрытых агроэкосистем – ускорение процессов роста и развития растений за счет максимального раскрытия их генетического потенциала для круглогодичного и рационального получения зеленных и овощных продуктов.

Технические средства для выращивания зеленных культур можно разделить на 4 основных составляющих: *система создания и поддержки микроклиматических показателей; система приготовления и подачи питательного раствора; система оптического излучения; программно-аппаратное обеспечение.*

*Система приготовления и подачи питательного раствора*, далее растворный узел, обеспечивает приготовление питательного раствора заданной концентрации (ЕС) с оптимальным значением рН путём смешивания с водой двух или более маточных растворов и кислоты (рисунок 7).



1 – насос; 2 – датчик измерения уровня pH; 3 – датчик измерения концентрации солей (TDS-метр); 4 – циркуляционный трубопровод для смешивания маточных и корректирующих растворов; 5 – датчик уровня жидкости.

Рисунок 7 – Принципиальная схема растворного узла

Качественное смешение воды с маточными растворами и кислотой происходит под управлением контроллера, который позволяет обеспечить оптимальные параметры питательного раствора и поддерживает их на заданном уровне. Растворный узел выполняет ключевую роль гидропонной системы и может управлять процессами подготовки и подачи питательного раствора, его нагрева и фильтрации в закрытой агроэкосистеме. Растворные узлы можно разделить на два типа – с собственным резервуаром для приготовления питательных растворов (*миксеры*) и без резервуара, когда перемешивание растворов происходит непосредственно в магистральном трубопроводе [34].

По назначению растворные узлы распределяются по следующим группам: для производства жидких комплексных удобрений; для создания раствора из средств защиты растений пестицидов, гербицидов и ядохимикатов; для

изготовления растворов карбамидо-аммиачных смесей; смешивающие растворные узлы, основной функцией агрегатов которых является смешивание ингредиентов для создания субстанции с нужными свойствами. Функциональность растворных узлов позволяет автоматически корректировать заданные режимы полива по различным внешним факторам: притоку солнечного излучения, окружающей температуре, влажности субстрата [34].

В зависимости от задачи, система приготовления и подачи питательного раствора производит интервальный или круглосуточный полив растений.

Создание совокупности факторов жизнеобеспечения растений, иными словами микроклимата, в закрытой агроэкосистеме для дифференцирования режимов в целях формирования урожая на всём этапе вегетации, является задачей системы создания и поддержки микроклиматических показателей [18].

Система создания и поддержки микроклиматических показателей, позволяет производить данное дифференцирование путем управления и применения технического и электрического обогрева, управления вентиляцией, устройством подачи диоксида углерода, а также устройствами регулирования влажности воздуха (рисунок 8).



Рисунок 8 – Структурная схема управления микроклиматической системой

Основным требованием, предъявляемым к современным техническим системам технологического воздействия на среду и растения в искусственных закрытых агроэкосистемах, является минимизация потребления ресурсов в связи с их высокой стоимостью: занимаемого объема, массы оборудования и материалов, энергопотребления, мощности системы охлаждения, а также трудозатрат на единицу выращенной витаминной зелени.

Особое место среди проблем, с которыми сталкиваются разработчики таких систем, занимает обеспечение заданных условий оптического излучения. Режим оптического излучения является одним из ключевых факторов, определяющих эффективность производственного процесса.

Существует большой выбор приборов оптического излучения для закрытых агроэкосистем, которые различаются источниками оптического излучения, уровнем энергопотребления, интенсивностью облучения, ценой и множеством других параметров.

Основные виды искусственных источников оптического излучения:

- лампы накаливания (недостатки – высокое потребление энергии, недолговечность (лампы сохраняют работоспособность около 1 000 часов), низкая светоотдача (не более 20 лм/Вт), отсутствие синего излучения; достоинство – низкая цена);
- люминесцентные лампы (недостатки – низкий уровень светоотдачи, крупногабаритный корпус (ограничивает доступ естественного оптического излучения), стробоскопический эффект (мерцающее излучение утомляет зрение персонала), трудоемкий монтаж, затратное обслуживание, спектральный состав излучения практически не ускоряет вегетацию; достоинства – экономичнее ламп накаливания);
- натриевые лампы (ДНаТ) (недостатки – неполный спектр оптического излучения и тепловой эффект, вызывающий вытягивание стебля, ожоги листьев и цветов (при слишком низком размещении облучателей), длительный период остывания (более 5 минут) – при частых повторных включениях, лампы быстро

выходят из строя; достоинства – высокая светоотдача и долговечность (не менее 20 000 часов), подходят для стимуляции цветения;

- металлогалогенные лампы – имеют максимальное сходство с солнечным оптическим излучением в плане спектрального диапазона. Однако данное достоинство компенсируется высокой стоимостью приборов и относительно малым сроком эксплуатации (до 10 000 часов – вдвое короче, чем у ламп ДНаТ);

- светодиодные облучатели – способны перекрыть весь диапазон оптического излучения, от красного до ультрафиолетового цвета, поэтому являются выгодной альтернативой вышеперечисленным лампам и лучшим решением для организации тепличных систем.

Светодиодные системы обеспечивают ряд преимуществ перед традиционными источниками оптического излучения: энергоэффективность; компактность; стабильность цвета и цветовой температуры; увеличенный ресурс (от 20000 до 100000 часов); работа при низких температурах и стойкость к воздействиям вибраций, что позволяет использовать их в суровых условиях; управление оптическим излучением при помощи цифровых контроллеров, обеспечивающих максимальную эффективность и тонкую настройку; отсутствие требований к прогреву или отключению и вредного воздействия циклической подачи питания и диммирования; не требуют специального обращения и утилизации, являются безопасными для окружающей среды.

Современные светодиоды перекрывают весь диапазон оптического излучения, от красного до ультрафиолетового цвета.

Таким образом, при использовании светодиодов, можно получить источник оптического излучения с практически любым спектральным составом в видимом диапазоне.

Однако, при использовании светодиодных систем в качестве источника оптического излучения для выращивания овощных культур, помимо задачи выбора интенсивности облучения, появляется задача его интеграции со спектральными характеристиками. Ряд работ показал, что излучение от светодиодов с узкополосным спектром длин волн может вызывать у отдельных видов растений

физиологические изменения. Узкополосное красное излучение оказывает существенное влияние на рост и развитие растений, может стимулировать увеличение корневой системы, приводить к удлинению побегов и снижению их массы. В зависимости от биологических особенностей вида растений и под действием красного излучения может уменьшаться или увеличиваться площадь листовой поверхности. Таким образом, для предсказуемой вегетации растений и повышения их продуктивности, крайне важна оптимизация спектрального состава светодиодного излучения [35] – [44].

*Программно-аппаратное обеспечение* решает основные задачи:

- обеспечивает включение в общую систему всех технических систем и управляет работой внешних устройств;
- позволяет обмениваться и обрабатывать практически любые виды информации для технологических задач, выполнение которых требует автоматизации.

Основные области применения программно-аппаратного обеспечения в закрытых агроэкосистемах:

- управление базами данных;
- хранение и передача данных об изменениях режима оптического излучения и микроклиматических показателей;
- индикация и автоматическое управление параметрами жизнеобеспечения растений.

Создание качественно новых технологий возделывания сельскохозяйственных культур и переход на использование интегрированных, ресурсосберегающих и «биологизированных» технологий позволят обеспечить более высокие темпы роста продуктивности в сельском хозяйстве. «Биологизация» технологий заключается в максимальном соответствии стратегии адаптивной интенсификации растениеводства, учете биологических требований конкретных культур. Это подразумевает дифференцированное и комплексное применение генетических, природных и технических ресурсов создания оптимальных условий для роста сельскохозяйственных культур. Такой подход обеспечивает устойчивый

рост продуктивности сельского хозяйства, способствует ресурсосбережению и обеспечивает экологическую безопасность производства [45] – [48].

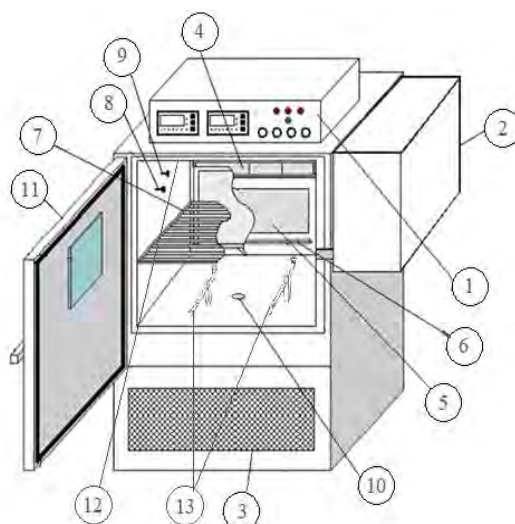
Естественно, что для каждой культуры, потребуется создание своих индивидуальных условий выращивания. Таким образом, возрастает актуальность исследований, направленных на разработку методов и средств выращивания зеленных культур в закрытых агроэкосистемах с применением цифровых технологий.

#### **1.4 Анализ моделей и технических средств по выращиванию зеленных культур в закрытых агроэкосистемах**

Для решения задач, связанных с селекцией овощных культур, требуется обеспечение возможности изменения микроклиматических условий и режимов оптического излучения, периодичное или нерегулярное орошение, установки низкого уровня питания.

В целях обеспечения требуемых режимов оптического излучения и микроклиматических условий в овощеводстве защищенного грунта и при отработке технологических процессов выращивания растений в селекции овощных культур применяются климатические камеры.

*Климатическая камера (фитотрон)* – это специализированное оборудование, представляющее собой закрытую агроэкосистему для проведения научных исследований в области селекции, физиологии и биотехнологии растений (рисунок 9) [5].



1 – блок автоматического управления; 2 – блок генератора тумана; 3 – холодильный блок; 4 – блок вентиляторов; 5 – блок испарителя; 6 – блок ТЭН; 7 – лоток/полка; 8 – датчик температуры; 9 – датчик влажности; 10 – слив; 11 – дверь; 12 – облучатель; 13 – система полива.

Рисунок 9 – Схема типовой климатической камеры

Основной задачей климатических камер является обеспечение режима оптического излучения и стабильных микроклиматических условий, влияющих на показатели роста и развития растений [45].

Исследования, с применением климатических камер, посвящённые селекции овощных культур и овощеводству защищенного грунта, как правило, узконаправленны и рассматривают результаты влияния отдельных лимитирующих факторов на рост и развитие растений. Ввиду недостаточных международных исследований, в которых анализируются многофакторные эксперименты с применением автоматизированных средств выращивания, в данной работе рассматриваются публикации авторов, которые сходны по своим характеристикам, непосредственно влияющим на рост и развитие растений [5].

Проведение исследований по изучению влияния основных лимитирующих факторов (температуры, влажности, оптического излучения, концентрации углекислоты и др.) на показатели роста и развития растений не теряют своей актуальности в овощеводстве [50], [51].

Недостаточно изучено влияние спектрального состава оптического излучения на изменение состава основных гормонов растений, выращиваемых в

закрытых агроэкосистемах [52] – [54]. Оптическое излучение играет определяющую роль в жизни растений, так как представляет собой неотъемлемую часть «световой фазы» фотосинтеза. Влияние спектрального состава оптического излучения на процессе вегетации растений стало предметом многочисленных изысканий [36] – [60].

В связи с глобальным изменением климата, возникла необходимость понимания механизмов реакции сельскохозяйственных культур на повышенные концентрации углекислоты. Особую актуальность приобрели исследования по определению оптимальной концентрации углекислоты для различных культур, при которых его негативное влияние будет минимальным, а позитивное максимальным [61] – [63].

Для получения экологически чистой продукции и увеличения урожайности агрокультур, учеными из разных стран мира проводятся исследования, направленные на разработку новых технологий производства в защищенном грунте [64], [65]. Применение климатических камер для отработки технологий культивирования различных культур, путём проведения многофакторных опытов, позволит оптимизировать процесс производства для развития сельского хозяйства в России и за рубежом. Однако, для проведения многофакторных опытов требуется достаточное техническое и интеллектуальное обеспечение [5].

В этой связи необходимо оценить существующий уровень технического обеспечения технологий выращивания овощных культур и определить проблемы развития климатических камер, а также установить уровень и пути развития технического обеспечения процессов выращивания растений в закрытых агроэкосистемах климатических камер.

Методической основой исследования являются информационный анализ и синтез данных с применением сравнительного метода технических решений, направленных на автоматизацию процесса выращивания овощных культур в климатических камерах.

В таблице 2 представлен аналитический обзор по техническому и функциональному обеспечению процессов выращивания растений климатических камер отечественного и зарубежного производства [5].

Таблица 2 – Технические и функциональные особенности климатических камер

| №                                                           | Модель<br>(производитель)<br>климатической<br>камеры                 | Диапазон температур от +10 до<br>+35°C | Диапазон изменения<br>влажности, % | Имитация дня/ночи | Изменение интенсивности<br>облучения | Изменение оптического<br>излучения | Система полива | Система контроля и подачи<br>углекислого газа | Система вентилирования | Обмен данными с ПК и/или с<br>облачным хранилищем | Система фильтрации воды | Система видеонаблюдения |
|-------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------|-------------------|--------------------------------------|------------------------------------|----------------|-----------------------------------------------|------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1                                                           | 2                                                                    | 3                                      | 4                                  | 5                 | 6                                    | 7                                  | 8              | 9                                             | 10                     | 11                                                | 12                      | 13                      |
| 1                                                           | LGC-5301 (DAIHAN LabTech Co., Ltd)                                   | +                                      | 30-98                              | +                 | +                                    | +                                  | +              | +                                             | +                      | +                                                 | +                       | +                       |
| 2                                                           | МИР-Компакт 2+ (ABTex)                                               | +                                      | 30-90                              | +                 | +                                    | +                                  | +              | +                                             | +                      | +                                                 | -                       | +                       |
| 3                                                           | Plant Growth Chamber BJPX-A300 (BIOBASE)                             | +                                      | 50-90                              | +                 | +                                    | -                                  | +              | +                                             | +                      | -                                                 | -                       | -                       |
| 4                                                           | KK 350 (HEMEN)                                                       | +                                      | 30-90                              | +                 | +                                    | +                                  | -              | -                                             | +                      | -                                                 | -                       | -                       |
| 5                                                           | CM 4/50-295 PP (CM Климат)                                           | +                                      | 50-90                              | +                 | +                                    | -                                  | -              | -                                             | +                      | +                                                 | -                       | -                       |
| 6                                                           | PG034 (Darwin Chambers)                                              | +                                      | 40-90                              | +                 | +                                    | -                                  | -              | -                                             | +                      | -                                                 | -                       | -                       |
| 7                                                           | MSH-221 (HTK Криотехника)                                            | +                                      | 10-80                              | +                 | -                                    | -                                  | -              | -                                             | +                      | +                                                 | -                       | -                       |
| 8                                                           | PSI FytoScope FS-RI 1600 Reach-In (PSI - Photon system Instruments)  | +                                      | опц.<br>40-80                      | +                 | -                                    | -                                  | -              | -                                             | +                      | +                                                 | -                       | -                       |
| 9                                                           | Green Walk-in Plant Growth Chamber (Kaleidoscope Climatic Solutions) | +                                      | 30-98                              | +                 | +                                    | -                                  | -              | -                                             | -                      | -                                                 | -                       | -                       |
| 10                                                          | Фитотрон ЛиА-1 (Лазеры и Аппаратура)                                 | +                                      | -                                  | +                 | -                                    | -                                  | +              | -                                             | +                      | -                                                 | -                       | -                       |
| 11                                                          | KBW 400 (Binder)                                                     | +                                      | -                                  | -                 | +                                    | -                                  | -              | -                                             | +                      | +                                                 | -                       | -                       |
| опц. – опциональная (дополнительная) установка оборудования |                                                                      |                                        |                                    |                   |                                      |                                    |                |                                               |                        |                                                   |                         |                         |

Климатические камеры можно разделить на несколько типов: климатические камеры тепло-холод (камеры 10, 11); климатические камеры тепло-холод-влажа (камеры 4, 9); комбинированные климатические камеры (1-3, 5-8) [5].

В целях автоматизации процессов фиксации изменений микроклиматических параметров, современные климатические камеры позволяют производить запись данных в хронологическом порядке, визуализировать эти данные в графики и таблицы,

а также осуществляют передачу данные через USB-кабель/Ethernet, и имеют возможность удаленного управление с ПК или мобильного устройства. Данным характеристикам соответствуют климатические камеры 1,2, 5, 7, 8 и 11 (таблица 2) [5].

Среди элементной базы цифровых технологий сельского хозяйства особое место занимают датчики и сенсоры, с помощью которых получают исходную первичную информацию о физиологическом состоянии растений и показателях окружающей среды, в которой они находятся. Данная информация необходима для дальнейшего управления технологическим процессом сельхозпроизводства – построения алгоритма управляющего воздействия, принятия решения в интеллектуальной технике. Такими датчиками и сенсорами в полной мере располагают климатические камеры 1-3 (таблица 2) [5].

Отдельно, можно отметить климатические камеры серии МИР-компакт от производителя АНО «АВТех» и камеры LGC-5301 Daihan Labtech», которые, в отличие от других производителей имеют технологические особенности. Камеры серии МИР-компакт оснащаются роботизированной системой флуоресцентной визуализации для высокопроизводительного скрининга и мультиспектрального анализа растений [66]. Данная система позволяет производить анализ параметров флуоресценции хлорофилла, который представляет собой инструмент изучения воздействия самых разнообразных экологических факторов на растительные организмы. Исследования кинетики флуоресценции могут дать важную информацию, касающуюся характера активности фактора внешней среды по воздействию на параметры фотосинтеза – применимую в целях экологического мониторинга, а также в целях оценки устойчивости растений. Камеры Daihan Labtech (LGC-5301) оснащены современной системой цифровой видеофиксации Lab-Dog, которая позволяет осуществлять видеозапись в ходе экспериментальных исследований и мониторинг работы камеры при помощи сети Ethernet [67].

Для большинства овощных культур оптимальным интервалом влажности воздуха является 50–80%, в то время как для растений в период адаптации к нестерильным условиям среды (после культуры *in vitro*) необходим ещё более влажный воздух (до 90–95%) [54], [62]. Влажность воздуха является

лимитирующим фактором в жизни растений, поэтому необходимо учитывать наличие технических средств увлажнения воздуха в климатической камере. Исходя из таблицы 2, данными техническими средствами оснащены камеры 1-6 и 9 [5].

Оптическое излучение реализует программу фотоморфогенеза, определяющую морфологию растений, их рост и развитие [58]. Биосинтетическая функция оптического излучения состоит как в непосредственном участии оптического излучения в биосинтетическом процессе, так и в воздействии на каталитическую активность ряда ферментов и определённым образом зависит, как и энергетическая функция, от уровня PPF и спектрального состава оптического излучения. Диапазон длин волн оптического излучения, имеющих основное субстратно-регуляторное значение для растений, простирается от 280 до 750 нм [5].

Таким образом, для реализации энергетического потенциала растений, их полноценного роста и развития, требуется наличие облучателей с мультиспектральным регулированием, которые на каждом этапе роста культуры реализуют оптимальные режимы оптического излучения. Соответствующим функционалом обладают модели климатических камер 1-2 и 4 (таблица 2).

Одна из ключевых проблем при выращивании растений – это своевременный и качественный полив. В связи с этим возникает необходимость в устройствах, которые позволяют дозированно насыщать растения влагой и удобрениями. В результате анализа технической документации, было выявлено, что существенным недостатком подавляющего большинства представленных моделей климатических камер, является отсутствие растворного узла и системы полива, в то время как исследовательские работы [68] – [70] свидетельствуют о преимуществах применения автоматизированных систем полива, среди которых: возможность равномерного распределение влаги, установка индивидуальной программы полива для разных видов растений, контроль над расходом воды, снижение трудозатрат на полив и обработку растений, удаленный мониторинг и управление системой полива. Частые манипуляции с растениями для проведения полива и подкормок нарушают среду выращивания растений, приводят к изменениям газового состава и микробиологической среды, что в итоге негативно сказывается на сроках выращивания [5].

В результате патентного поиска по вегетационным установкам и климатическим камерам для выращивания растений, были отобраны несколько изобретений наиболее близкие по техническим решениям к разрабатываемой установке.

Вегетационная установка, (патент RU 187369, Вегетационная установка, МПК A01G 9/24, 2018) включающая полый прямоугольный корпус с дверцами, который разделен на два отсека, источники оптического излучения, вентиляторы, система управления приточным воздухом, датчики температуры, датчики влажности воздуха, систему капельного полива и подачи углекислого газа (CO<sub>2</sub>) [71].

Недостатком известного устройства является узкий диапазон регулируемых микроклиматических условий, реализуемых при выращивании растений, который зависит от качественного состава приточного воздуха, его температуры и влажности, что ограничивает использование камеры для исследовательских целей.

Существует климатическая камера, включающая рабочую зону с расположенными в нижней и верхней частях вентиляционными отверстиями, температурными датчиками, выполненные с вентиляционными пазами и окнами стеллажи, установленные над контейнерами панели со светодиодными облучателями, и систему управления режимами оптического излучения, светодиоды размещены группами из светодиодов с различными спектральными диапазонами, воздухоохлаждающую установку с блоком выключения и устройство для создания регулируемой газовой среды [72].

Недостатком данной климатической камеры является низкая энергоэффективность, так как облучатели оказывают непосредственное влияние на микроклимат внутри камеры, а именно приводят к выделению избыточной тепловой энергии, которая требует частого включения воздухоохлаждающей установки для поддержания заданных температурных значений.

Многосекционная вегетационная установка для выращивания растений, которая включает в себя следующие системы: систему освещения; систему полива; систему регулирования состава газовой среды растений; систему кондиционирования и увлажнения воздуха. Параметры температуры, влажности, газового состава воздуха и режим полива растений в каждой секции вегетационной

установки поддерживаются на одном уровне, в то время как параметры облучения имеют возможность варьирования в отдельно взятой секции [73].

Недостатком устройства является отсутствие растворного узла в системе полива растений для проведения сравнительных параллельных экспериментов с варьированием кислотно-щелочного баланса питательного раствора и его концентрации при поддержании других параметров микроклимата и режима оптического излучения на одном уровне.

В результате аналитического обзора было установлено, что более 90% климатических камер, предлагаемых на отечественном рынке, не используют всех имеющихся возможностей цифровых интеллектуальных технологий и технических средств, обладают узким набором регулируемых параметров, которые ограничивают возможность проведения многофакторных опытов по влиянию климатических условий на рост и развитие агрокультур [5].

Установлены универсальные модели (LGC-5301, МИР-Компакт 2, ВРХ-А300 (таблица 2)), обладающие высокой степенью автоматизации процессов регулирования оптического излучения и микроклиматических условий роста и развития растений [5].

К наиболее распространенным недостаткам в техническом обеспечении процессов выращивания растений в закрытых агроэкосистемах климатических камер относятся:

- отсутствие возможностей изменения интенсивности и спектрального состава оптического излучения;
- отсутствует система полива и/или стационарный растворный узел для приготовления многокомпонентных питательных растворов;
- отсутствует обмен данными с ПК и/или с облачным хранилищем;
- отсутствует система контроля и/или подачи углекислого газа.

Таким образом, для развития современных климатических камер с закрытыми агроэкосистемами, как средства выращивания овощных и зеленных культур, необходимо их дальнейшее совершенствование с применением интеллектуально-цифровых технологий и новых технических средств [5].

## 1.5 Выводы по главе 1

1. Глобальная урбанизация в современном мире приводит к активному развитию и внедрению технологий интенсивного выращивания зеленных культур на вертикальных фермах в условиях городской среды. Наиболее богатый по витаминному, макро- и микроэлементному составу среди многообразия зеленных культур, пригодных для выращивания на вертикальных фермах в закрытых агроэкосистемах, являются шпинат. Актуальность выращивания данной культуры обусловлена потребностью присутствия зелени в рационе населения в течение всего года для поддержания здоровья и обеспечения долголетия.

2. Определены факторы, которые влияют на рост и развитие зеленных культур: температура окружающей среды; энергия оптического излучения; влажность воздуха и субстрата; минерализация питательного раствора или грунта; состав и движение воздуха.

3. Изучены технические и функциональные особенности климатических камер с закрытой агроэкосистемой для выращивания зелени. Выявлены недостатки технического обеспечения процессов выращивания овощных и зеленных культур в закрытых агроэкосистемах климатических камер, к которым относятся: отсутствие возможностей изменения интенсивности и спектрального состава оптического излучения; отсутствует система полива и/или стационарный растворный узел для приготовления многокомпонентных питательных растворов; отсутствует обмен данными с ПК и/или с облачным хранилищем; отсутствует система контроля и/или подачи углекислого газа.

4. Определены технические решения для эффективного выращивания зеленных культур в закрытых агроэкосистемах, к которым относятся: система создания и поддержки микроклиматических показателей; система приготовления и подачи питательного раствора; система оптического излучения; программно-аппаратное обеспечение.

## **1.6 Цели и задачи исследования**

Исходя из вышеизложенного, целью данной работы является разработка методов и технических средств выращивания шпината в закрытых агроэкосистемах с цифровым управлением ростом растений для повышения их продуктивности.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

1. Проанализировать технологии и технические средства по выращиванию зеленных культур.
2. Теоретически обосновать методы, параметры и режимы функционирования закрытой агроэкосистемы для выращивания шпината.
3. Разработать техническое средство для выращивания шпината в закрытой агроэкосистеме с применением цифровых технологий управления ростом.
4. Провести экспериментальные исследования по определению влияния спектрального оптического излучения на продуктивность выращиваемого шпината в закрытой агроэкосистеме до товарной спелости.
5. Оценить экономическую эффективность выращивания шпината в разработанной закрытой агроэкосистеме.

## **2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЗАКРЫТОЙ АГРОЭКОСИСТЕМЫ ПО ВЫРАЩИВАНИЮ ЗЕЛЕННЫХ КУЛЬТУР НА ПРИМЕРЕ ШПИНАТА**

### **2.1 Исследование факторов, влияющих на эффективность выращивания шпината**

Шпинат – холодостойкая и влаголюбивая культура. При выращивании в открытом грунте, в зависимости от сорта, розетка листьев шпината переносит кратковременные заморозки от  $-6^{\circ}\text{C}$  до  $-8^{\circ}\text{C}$ . Прорастание семян начинается при  $3...5^{\circ}\text{C}$ , массовое прорастание наступает при температуре  $8...15^{\circ}\text{C}$ . Для нормальной вегетации растения требуется температура  $15...19^{\circ}\text{C}$ , более высокие температуры вызывают раннее стеблевание [74].

Один из основных параметров, оказывающих влияние на фотосинтез и обуславливающих режим роста и развития растения, является влажность, так как именно вода участвует в формировании органических веществ [75].

Для поддержания постоянного уровня влажности в закрытой агроэкосистеме целесообразно осуществлять мониторинг температуры воздуха и воды датчиками температуры и влажности [75].

Существует зависимость абсолютной влажности от температуры воздуха, так теплый воздух способен удержать большее количество влаги, чем холодный.

На основе анализа источников [76] и их интерпретации получена зависимость абсолютной влажности воздуха от его температуры при 100% относительной влажности и атмосферном давлении 755 мм рт. ст. (рисунок 10).

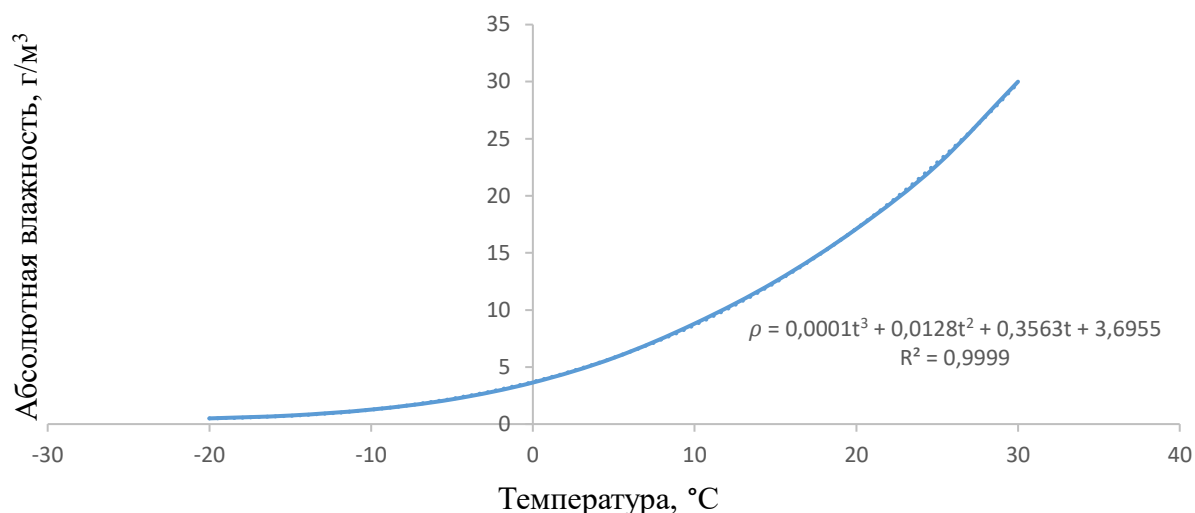


Рисунок 10 – Зависимость абсолютной влажности воздуха от его температуры при 100% относительной влажности

Данная зависимость в совокупности с системой мониторинга позволяет автоматизировать процессы стабилизации микроклиматических параметров предупредив критические значения при избытке или дефиците влаги, которые оказывают значительное влияние на рост и развитие растений [75].

Недостаток влаги снижает урожайность и качество шпината, и также ускоряет стеблевание. Оптимальная влажность воздуха в пределах 60-70%. Предпочитает влажные субстраты с реакцией среды pH 6-6,5 [74].

Шпинат – длиннодневное растение. Для формирования крупных листьев рекомендована продолжительность дня 10-13 часов. В открытом грунте выращивают ранней весной, в летне-осенний период, а также озимыми посевами [74].

Основные болезни шпината: антракноз, корневая фузариозная гниль, пероноспороз, курчавость, мозаика; из насекомых большой вред наносит свекловичная муха.

Техническая спелость зелени шпината (5-10 настоящих листьев) наступает на 25...40-й день после всходов. Уборка зелени, чаще всего происходит в день реализации, это связано с особенностями хранения. Уборку проводят утром, в сухую погоду. Урожайность шпината колеблется от 3 до 3,5 кг зелени с 1 м² в зависимости от сорта, срока посева и климатической зоны [74].

Для исследования элементов технологии возделывания шпината в условиях закрытой агроэкосистемы климатической камеры необходимо определить факторы, влияющие на эффективность выращивания шпината.

*Эффективность выращивания шпината* – комплексный показатель, характеризующий продуктивность растений и сроки его выращивания в зависимости от режима оптического излучения и микроклиматических условий. Целевая функция эффективности выращивания выглядит следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathcal{E}_{\text{в.ш.}} \rightarrow \max, \\ \text{при, } K_{\text{п}} \rightarrow \max; \\ P_V \rightarrow \text{opt}; \\ P_t \rightarrow \text{opt}; \\ P_{\text{PPFD}} \rightarrow \text{opt} \\ Z_{\text{сум}} \rightarrow \text{opt} \end{array} \right. \quad (1)$$

где,  $\mathcal{E}_{\text{в.ш.}}$  – эффективность выращивания шпината, %;

$K_{\text{п}}$  – комплексный показатель, характеризующий продуктивность растений, кг/м<sup>2</sup>;

$P_V$  – параметры влажности, %;

$P_t$  – параметры температуры, °C;

$P_{\text{PPFD}}$  – параметры оптического излучения, (плотность фотосинтетического фотонного потока (*PPFD*) мкмоль фотонов м<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>);

$Z_{\text{сум}}$  – суммарные затраты на единицу продукции, руб./ед.п.

В связи с тем, что температура и влажность для выращивания шпината известны, в данной работе исследования направлены на поиск оптимальных параметров оптического излучения для его эффективного выращивания.

Известно, что растения используют энергию света для осуществления фотосинтеза – процесса, в ходе которого они преобразуют углекислый газ и воду в органические соединения, необходимые для роста и развития. Данный процесс является одним из ключевых процессов в жизни растений.

Биосинтетическая функция энергии оптического излучения состоит как в непосредственном участии оптического излучения в биосинтетическом процессе, так и в воздействии на каталитическую активность ряда ферментов и, как и

энергетическая функция, зависит от уровня фотосинтетического потока фотонов и спектрального состава оптического излучения [5].

В естественных условиях вегетации растений, уровень облучения и характер оптического излучения подвергаются значительным изменениям. В искусственных условиях, при отсутствии естественного оптического излучения, создание оптимальных условий освещения с помощью искусственных источников излучения требует глубокого изучения спектрального состава искусственных источников оптического излучения применительно к конкретной культуре и условиям её выращивания [77].

Возможность широкого варьирования светотехнических характеристик светоизлучающих диодов, позволяет оптимизировать спектр облучателя не только под вид растения, но и под вегетационный период их роста [78].

Таким образом, открывается возможность целенаправленного управления урожайностью зеленных культур и изменения их питательных качеств.

## **2.2 Исследование параметров и режимов работы закрытой агроэкосистемы по выращиванию зеленных культур**

Создание в климатической камере микроклиматического режима, который строго соответствует агрономическим нормам и видовым особенностям выращиваемых растений является одной из основных задач, при разработке современных систем управления микроклиматом.

Организация процесса выращивания растений в закрытом пространстве с обеспечением различных климатических условий, которые позволят исследовать реакции растений на различные сочетания факторов среды, представляет собой сложную технологическую задачу.

В свою очередь формирование и поддержка значений микроклиматических параметров в климатической камере, требуют высокой степени точности работы технического оборудования, способствующих минимизации стрессовых реакций у растений [75].

Выделяют три последовательные фазы стрессовых реакций растений на воздействие неблагоприятных факторов: тревога (торможение процессов жизнедеятельности; в случае сильного и быстрого воздействия стрессора, возможна гибель растения в фазе тревоги), адаптация (растение приспосабливается к стрессору продолжая жизнедеятельность, наблюдается ослабление синтетических процессов и падение продуктивности), истощение (если адаптивный потенциал растений недостаточен для того, чтобы противостоять влиянию стрессора) (рисунок 11) [79].



Рисунок 11 – Фазы ответной реакции растений на действие стрессора

Если же условия среды нормализуются и воздействие стрессора прекращается, то в растении включаются процессы устранения повреждений и восстановления функций.

В этой связи, для разработки и выбора исполнительных технических средств создания и поддержки микроклимата, а также защиты растений от стрессовых реакций необходимо определить параметры и режимы работы климатической камеры.

Исследования отдельных зеленных культур, связанные с изучением влияния лимитирующих факторов (температуры, влажности) на показатели роста и развития растений не теряют своей актуальности в овощеводстве [51], [80] – [84]. Результаты

таких исследований используются в разработке систем прогнозирования продуктивности и направлены на интенсификацию производства зеленных культур.

В целях поддержания оптимальных условий работы механизмов саморегуляции растений важно обеспечить вентиляцию внутреннего пространства климатической камеры.

Вентиляция необходима не только для поступления в камеру свежего воздуха, но и для отвода из неё излишков влаги, образующихся в процессе роста и развития растений. В противном случае, возможно выпадение конденсата на стенках климатической камеры, а следствием систематически высокого содержания пара в воздухе является появление плесени на поверхности субстрата, стенах климатической камеры и лотках.

Воздухообмен по избыткам влаги в камере рассчитывается по формуле [85]:

$$L = W / (\rho(d_{уд} - d_{пр}), \text{м}^3/\text{час} \quad (2)$$

где  $W$  – выделение влажности в камере, кг/час;

$\rho$  — плотность воздуха в помещении, кг/м<sup>3</sup>;

$d_{уд}$  – содержание влаги в воздухе, что удаляется системой вентиляции, г/кг;

$d_{пр}$  – содержание влаги в воздухе, который подается, г/кг.

При моделировании вентиляционной системы, учитываются процессы воздухообмена по теплоизбыткам и газовыделениям (CO<sub>2</sub>). Расчет по данным процессам выполняется в соответствии с данными формулами [85]:

$$L = 3,6 \cdot Q_{изл} / (\rho \cdot c \cdot (t_{уд} - t_{пр})), \text{м}^3/\text{час} \quad (3)$$

где  $Q_{изл}$  – количество теплоты, которая выделяется в камере, Вт;

$\rho$  – плотность воздуха в помещении, кг/м<sup>3</sup>;

$c$  – массовая теплоемкость воздуха;

$t_{уд}$  – температура воздуха, который удаляется вентиляцией, °С;

$t_{пр}$  – температура воздуха, что подается, °С.

$$L = K / (K_{гдк} - K_{пр}), \text{м}^3/\text{час} \quad (4)$$

где  $K$  – весовое количество газов, что выделяются в камере, л/ч;

$K_{гдк}$  – предельно допустимая концентрация газов, л/м<sup>3</sup>;

$K_{пр}$  – концентрация газов в подающемся воздухе, л/м<sup>3</sup>.

Регулирование вентиляционной системы позволит уменьшить действие стрессовых факторов, связанных с видовыми особенностями транспирации фотосинтезирующих органов растений.

При выборе спектрального состава излучения каждого из светоизлучающих диодов необходимо учитывать их эффективность (светоотдачу), которая зависит от материала полупроводникового кристалла и как следствие длины волны излучения. Согласно ГОСТ Р 57671-2017 «Приборы облучательные со светодиодными источниками света для теплиц. Общие технические условия» эффективность приборов в области ФАР, должна быть не менее 2,0 (мкмоль/с)/Вт - для приборов, предназначенных для облучения растений сверху [86].

Расстояние от источника излучения до облучаемого объекта обуславливает выбор единичной мощности светоизлучающих диодов. Благодаря конструктивному исполнению светоизлучающие диоды формируют более интенсивное излучение в центре, снижая степень облученности к краям угла рассеивания. В целях снижения неравномерности облученности на поверхности выращивания растений при использовании комбинаций из нескольких светоизлучающих диодов следует применять диффузные рассеиватели с «полуширокой» или «широкой» кривой распределения интенсивности облучения (рисунок 12) [87].

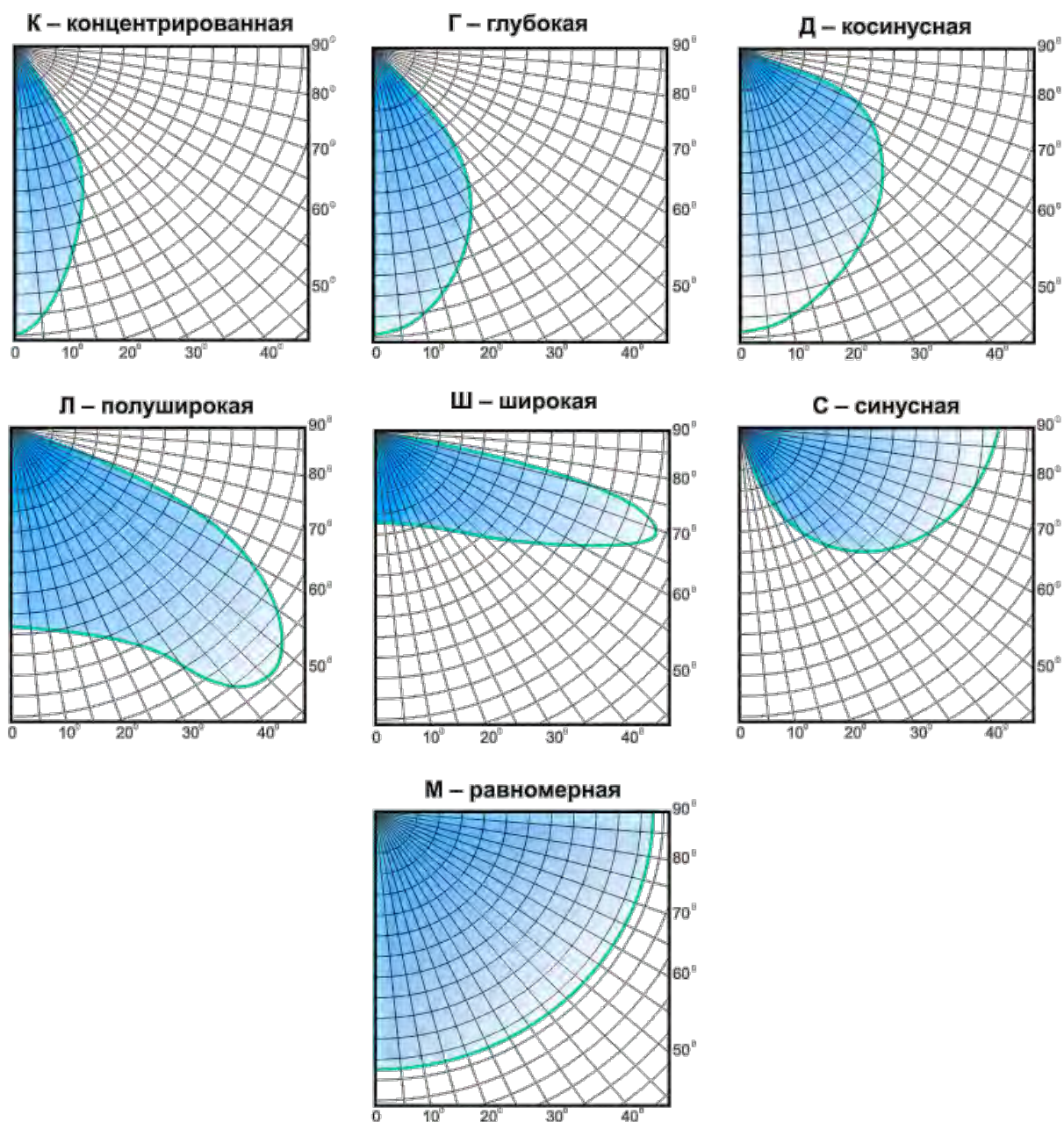


Рисунок 12 – Виды кривых светораспределения диффузных рассеивателей

Для разработки фитооблучателей с заданным соотношением спектра ФАР производится расчет спектральной плотности излучения по формуле [88]:

$$\varphi(\lambda) = \sum_{i=1}^n q_i \times \varphi_i \quad (5)$$

где  $q_i$  – количество светодиодов  $i$ -го цвета;

$\varphi_i$  – спектральная плотность излучения светодиода  $i$ -го цвета;

$n$  – количество светодиодов в облучателе.

Зная спектральную плотность излучения отдельных светодиодов, можно аппроксимировать кривые излучения и получить расчетные светотехнические показатели проектируемых фитооблучателей, что позволит определить оптимальное расстояние от источника излучения до облучаемого объекта при заданных значениях экспериментальных исследований, а также определить тепlopоступления от искусственных источников оптического излучения [89].

Тепlopоступления от источников искусственного оптического излучения учитываются при моделировании вентиляционной системы. Эти тепlopоступления зависят от принятого уровня интенсивности облучения камеры и удельных тепловыделений от установленных облучателей и определяются по формуле [90]:

$$Q_{\text{осв}} = E \cdot F_{\text{пл}} \cdot q_{\text{ср}} \cdot h_{\text{осв}}, \text{ кДж/ч} \quad (6)$$

где  $F_{\text{пл}}$  – площадь освещаемой поверхности камеры ( $\text{м}^2$ );

$E$  – общая освещенность камеры (лк);

$q_{\text{ср}}$  – средние удельные тепловыделения ( $\text{Вт}/(\text{лк} \cdot \text{м}^2)$ ) (таблица 3);

$h_{\text{осв}}$  – коэффициент равен 1, если облучатели находятся непосредственно в камере, и 0.45 – если облучатели располагаются в вентилируемом коробе.

Таблица 3 – Удельные тепловыделения для облучателей с светоизлучающими диодами и люминесцентными лампами

| Тип<br>облучателя     | Средние удельные тепловыделения $q_{CP}$ , Вт/(лк·м <sup>2</sup> ), для камер площадью, м <sup>2</sup> |         |           |        |         |           |
|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|-----------|--------|---------|-----------|
|                       | Менее 50                                                                                               |         |           | 50-200 |         |           |
|                       | При высоте камеры, м                                                                                   |         |           |        |         |           |
|                       | До 3,6                                                                                                 | 3,6-4,2 | Более 4,2 | До 3,6 | 3,6-4,2 | Более 4,2 |
| Прямого излучения     | 0,077                                                                                                  | 0,105   | 0,202     | 0,058  | 0,063   | 0,074     |
| Диффузного излучения  | 0,116                                                                                                  | 0,143   | 0,166     | 0,079  | 0,088   | 0,102     |
| Отраженного излучения | 0,161                                                                                                  | 0,227   | 0,264     | 0,154  | 0,200   | 0,264     |

Для разработки автоматической системы управления микроклиматическими параметрами (влажность, температура, вентиляция) и режимами оптического излучения (интенсивность облучения, спектральный состав оптического излучения) предложена структурная модель климатической камеры управляемого выращивания зеленных культур (рисунок 13) [75].



Рисунок 13 – Структурная схема модели климатической камеры управляемого выращивания овощных культур

Работа автоматической системы управления полностью определяется программным обеспечением по установленным микроклиматическим параметрам и режимам оптического излучения [75].

В процессе работы автоматическая система управления производит:

- периодический опрос датчиков;
- вычисление текущих значений закрытой искусственной среды;
- формирование сигналов управления оборудованием на основании сравнения текущих значений, полученных с датчиков состояния оборудования, временных таймеров и блокировок, со значениями заданных технологических констант;
- непрерывный контроль состояния оборудования по сигналам дискретных датчиков и в случае неисправности оборудования сигнализирует о неисправности [75].

Кроме основной задачи программного оборудования автоматическая система управления выполняет ряд задач, необходимых для функционирования системы, наиболее важными из которых являются [75]:

- поддержка интерфейса пользователя;

- ведение протокола работы системы;
- ввод и хранение технологических констант;
- адаптация каналов ввода и вывода.

Таким образом, исследование параметров и режимов работы закрытой агроэкосистемы по выращиванию зеленных культур, позволило сформировать модель климатической камеры для выращивания шпината включающую автоматическое регулирование оптического излучения, температурой, влажностью и полива.

### **2.3 Разработка алгоритма управления процессом выращивания шпината**

Успешное выполнение задачи создания действенных алгоритмов управляемого процесса выращивания шпината в значительной степени обуславливается степенью учета специфики производства зелени шпината как предмета управления. По мере роста зелени шпината увеличивается нестабильность показателей микроклиматических параметров, они становятся неоднородными снижаются такие характеристики, как контролируемость процесса выращивания и повторяемость его результатов, что приводит к необходимости корректировки микроклиматического режима.

Эти особенности учитываются при создании специализированного программного обеспечения для объектов системы управления, которое включает в себя задачи первичной обработки данных, расчета и создания управляющих воздействий, обмена данными с системами управления и предоставления информации техническому персоналу.

Основные процессы мониторинга и управления микроклиматическими параметрами и режимами оптического излучения выращивания зеленных культур в климатической камере представлены в общем виде алгоритма (рисунок 14) [75].

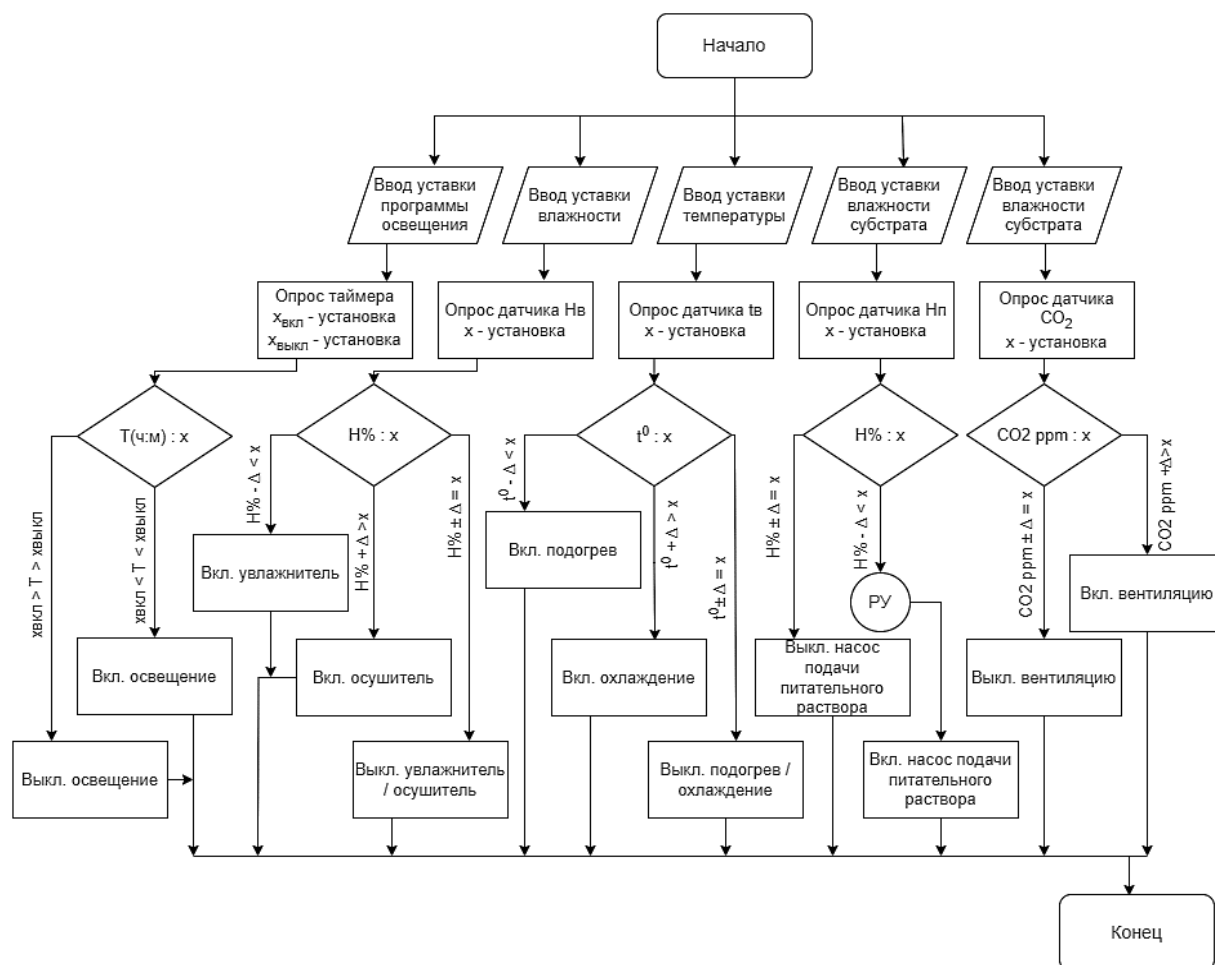


Рисунок 14 – Общий вид алгоритма программы мониторинга, управления микроклиматическими параметрами и режимами оптического излучения выращивания зеленных культур в климатической камере

Перед запуском этапа роста зелени шпината в систему управления устанавливают исходные данные, задают начальные значения температуры, влажности, интенсивность и спектральный состав излучения, переходят к запуску алгоритма автоматизированного выращивания зелени шпината.

Алгоритм, в текущем времени, обеспечивает автоматическую оптимизацию полученных значений микроклиматических параметров климатической камеры, что позволяет достичь более стабильного и качественного урожая шпината.

Процессы управления микроклиматическими параметрами и режимами оптического излучения, на примере контроля температуры (режим терморегулятора), производятся следующим образом: включение управляющего реле охлаждения определяется неравенством 6; отключение (обесточивание)

управляющего реле охлаждения определяется равенством 7; включение управляющего реле подогрева определяется неравенством 8; отключение (обесточивание) управляющего реле подогрева определяется равенством 9 [75]:

$$t > [t_{ycm} + \Delta t], \text{ в течении } T_3 = [x] \quad (7)$$

$$t = [t_{ycm} - \Delta t] \quad (8)$$

$$t < [t_{ycm} - \Delta t], \text{ в течении } T_3 = [x] \quad (9)$$

$$t = [t_{ycm}] \quad (10)$$

где  $t$  – текущая температура, °C;

$t_{ycm}$  – установленная температура, °C;

$\Delta t$  – температурный дифференциал, °C;

$T_3$  – время задержки реакции системы на изменение температуры, с.

Процессы информационного взаимодействия для других функций управления отличается лишь структурой запросов и ответов.

Смена микроклиматических сценариев управления, сценариев оптического излучения и полива осуществляется по установленным значениям счетчика времени от даты посева, которые соответствуют вегетационным фазам растения.

На рисунке 15 представлен алгоритм одной из программ полива, которая предусматривает смешивание многокомпонентного питательного раствора для отдельной фазы роста зелени шпината по установленным значениям счетчика времени от даты посева.

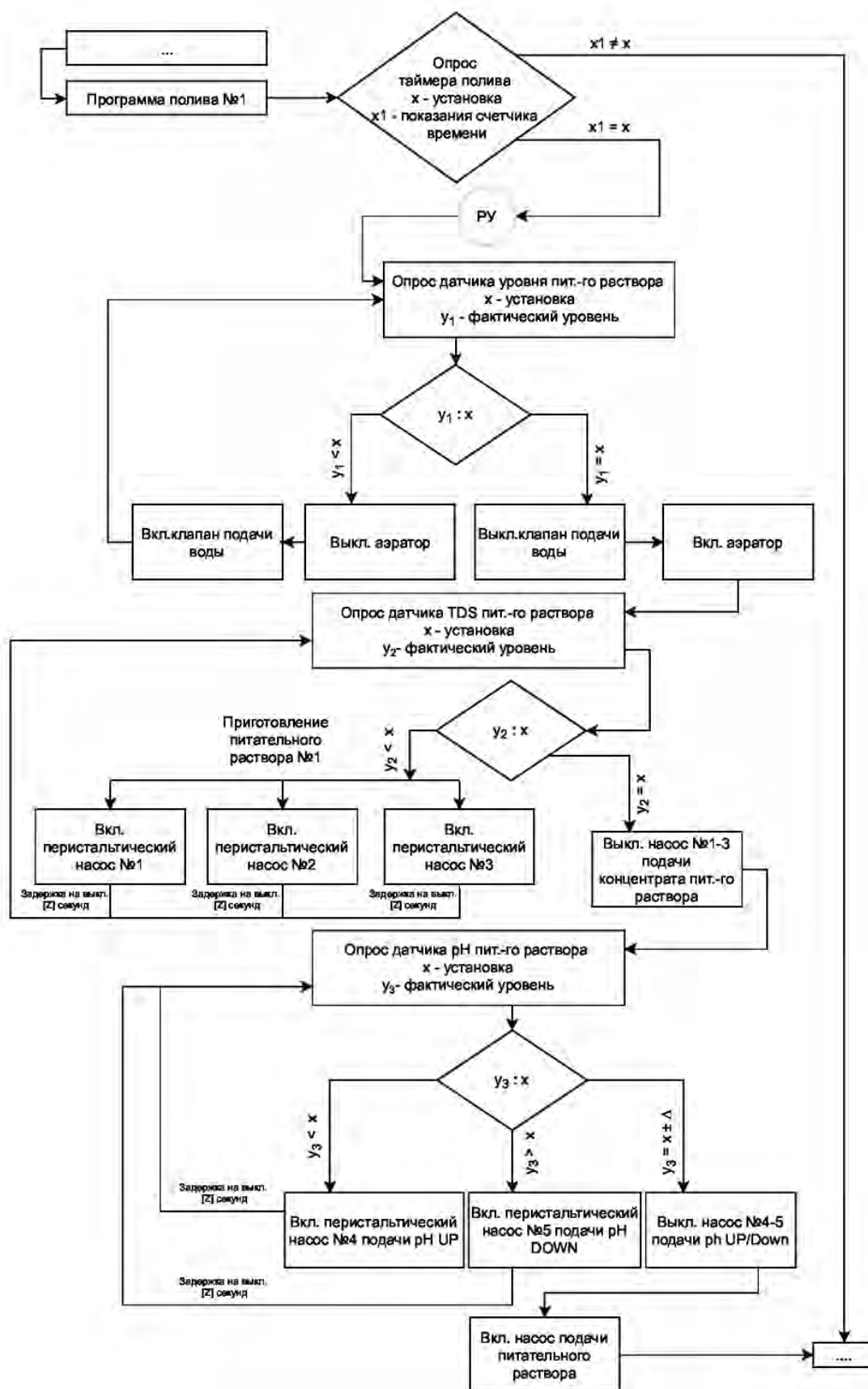


Рисунок 15 – Алгоритм программы полива

Заполнение системы водой, компонентами удобрений, проводится при смене программы, например, смена компонента удобрения или профилактические работы по очистке системы. Заполнение емкости прекращается при достижении уровнем воды датчика верхнего уровня. В соответствии с программой производится внесение каждого компонента на объем бака для полива с последующей коррекцией кислотности раствора.

На рисунке 16 представлен алгоритм программы управления охлаждением температуры воздуха климатической камеры, который предусматривает отдельный ввод уставок значений гистерезиса ( $\Delta t_{уст.1}$ ,  $\Delta t_{уст.2}$ ), ввод уставок температуры воздуха дня и ночи ( $t_{уст.}$ ).

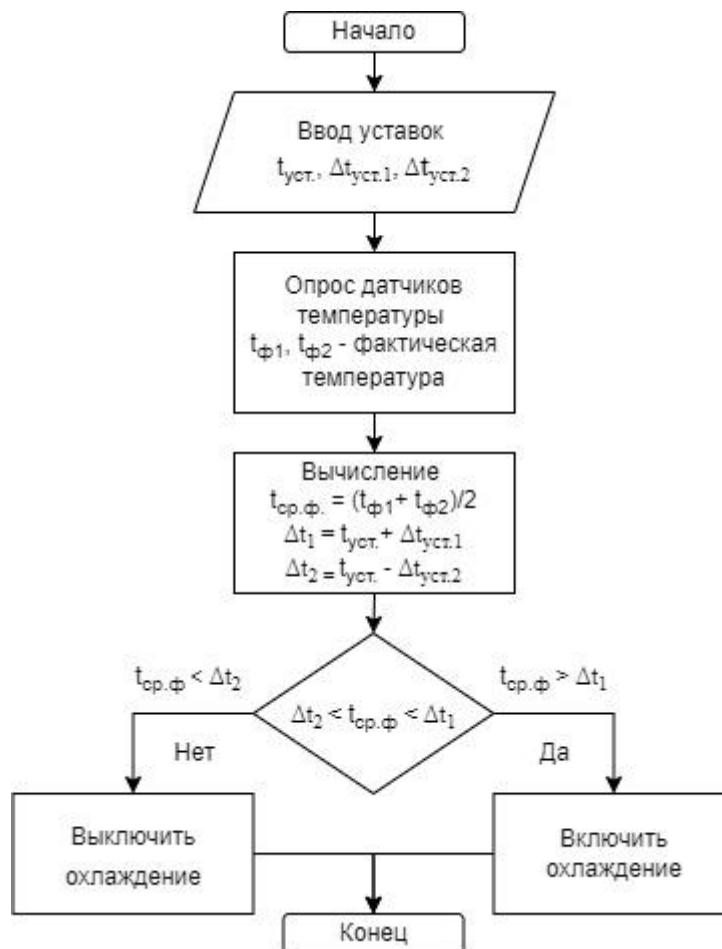


Рисунок 16 – Алгоритм программы управления температурой

На рисунке 17 представлен алгоритм программы управления влажностью воздуха климатической камеры, который, по аналогии с алгоритмом программы управления температурой воздуха, имеет уставки значений гистерезиса ( $\Delta H_{уст.1}$ ,  $\Delta H_{уст.2}$ ) и уставки влажности воздуха дня и ночи ( $H_{уст.}$ ).

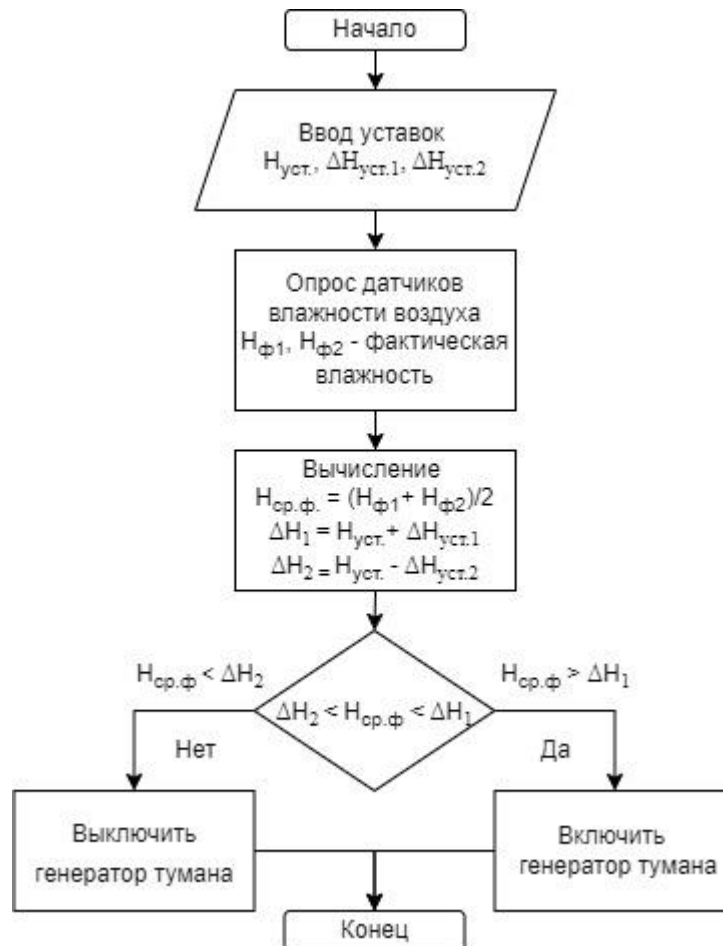


Рисунок 17 – Алгоритм программы управления влажностью

Примечания по параметрам:

Параметр  $\Delta$  – дифференциал (гистерезис) указывает диапазон, в котором поддерживается заданное значение или точность, с которой регулятор должен реагировать на изменение установленного значения. Т.е. если производится установка значения 18 °С и дифференциала 1 °С, то контроллер включит охлаждение, когда температура поднимется до 19 °С (рисунок 18).

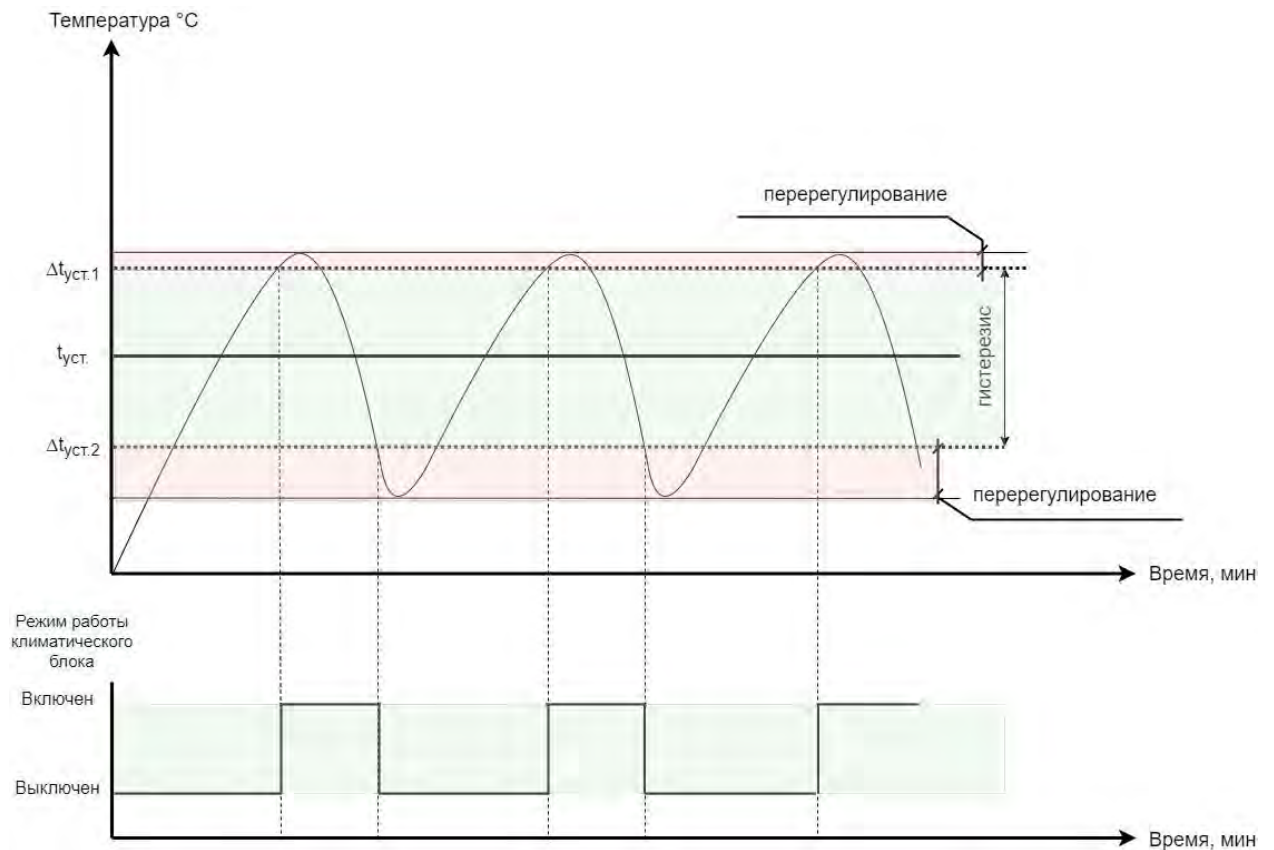


Рисунок 18 – Общий вид графика работы климатического блока с уставкой температурного гистерезиса

Задержка на выключение/включение  $[Z]$  – этот параметр указывает в секундах задержку до включения или выключения исполняющего устройства. Данная функция позволяет не учитывать кратковременные колебания устанавливаемых значений параметров.

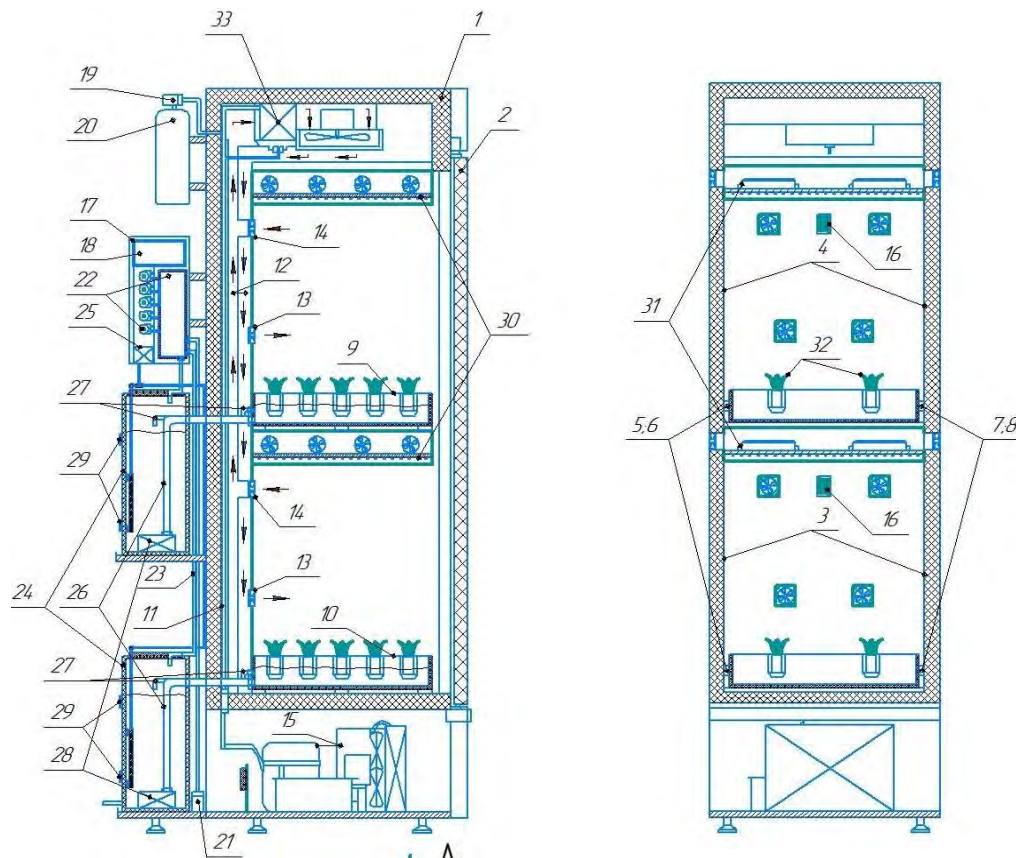
Несмотря на многообразие подходов к проблеме выращивания зелени и существование соответствующих алгоритмов, задача разработки более эффективных алгоритмов не перестает оставаться актуальной, особенно при повышении продуктивности зеленных культур.

## 2.4 Разработка климатической камеры для выращивания шпината в закрытой агроэкосистеме с цифровым управлением

Климатическая камера предназначена для выращивания зеленных культур в закрытой агроэкосистеме с цифровым управлением в гидропонной среде. Оборудована контрольным климатическим блоком управления и обладает

возможностью подключения ПК для удаленного управления и мониторинга всех контролируемых факторов роста растения.

На рисунке 19 представлена принципиальная схема климатической камеры для выращивания растений.



1 – теплоизолированный шкаф; 2 – стеклянная теплоизолированная дверь; 3-4 – боковые стенки камеры; 5-8 – горизонтальные направляющие лотков; 9-10 – лотки; 11 – задняя стенка; 12 – вентиляционные каналы; 13 – подающие вентиляторы; 14 – отводящие вентиляторы; 15 – холодильный агрегат; 16 – датчики параметров микроклимата; 17 – система управления; 18 – панель индикации; 19 – электромагнитный клапан системы подачи углекислоты; 20 – баллон углекислоты; 21 – электромагнитный клапан подачи воды; 22 – растворный узел (реализованный известными техническими решениями); 23 – трубопровод растворного узла; 24 – отдельные емкости с питательным раствором или водой для каждой секции; 25 – аэратор; 26 – подающие трубопроводы лотков; 27 – отходящие трубопроводы лотков; 28 – насосы; 29 – датчики уровня питательного раствора; 30 – светодиодные источники излучения; 31 – управляемые источники питания; 31 – растения.

Рисунок 19 – Климатическая камера для выращивания растений

Технические характеристики климатической камеры представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Технические характеристики климатической камеры

| Параметры                           | Показатели   |
|-------------------------------------|--------------|
| Напряжение, В                       | 220          |
| Номинальный ток, А                  | 1,2          |
| Температура охлаждаемого объёма, °С | 0...+7       |
| Температура окружающей среды, °С    | +12...+35    |
| Потребление электроэнергии, кВт/ч   | 1,3          |
| Габаритные размеры (ШхГхВ), мм      | 595x710x2030 |
| Масса нетто, кг                     | 90           |

Климатическая камера выполнена двухсекционной, воздуховоды системы микроклимата расположены за задней стенкой внутри камеры, при этом в секциях камеры параметры температуры, влажности, газового состава воздуха одинаковы, а режимы полива растений и параметры облучения в секциях индивидуальны, источники облучения растений расположены в потолочной части каждой секции климатической камеры и теплоизолированы от внутренней среды, система полива растений оснащена отдельными емкостями с питательным раствором для каждой секции камеры и аэратором питательного раствора.

При проведении экспериментальных исследований по определению влияния климатических факторов на рост и развитие растений, является необходимым обеспечение различия режимов микроклимата, прежде всего температуры, влажности, содержания углекислоты в воздухе, а также режима оптического излучения и полива растений.

Климатическая камера представляет собой теплоизолированный шкаф 1 параллелепипедной формы с вертикальной компоновкой и стеклянной теплоизолированной дверью 2. На внутренней стороне боковых стенок 3, 4 камеры жестко закреплены горизонтальные направляющие 5, 6, 7, 8 по две с левой и правой сторон, на которых размещены лотки 9, 10 с субстратом, в которые посажены растения.

Система микроклимата состоит из установленных по всей поверхности внутренней задней стенки 11 вентиляционных каналов 12 с подающими 13 и отводящими 14 вентиляторами, содержит холодильный агрегат 15, датчики 16 параметров микроклимата SHTA02-79B35-I420-PL (температуры и влажности) и

SCO2-96B55-I420-5K-PL (углекислого газа) «BESKONTA», подключенные к системе управления 17 с панелью оператора 18, электромагнитный клапан 19 с баллоном углекислоты 20.

Система полива включает электромагнитный клапан 21 для подачи воды в растворный узел 22 (реализованный известными техническими решениями), трубопровод растворного узла 23, отдельные емкости 24 с питательным раствором или водой отдельно для каждой секции, аэратор 25, подающие трубопроводы лотков 26, отходящие трубопроводы лотков 27, насосы 28 и датчики уровня 29 питательного раствора, подключенные к системе управления 17.

Система облучения растений включает независимые теплоизолированные от внутренней среды светодиодные источники излучения 30 расположенные в верхней части каждой секции камеры для выращивания растений, подключенные к управляемым источникам питания с возможностью отдельного управления режимами облучения 31 в каждой секции посредством системы управления 17.

На панели оператора DOP-B07S415 «Delta» транслируются все текущие режимы работы и текущие значения микроклиматических параметров и режима оптического излучения. По необходимости осуществляется изменение параметров работы климатической камеры. Осуществляется архивное протоколирование микроклиматических параметров на карту памяти.

Электрическая схема управления климатической камеры представлена на рисунке 20.

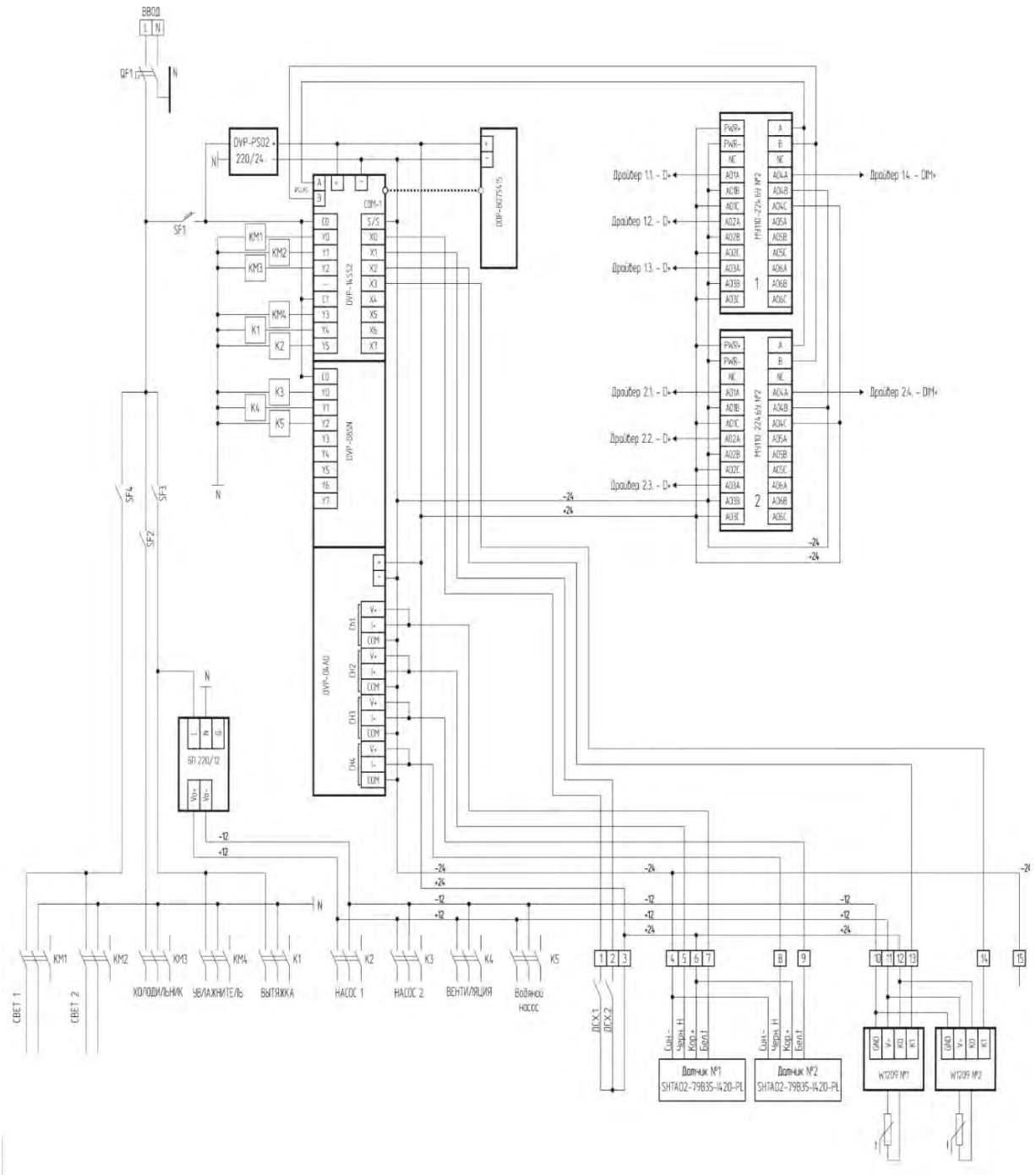


Рисунок 20 – Электрическая схема управления климатической камеры

Электрическая схема системы управления светодиодными облучателями представлена на рисунке 21 и является неотъемлемой частью электрической схемы управления климатической камеры.

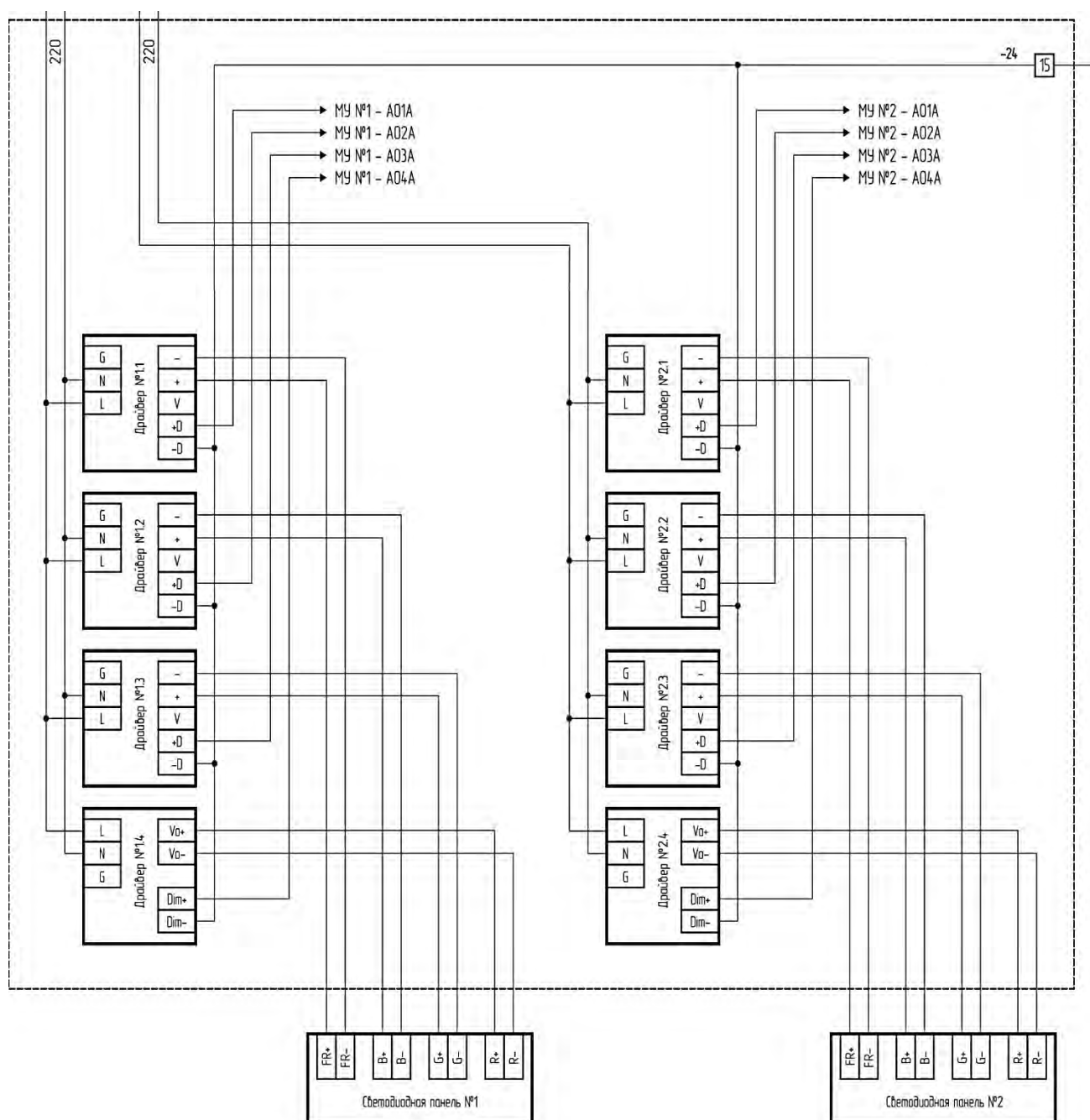
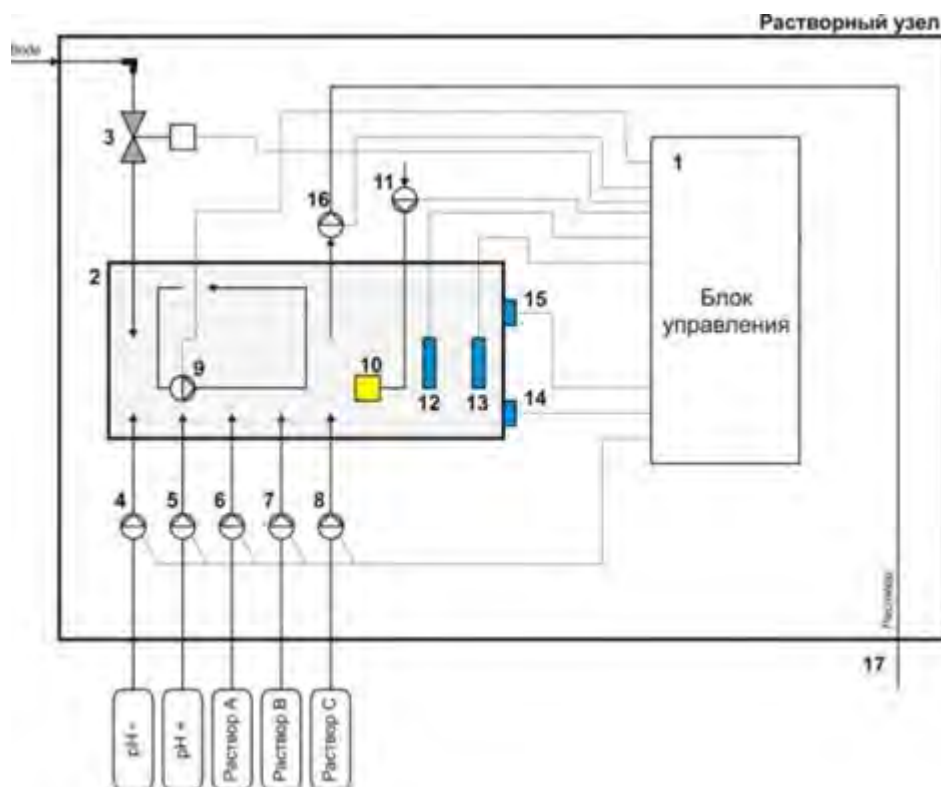


Рисунок 21 – Электрическая схема системы управления светодиодными облучателями

Светодиодные источники облучения растений расположены в потолочной части каждой секции климатической камеры и теплоизолированы от внутренней среды, для повышения энергоэффективности установки.

Для приготовления питательного раствора с заданной концентрацией минеральных элементов использовалось следующее оборудование и изделия (рисунок 22).



1 - блок управления; 2 - камера смешивания питательного раствора; 3 – клапан подачи воды; 4 - перистальтический дозирующий насос раствора снижения уровня pH; 5 - перистальтический дозирующий насос раствора повышения уровня pH; 6-8 - перистальтические дозирующие насосы подачи 3-компонентного питательного концентрата; 9 - насос циркуляции раствора; 10 - аэратор; 11 - воздушный компрессор; 12 - датчик pH; 13 - датчик концентрации раствора; 14 – датчик контроля нижнего уровня питательного раствора; 15 – датчик контроля верхнего уровня питательного раствора; 16 – насос подачи питательного раствора в лоток; 17 – трубопровод.

Рисунок 22 – Блок-схема растворного узла

Блок управления (1) (реализованный известными техническими решениями) обеспечивает выполнение алгоритмов управления компонентами растворного узла: смешивание питательного раствора в камере (2); поддержание заданного уровня концентрации минерального состава питательного раствора (6-8;13) и его водородного показателя pH (4-5;12); подачу воды Клапан (3); циркуляцию раствора насосом (9); аэрирование раствора (10-11); контроль уровня питательного раствора бесконтактным индукционным датчиком уровня раствора (14) (нижний уровень) и (15) (верхний уровень); подачу раствора в емкость секции камеры выращивания насосом (16) посредством трубопровода (17).

Система полива растений выполнена из отдельных емкостей с возможностью приготовления питательного раствора индивидуально для каждой секции камеры (по составу питательного раствора и его кислотно-щелочному балансу).

Приготовление питательного раствора, с применением растворного узла, обеспечивает заданную концентрацию питательных веществ в реальном времени.

При работе светодиодного излучателя почти 3/4 электроэнергии, потребляемой светодиодом, преобразуется в тепло и только 1/4 – в энергию оптического излучения [91]. Поэтому при разработке светодиодных облучателей важно обеспечить интенсивное охлаждение светодиодов, так как температурный режим работы светоизлучающего кристалла не превышает 70...80 °С. В целях обеспечения интенсивного охлаждения светоизлучающих кристаллов и максимального сохранения температурного режима климатической камеры, при имеющихся ограничениях внутреннего пространства корпуса облучателя, было принято решение осуществить принудительную конвекцию при помощи системы жидкостного охлаждения.

Система жидкостного охлаждения облучателя содержит алюминиевый теплоотвод с каналом, по которому тепло от светодиодов, посредством движения охлаждающей жидкости, отводится за пределы климатической камеры в радиатор для последующего охлаждения. В результате, работа светодиодных облучателей не оказывает существенного влияния на микроклиматические параметры внутри камеры.

В целях предотвращения критических значений температурного режима светоизлучающих кристаллов, при возможном отказе системы жидкостного охлаждения, панель снабжена программируемым терморегулятором W1209 (рисунок 23) (таблица 5).



Рисунок 23 – Программируемый терморегулятор W1209

Таблица 5 – Технические характеристики W1209

|                                       |                                  |
|---------------------------------------|----------------------------------|
| Напряжение питания:                   | 12 В                             |
| Потребляемая мощность:                | 35 мА (65 мА при замкнутом реле) |
| Максимально переключаемый ток:        | 5 А                              |
| Максимальное напряжение на контактах: | 250 В                            |
| Температурный диапазон:               | -50 °С ... +110 °С               |
| Точность управления:                  | 0.1 °С                           |
| Частота обновления:                   | 0.5 сек                          |
| Влажность:                            | 20 % ... 85 %                    |

Одним из факторов, влияющих на урожай в условиях защищенного грунта, является режим оптического излучения. Разработкой систем облучения растений в разное время занимались Аверчева О.В., Алферова Л.К., Башилов А.М., Беркович Ю.А., Валеев Р.А., Владыкин И.Р., Воскресенская Н.П., Гришин А.П., Дорохов А.С., Ерохин А.Н., Живописцев Е.Н., Жилинский Ю.М., Клешнин А.Ф., Ключка Е.П., Кожевникова Н.Ф., Козинский В.А., Козырева И.Н., Коломиец А.П., Кондратьева Н.П., Косицын О.Г., Леман В.М., Лисовский Г.М., Лямцов А.К., Максимов Н.А., Малышев В.В., Мальчевский В.П., Мошков Б.С., Ничипорович А.А., Овчукова С.А., Прищеп Л.Г., Протасова Н.Н., Растимешин С.А., Сарычев Г.С., Свентицкий И.И., Сидько Ф.Я., Тихомиров А.А., Шарупич В.П., Шульгин И.А., В. Singh, J. Bonnet, M. Fischer, P. Harris, P. Mekkel, R. McCree и др. [92]. Отсутствие в излучении облучателя отдельных участков спектра может привести к нарушению роста растений при их длительном выращивании.

На практике, для выращивания зеленных культур, в том числе и шпината, уровень доходящего солнечного излучения составляет не менее 150-300 мкмоль фотонов  $m^{-2}s^{-1}$  [27].

Светодиоды являются низковольтными источниками оптического излучения, и к тому же имеют зависимость тока от напряжения, которая описывается вольтамперной характеристикой (рисунок 24) [92].

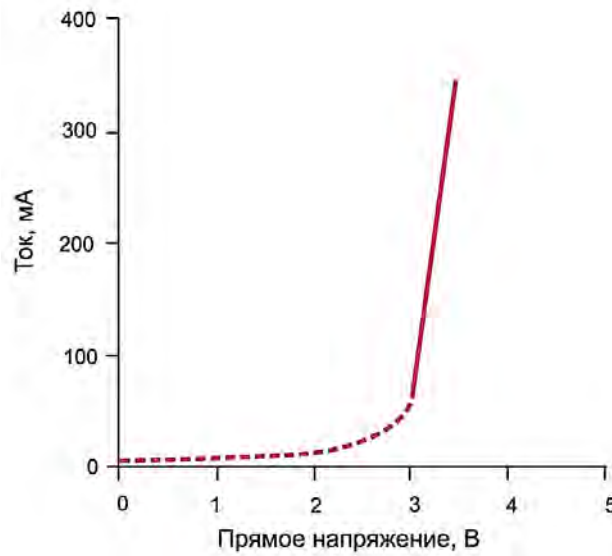
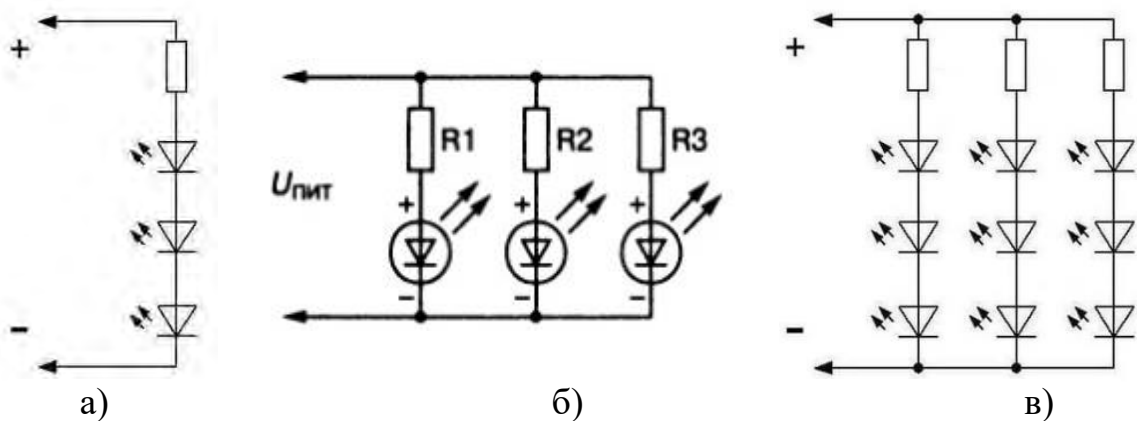


Рисунок 24 – Вольт-амперная характеристика светодиода

Так как эта зависимость экспоненциальная, для питания светодиода необходимо задавать стабильный ток.

Существует несколько способов подключения светодиодов: параллельное, последовательное и смешанное включение (рисунок 25) [92].



а – последовательное; б – параллельное; в – смешанное включение

Рисунок 25 – Схема подключения светодиодов

Ток, протекающий через светодиоды, подключенные последовательно (рисунок 25а), будет равен [92]:

$$I = \frac{U_{\text{пит}} - (U_{vd1} + U_{vd2} + U_{vd3})}{R}, \text{ А} \quad (11)$$

Недостатки такого подключения:

1. При увеличении количества светодиодов повышается напряжение, так как для этого должно соблюдаться условие:

$$U_{\text{пит}} > U_{vd1} + U_{vd2} + U_{vd3} \quad (12)$$

2. Повышение количества светодиодов снижает надежность системы.

При разрушении одного светодиода, все остальные перестают работать.

3. Дополнительные потери мощности на ограничивающем резисторе.

Параллельное включение светодиодов (рисунок 25б) определяет собой следующее: через каждый светодиод идет отдельный ток, задающийся отдельным резистором.

Суммарный ток в данном случае будет равняться [92]:

$$I = \frac{U_{\text{пит}} + U_{vd1}}{R_1} + \frac{U_{\text{пит}} + U_{vd2}}{R_2} + \frac{U_{\text{пит}} + U_{vd3}}{R_3} \quad (13)$$

Преимущества данного способа – высочайшая надежность. При разрушении одного светодиода, остальные будут оставаться в работе.

К недостаткам стоит отнести – увеличенные потери на резисторах.

Наиболее эффективной схемой включения является смешанное включение светодиодов (рисунок 25в).

В этом способе количество последовательно смонтированных светодиодов определяется напряжением питания. А число параллельных ветвей зависит от необходимой мощности облучателя. Суммарный ток будет определяться по формуле [92]:

$$I = \frac{U_{\text{пит}} - n \cdot U_{vd}}{N \cdot R} \quad (14)$$

$n$  – число светодиодов, последовательно подключенных в одной ветке;

$N$  – количество параллельных ветвей.

Такое соединение совмещает в себе плюсы как последовательного, так параллельного включения светодиодов.

Из-за нелинейности вольт-амперной характеристики, схема питания светодиодов через резисторный ограничитель имеет еще один недостаток –

нестабильность тока, проходящего через светодиоды при изменении напряжения питания. Для устранения этого явления, применяют стабилизаторы тока.

Но все эти приемы подходят только при наличии низковольтного источника питания светодиодов.

При выборе источника питания, для защиты от возможных перегрузок, необходимо предусмотреть 15...25% запас по мощности от расчетной мощности светодиодов [93].

Исходя из габаритных размеров климатической камеры с закрытой агроэкосистемой были подобраны печатные алюминиевые платы размером 383x13x1,6 мм для светодиодов типа 2835 количеством 22 шт.

Для обеспечения заданных параметров излучения были проанализированы исследования отечественных и зарубежных ученых по влиянию спектрального состава и интенсивности излучения на рост и развитие растений [26], [31], [36] – [44], [52], [53], [57], [58], [60], [77], [94] – [96].

Большинство исследований посвящены влиянию красно-синих светодиодов и интенсивности излучения на рост зеленных культур, так как спектры их излучения хорошо совпадают со спектрами поглощения основных фотосинтетических пигментов растений [97]. При этом зеленый участок оптического излучения необходим для предотвращения ингибирования генеративного развития растения [98], а сырую массу зеленных культур можно увеличить за счет дополнительного зеленого и дальнего красного участка оптического излучения [94].

По результатам анализа исследований, воздействия спектрального состава и интенсивности излучения на вегетацию зеленных культур, для комплектации светодиодного излучателя был осуществлён подбор источников излучения (таблица 6), подходящих для выращивания шпината в закрытых условиях.

Таблица 6 – Характеристика источников излучения облучателя

| Марка / код                   | Длина волны, nm | Кол-во, шт. | Напряжение, В | Ток, mA | Макс. раб. ток, mA |
|-------------------------------|-----------------|-------------|---------------|---------|--------------------|
| LUMILEDS / L1SP-PNK1002800000 | 400-700         | 176         | 2,9           | 120     | 480                |

## Продолжение таблицы 6

|                               |         |     |      |     |     |
|-------------------------------|---------|-----|------|-----|-----|
| LUMILEDS / L128-DRD1003500000 | 650-670 | 334 | 2,15 | 120 | 250 |
| LUMILEDS / L128-FRD1003500000 | 720-740 | 18  | 2,15 | 120 | 300 |
| LUMILEDS / L128-RYL1003500000 | 440-455 | 132 | 3,0  | 120 | 240 |

Выбор количества светодиодов обусловлен пропорциональным соотношением каждого спектра излучения, количеством печатных плат и габаритными размерами климатической камеры.

На рисунке 26 представлена принципиальная схема соединения группы линеек со светодиодами.

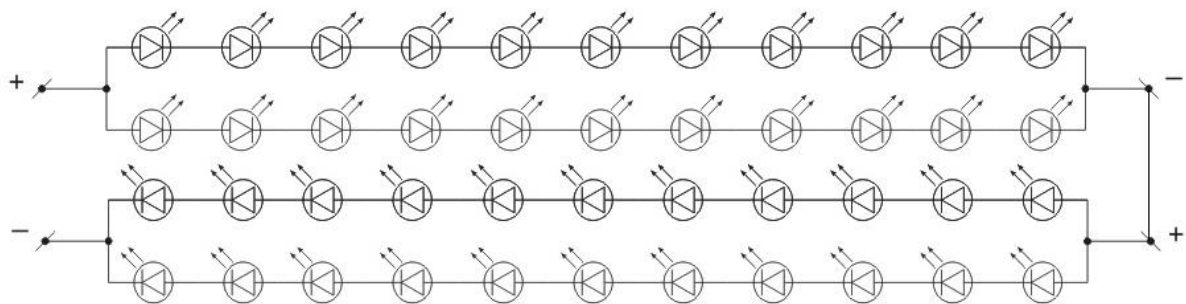


Рисунок 26 – Принципиальная схема соединения группы линеек со светодиодами

Применение светодиодного облучателя с изменяемым спектром и интенсивностью излучения требует применения сложной системы управления.

Для эффективного управления светодиодным облучателем, линейки отдельно взятого спектра объединены в группы, а группы разделены на 4 независимых канала управления:

- спектр 440...455 nm (3 параллельные группы по 2 последовательно соединенные линейки);
- спектр 400...700 nm (4 параллельные группы по 2 последовательно соединенные линейки);
- спектр 650...670 nm (3 параллельные группы по 4 последовательно соединенные линейки);
- спектр 440...455 nm (2 параллельные группы по 2 последовательно соединенные линейки).

В целях обеспечения стабильного питания светодиодов и реализации системы управления были подобраны энергоэффективные управляемые источники питания (таблица 7).

Таблица 7 – Характеристика управляемых источников питания облучателя

| Наименование     | Мощность, Вт | Выходное напряжение, В | Выходной ток, А | Поддержка диммирования |
|------------------|--------------|------------------------|-----------------|------------------------|
| ИПС60-700ТУ 0102 | 60           | 40...85                | 0,7             | 1...10В                |
| HLG-80Н-С700В    | 90,3         | 84...129               | 0,7             | 1...10В                |

Для управления светодиодным облучателем выбран преобразователь цифровых сигналов МУ110-224.6У «ОВЕН» (рисунок 27) (таблица 8) [99].



Рисунок 27 – Преобразователь цифровых сигналов МУ110-224.6У

Таблица 8 – Характеристика управляемого преобразователя цифровых сигналов МУ110-224.6У

| Характеристика                                          | Значение                                                                                           |
|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Питание</b>                                          |                                                                                                    |
| Напряжение питания (универсальное):<br>переменного тока | от 90 В до 264 В (номинальное 230 В), частота от 47 до 63 Гц<br>от 18 В до 30 В (номинальное 24 В) |
| постоянного тока                                        |                                                                                                    |
| Потребляемая мощность, не более                         | 6 ВА                                                                                               |
| <b>Выходы</b>                                           |                                                                                                    |
| Количество аналоговых выходных элементов                | 6                                                                                                  |

## Продолжение таблицы 8

|                                                                                     |                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| Тип аналоговых выходных элементов                                                   | ЦАП «параметр – напряжение 0...10 В» |
| Основная приведенная погрешность ЦАП, не более                                      | $\pm 0,5 \%$                         |
| Сопротивление нагрузки, подключаемое к выходу, не менее                             | 2 кОм                                |
| Диапазон напряжений питания выхода                                                  | 12...36 В                            |
| <b>Интерфейсы</b>                                                                   |                                      |
| Интерфейс связи с Мастером сети                                                     | RS-485                               |
| Максимальное количество приборов, одновременно подключаемых к сети RS-485, не более | 32                                   |
| Максимальная скорость обмена по интерфейсу RS-485                                   | 115200 бит/с                         |
| Протоколы связи, используемые для передачи информации                               | DCON, Modbus-ASCII, Modbus-RTU, OVEN |
| <b>Общие параметры</b>                                                              |                                      |
| Габаритные размеры                                                                  | $(63 \times 110 \times 75) \pm 1$ мм |
| Напряжение электропитания                                                           | 24В DC, 220В AC                      |
| Диапазон рабочих температур, °C                                                     | от -10 до +55 °C                     |
| Средняя наработка на отказ                                                          | 60 000 ч                             |
| Масса, не более                                                                     | 0,5 кг                               |

Прибор предназначен для преобразования цифровых сигналов исполнительных механизмов, передаваемых по сети RS-485, в аналоговые сигналы диапазоном от 0 до 10 В, что позволяет изменить интенсивность излучения и спектральный состав облучателя.

Испытания разработанного и изготовленного светодиодного излучателя для выращивания шпината (рисунок 28) позволили получить фактические характеристики спектрального состава оптического излучения (таблица 9).

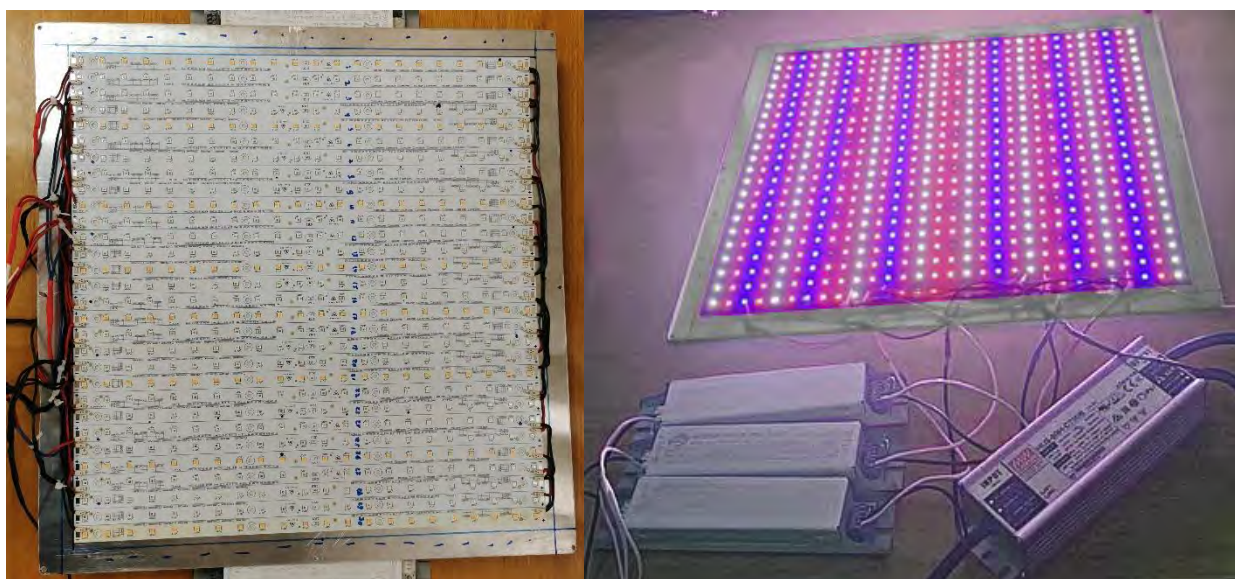


Рисунок 28 – Испытания светодиодного облучателя

Таблица 9 – Характеристика спектрального состава излучения облучателя

| ФАР (PFD), мкмоль фотонов м-2с-1                                                                                                            |       |       |        |        |       | PPFD,<br>мкмоль<br>фотонов<br>м-2с-1 | ФАР (PPFD), % |       |       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|--------|--------|-------|--------------------------------------|---------------|-------|-------|
| PFD-B                                                                                                                                       | PFD-G | PFD-R | PFD-UV | PFD-FR | Σ     | Σ PFD RGB                            | PFD-B         | PFD-G | PFD-R |
| 197.7                                                                                                                                       | 54.47 | 430.5 | 0.80   | 38.40  | 721.8 | 682.6                                | 28.96         | 7,97  | 63,07 |
| (K:3:C)ф*,%                                                                                                                                 |       |       |        |        |       | 63:8:29                              |               |       |       |
| *Приведенные значения соответствуют процентному содержанию красной, зелёной и синей составляющих в полном фотосинтетическом потоке фотонов. |       |       |        |        |       |                                      |               |       |       |

Полученные характеристики спектрального состава оптического излучения соответствуют заданным параметрам и подходят для проведения экспериментальных исследований по выращиванию шпината в закрытой агроэкосистеме.

На рисунке 29 представлен спектр излучения облучателя.

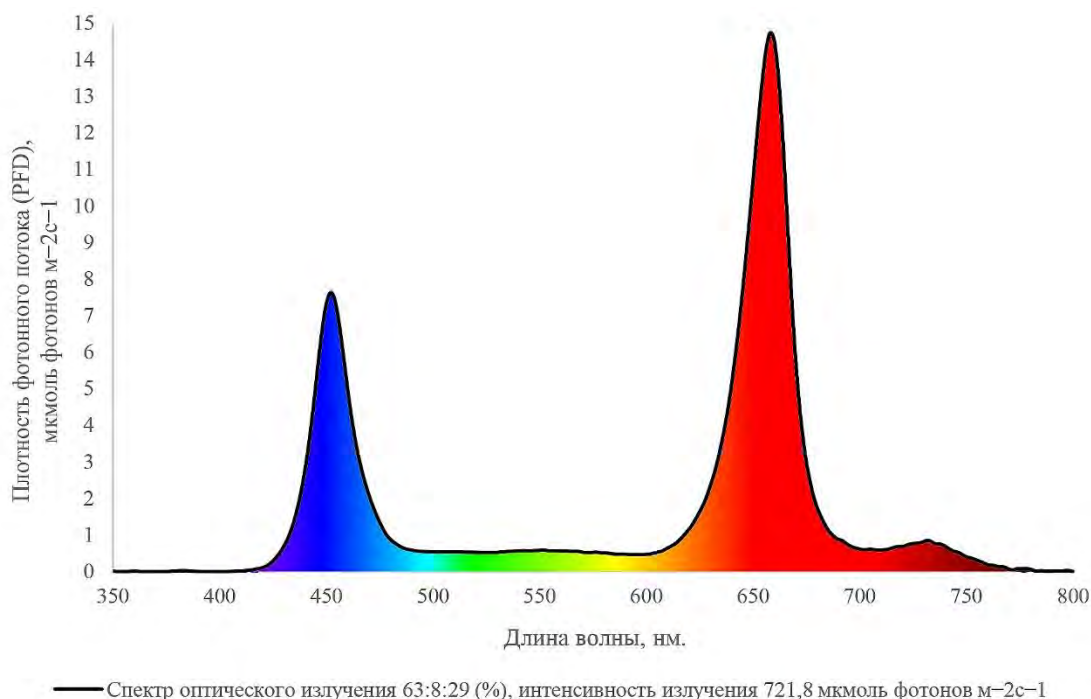
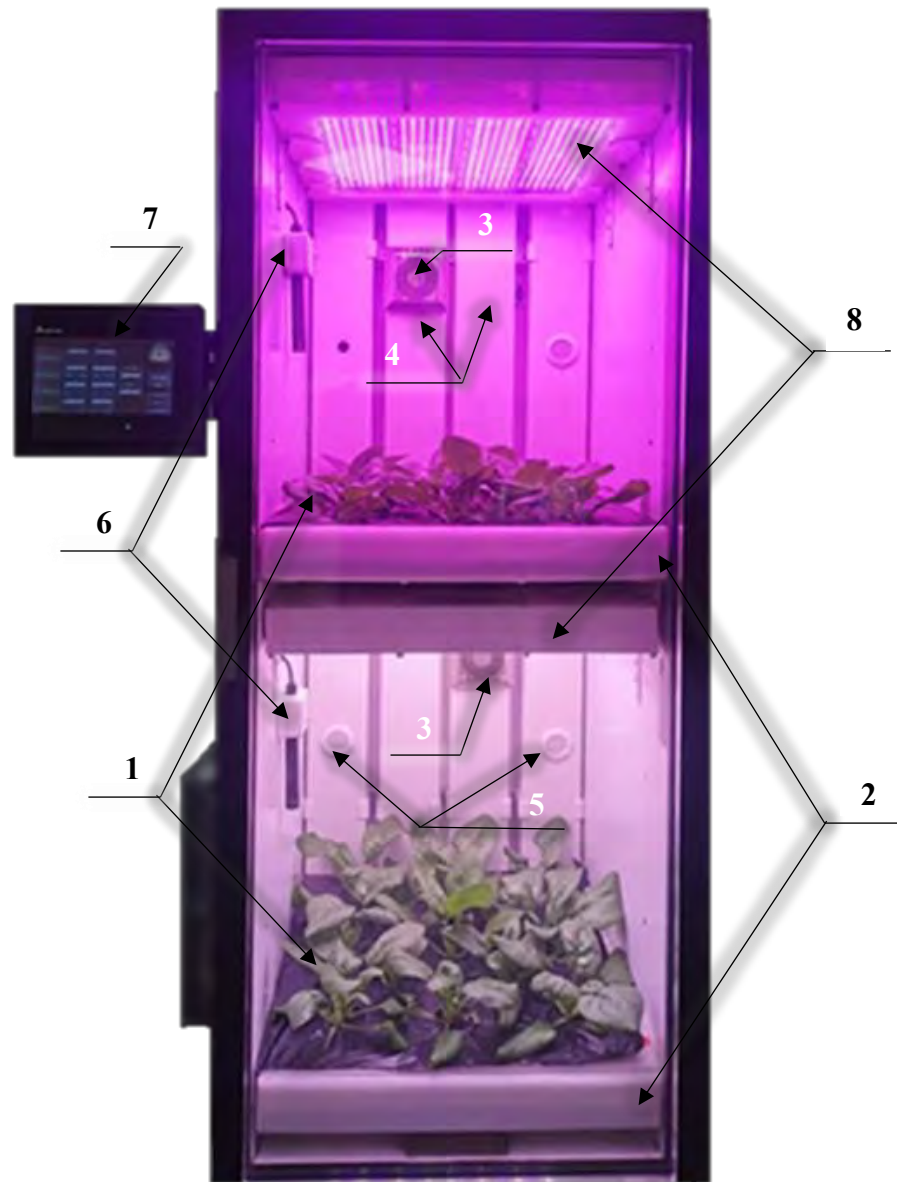


Рисунок 29 – Спектр излучения облучателя при 100% мощности

Измерения спектра излучения производились спектрометром UPRtek Compact MK350D. Прибор работает в диапазоне видимого оптического излучения 380-780 нм, точность измерения длины волны  $\pm 1$  нм, погрешность измерения цветовой температуры  $\pm 2\%$ .

Таким образом климатическая камера с разработанным светодиодным излучателем для выращивания растений работает следующим образом (рисунок 30).



1 – растения шпината; 2 – лоток; 3 – отводящие вентиляторы; 4 – отводящие вентиляционные каналы; 5 – нагнетающие вентиляционные каналы; 6 – датчики микроклимата; 7 – панель оператора с системой автоматического управления, 8 – светодиодные оптические облучатели.

Рисунок 30 – Климатическая камера для выращивания шпината

Растения 1 высаживают в лотки 2. Отводящими вентиляторами 3 воздух засасывает из внутреннего объема климатической камеры в отводящие вентиляционные каналы 4, где при контакте с испарителем холодильного агрегата воздух охлаждается за счет передачи тепла кипящему в испарителе хладагенту. На выходе из испарителя по нагнетающим вентиляционным каналам 5 охлажденный воздух подаётся во внутренний объем климатической камеры для поддержания в нем требуемого температурного режима.

Во внутреннем объеме климатической камеры датчики 6 параметров микроклимата измеряют температуру и влажность воздуха, содержание в нем углекислоты и передают полученные значения в систему управления 7. При необходимости система управления 7 подает управляющий сигнал на электромагнитный клапан, регулирующий подачу углекислоты в поток подаваемого к растениям воздуха. Если температура и влажность воздуха внутри камеры удовлетворяют требованиям эксперимента, то циркуляция воздуха через вентиляционные каналы 5, 6 происходит без его кондиционирования.

Полив растений осуществляется питательным раствором или водой, предварительно подготовленными в емкостях растворного узла, через подающий трубопровод в лотки 2 с растениями 1. Режим полива координируется системой управления 7. Излишки питательного раствора или воды через отходящий трубопровод из лотков 2 возвращаются в емкости.

Различие параметров излучения светодиодного облучателя 8, обеспечивается системой управления 7 посредством источников питания независимо для каждой секции в соответствии с целями экспериментальных исследований.

Микроклиматическая система камеры выполнена таким образом, что режим и параметры полива растений с облучением растений могут варьироваться в отдельных секциях (например, спектральный состав, продолжительность и интенсивность облучения, состав питательного раствора и его кислотно-щелочной баланс). Получен патент на изобретение «Климатическая камера для выращивания растений» (Приложение А), а для реализации её работы была написана программа

управления, на которую получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (Приложении Б).

Использование климатической камеры позволит снизить энергозатраты связанные с кондиционированием воздуха за счет системы водяного охлаждения светодиодных облучателей, повысить продуктивность растений за счет применения светодиодных регулируемых облучателей, аэрации питательного раствора и раздельного полива растений в каждой секции.

## 2.5 Выводы по главе 2

1. Определена целевая функция эффективности выращивания шпината в закрытой агроэкосистеме, характеризующая зависимость максимальной продуктивности растений от оптимальных режимом оптических излучений и микроклиматических условий (температура, влажность).

2. В результате теоретических исследований установлены параметры и режимы функционирования закрытой агроэкосистемы по выращиванию шпината. К основным параметрам функционирования относятся: температура воздуха (проращивание  $+10...+15^{\circ}\text{C}$ ; с появления первых настоящих листьев – день  $+17...+19$ , ночь  $+15...+17$ ); влажность воздуха –  $60...65\%$ ; фотопериодизм (день  $12...13$  часов, ночь  $11...12$  часов); интенсивность облучения (плотность фотосинтетического фотонного потока (PPFD) –  $140...250$  мкмоль фотонов  $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$ ).

3. Теоретически обоснованы параметры климатической камеры для выращивания шпината, включающей системы управления оптическим излучением и микроклиматическими факторами, в том числе температурой, влажностью воздуха и составом питательного раствора для корнеобитаемой зоны растений.

4. Разработана система и обоснованы конструктивные параметры облучателя, включающие количество и тип применяемых светодиодных излучателей, спектр оптического излучения. Получены значения плотности фотосинтетического фотонного потока облучателя при 100% мощности ( $PPFD = 682.6$  мкмоль фотонов  $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$ ).

### 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

#### 3.1 Программа экспериментальных исследований

Программа исследований разрабатывалась в соответствии с требованиями на проведение научных исследований [100].

Цель экспериментального исследования заключается в получении параметров и зависимостей, характеризующих доказательство теоретической гипотезы обоснования применения комплекса взаимосвязанных средств измерений и технических средств в закрытых агроэкосистемах, технологий, и оценке эффективности установки по выращиванию зеленных культур на основе цифрового управления ростом растений.

Основные задачи и средства достижения цели экспериментальной части диссертационной работы представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Задачи и методы экспериментального исследования

| №<br>п/п | Задачи                                                                                                                                                                                 | Методы и методики исследования                                                                                                                                                             |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1        | Разработку и изготовление климатической камеры для исследования автоматизированного процесса выращивания шпината в закрытых агроэкосистемах.                                           | Информационный анализ и синтез данных с применением сравнительного метода технических решений, направленных на автоматизацию процесса выращивания овощных культур в климатических камерах. |
| 2        | Определение оптимальных конструктивных и технологических параметров климатической камеры для исследования автоматизированного процесса выращивания шпината в закрытых агроэкосистемах. | Анализ факторов, влияющих на продукционные процессы шпината.                                                                                                                               |
| 3        | Определение количества опытов и выбор технических средств измерений.                                                                                                                   | Стандартные методики определения количества опытов. Методы экспериментальной оценки.                                                                                                       |

## Продолжение таблицы 10

|   |                                                                                                                                             |                                                                                                                                           |
|---|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 4 | Исследование влияния технологических параметров климатической камеры в закрытых агроэкосистемах на продукционные процессы растений шпината. | Методики измерения светового потока. Методики оценки продукционного процесса растений и их состояния.                                     |
| 5 | Установление параметров и режимов работ климатической камеры для исследования автоматизированного процесса выращивания шпината.             | Анализ и синтез данных с применением сравнительного метода.                                                                               |
| 6 | Анализ теоретических и экспериментальных результатов исследований.                                                                          | Статические методы обработки данных с применением программ ЭВМ «Microsoft Office», «Microsoft Excel», «STATISTICA-6», «MathCAD», «ANOVA». |

В соответствии с поставленными задачами, экспериментальные исследования проводились в соответствии с этапами, описанными в таблице 11.

Таблица 11 – Этапы экспериментальных исследований

| № п/п | Наименование этапов и их содержание                                                                                     | Форма представления результатов                                                                        |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1     | 2                                                                                                                       | 3                                                                                                      |
| 1     | Подготовительный этап                                                                                                   |                                                                                                        |
| 1.1   | Определение количества опытов, выбор контролируемых параметров, формирование форм регистрации результатов эксперимента. | Материалы, обеспечивающие эксперимент.                                                                 |
| 1.2   | Подбор контрольно-измерительного оборудования, приспособлений и материалов.                                             | Руководства по эксплуатации контрольно-измерительного оборудования, приспособлений и их характеристик. |
| 1.3   | Определение объекта и значений микроклиматических параметров выращивания                                                | Материалы, обеспечивающие эксперимент.                                                                 |
| 2     | Основной этап                                                                                                           |                                                                                                        |
| 2.1   | Оценка всхожести семян шпината                                                                                          | Таблицы с данными                                                                                      |
| 2.2   | Выращивание шпината в разработанной климатической камере при различных режимах оптического излучения                    | Таблицы с данными, диаграммы.                                                                          |

## Продолжение таблицы 11

|     |                                                                                                                        |                   |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| 3   | Заключительный этап                                                                                                    |                   |
| 3.1 | Обработка результатов экспериментальных исследований                                                                   | Таблицы с данными |
| 3.2 | Выявление соответствия закономерностей параметров выращивания по данным теоретических и экспериментальных исследований | Диаграммы         |
| 3.3 | Уточнение методики                                                                                                     | Методика          |

Заключительный этап экспериментальных исследований направлен на определение закономерностей показателей эффективности выращивания зеленных культур в закрытой агроэкосистеме с применением цифровых технологий от различных режимов оптического излучения в процессе вегетационного развития растений шпината, и предусматривает уточнение способов обработки результатов экспериментальных исследований.

Таким образом, программа экспериментальных исследований включает перечень этапов, методов и средств исследования, направленных на решение поставленных задач исследования.

### **3.2 Методика экспериментальных исследований по выращиванию шпината в закрытой агроэкосистеме с цифровым управлением**

#### **3.2.1 Материально-техническое обеспечение эксперимента**

Экспериментальное исследование нацелено на обоснование применения комплекса взаимосвязанных средств измерений и технических средств в закрытых агроэкосистемах, обеспечивающего повышение урожайности шпината.

Приборы и оборудование, применяемые при проведении исследований, приведены в таблице 12.

Таблица 12 – Приборы и оборудование экспериментальных исследований

| № п/п | Наименование оборудования                        | Параметр измерения                         | Единица измерения | Точность измерения | Государственный реестр СИ РФ |
|-------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------|--------------------|------------------------------|
| 1     | Компактный спектрометр UPRtek MK350D             | длины волны                                | нм                | $\pm 1$ нм         | -                            |
|       |                                                  | точность освещенности                      | лк                | $\pm 5\%$          |                              |
| 2     | Аналитические весы Sartorius LA 230S             | масса                                      | грамм             | $\pm 0,0001$ г     | 18052-03                     |
| 3     | Лабораторный измеритель площади листьев LI-3100C | площадь                                    | см <sup>2</sup>   | $\pm 5\%$          | -                            |
| 4     | Спектрофотометр СПЕКС ССП-705                    | оптическая плотность                       | %                 | $\pm 0,4$ нм       | 40591-09                     |
| 5     | Магнитная мешалка ПЭ-6110                        | -                                          | -                 | -                  | -                            |
| 6     | Сухожаровой шкаф Memmert UFB 400                 | температура по шкале Цельсия               | °C                | -                  | -                            |
| 7     | рН-метра – иономер «Итан»                        | окислительно-восстановительного потенциала | мВ                | $\pm 1,0$ %        | 37675-08                     |

### 3.2.2 Определение лабораторной всхожести семян шпината

В качестве объекта исследования был выбран шпинат сорта «Жирнолистный» селекции ФГБНУ ФНЦО (Россия). Сорт является среднеспелым (период от всходов до технической спелости 28-30 суток) и холодостойким, урожайность по разным оценкам составляет 2,4 кг/м<sup>2</sup> в условиях открытого грунта. Розетка компактная, средней величины, полуприподнятая, до 28 см в диаметре и достигает массы 100-150 г.

В начале экспериментальных исследований была произведена оценка лабораторной всхожести семян шпината по одному из основных показателей – жизнеспособность семян. Данный показатель является количественным и выражается процентом нормально проросших семян за определённый срок в оптимальных условиях. Только от семян с высокой лабораторной всхожестью можно ожидать «дружных» всходов и высокой продуктивности растений.

Для определения всхожести семян в каждом из случаев, было отобрано три пробы по 50 семян. Всхожесть определялась по ГОСТ 12038-84 «Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести».

Для оценки лабораторной всхожести семян шпината применяли аппаратуру, оборудование и материалы:

- термостат охлаждаемый и обогреваемый с диапазоном регулирования температуры в рабочей камере от 0°C до 40°C; допустимые колебания температуры  $\pm 2^\circ\text{C}$ ;
- посуду для промывания и увлажнения субстрата;
- чашки Петри;
- набор лабораторных луп;
- бумагу фильтровальную по ГОСТ 12026-76 «Бумага фильтровальная лабораторная. Технические условия»;
- воду дистиллированную по ГОСТ Р 58144-2018 «Вода дистиллированная. Технические условия».

Подготовка к оценке лабораторной всхожести семян шпината включала в себя следующие виды работ:

1. Мойка термостата горячей водой с моющими средствами и дезинфицирующим раствором спирта.
2. Чашки Петри стерилизовали в сушильном шкафу при температуре 130°C в течение 1 ч.
3. Из увлажненного субстрата подготовили ложе для проращивания в соответствии с установленными для каждой культуры условиями.
4. В растильнях между слоями увлажненной фильтровальной бумаги (два слоя на дне растильни и одним слоем прикрывают семена), вручную произвели раскладку семян на ложе на расстоянии не менее 0,5-1,5 см друг от друга в зависимости от их размеров.
5. На каждую пробу семян поместили этикетку с указанием номера пробы, номера повторности, дату учета энергии прорастания и всхожести.

Семена проращивались согласно условиям, предусмотренных ГОСТ 12038-84 «Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести» (приложение №1; №2) (таблица 13).

Таблица 13 – Условия проращивания семян шпината по ГОСТ 12038-84

| Культура | Условия проращивания |                 |                 |                | Срок определения, сут. |           | Дополнительное условие для семян, находящихся в состоянии покоя |
|----------|----------------------|-----------------|-----------------|----------------|------------------------|-----------|-----------------------------------------------------------------|
|          | Ложе                 | Температура, °С |                 | Освещённость   | Энергия прорастания    | Всхожесть |                                                                 |
|          |                      | посто-<br>янная | пере-<br>менная |                |                        |           |                                                                 |
| Шпинат   | МБ <sup>1</sup>      | 15;10           | -               | Т <sup>2</sup> | 7                      | 14        | Предварительное охлаждение                                      |

<sup>1</sup> - между слоями фильтровальной бумаги; 2 – темнота.

<sup>1</sup> - между слоями фильтровальной бумаги; 2 – темнота.

Результаты проращивания четырёх проб по 50 семян сорта «Жирнолистный» представлены в таблице 14.

Таблица 14 – Результаты проращивания проб семян шпината по ГОСТ 12038-84

| № пробы                                  | Кол-во семян в пробе, шт. | Кол-во наклюнувшихся семян, шт. | Энергия прорастания, % | Кол-во проросших семян в пробе, шт. | Всхожесть, % |
|------------------------------------------|---------------------------|---------------------------------|------------------------|-------------------------------------|--------------|
| 1                                        | 50                        | 49                              | 98                     | 48                                  | 96           |
| 2                                        | 50                        | 47                              | 94                     | 47                                  | 94           |
| 3                                        | 50                        | 44                              | 88                     | 42                                  | 84           |
| 4                                        | 50                        | 47                              | 94                     | 46                                  | 92           |
| Средняя лабораторная энергия прорастания |                           |                                 | 93,5                   | -                                   |              |
| Средняя лабораторная всхожесть           |                           |                                 |                        |                                     | 91,5         |

По ГОСТ 12038-84 для среднего значения всхожести 91% допускаемое отклонение составляет  $\pm 8\%$ . Поскольку фактические отклонения результатов анализа отдельных проб от среднего значения всхожести не превышают допускаемое, анализ повторять не требуется.

Таким образом, результаты анализа позволили сделать вывод о том, что используемые семена шпината сорта «Жирнолистный» являются считаются кондиционными и пригодны для исследований направленных на разработку технологий производства зеленных культур в условиях, адаптированных к закрытым агроэкосистемам.

### 3.2.3 Методика проведения экспериментальных исследований по выращиванию шпината

В целях определения параметров и режимов работы разработанной климатической камеры с фитосветильником для выращивания шпината сформирована методика экспериментальных исследований, включающая весь процесс управления ростом растений шпината от посева до уборки.

Целью экспериментального исследования является оценка энергоэффективности применения различных комбинаций светодиодов, их влияние на урожайность, морфологические и биометрические параметры шпината.

Растения выращивались в пластиковых лотках на стеллажах, оборудованных гидропонной системой периодического затопления (рисунок 31).



а) стеллаж №1;



б) стеллаж №2

Рисунок 31 – Общий вид стеллажей с гидропонной системой периодического затопления для выращивания шпината

Семена высевались в горшочки с гидрофильным минераловатным субстратом на основе горных пород базальтовой группы. После всходов и появления первых настоящих листьев на один горшок оставляли по одному растению. Для выращивания использовались два светоизолированных стеллажа. Площадь выращивания для каждого режима оптического излучения составляла 0,27 м<sup>2</sup>. Плотность посадки составляла 52 растения на 1 м<sup>2</sup> (рисунок 32).



Рисунок 32 – Общий вид климатической камеры с закрытой агроэкосистемой для выращивания зеленных культур

Микроклимат в камере поддерживался климатическим компьютером. Температура воздуха в дневное время – 18°C, в ночное время – 16°C, при относительной влажности воздуха 60-65%. Концентрация углекислого газа соответствовала атмосферным значениям – 400...450 ppm. Для приготовления питательных растворов применялся комплекс удобрений для гидропоники Flora Series® (GHE, Франция). Электропроводность питательного раствора составляла 1500...1600 мкСм/см. Значение водородного показателя (pH) раствора, в период проведения эксперимента – 6,5.

Облучение в фитокамере обеспечивалось комбинированными облучателями на базе LED различного спектрального состава. LED облучатели состояли из комбинаций светодиодов для растениеводства TM LUXEON 2835: синих 445nm, красных 630nm и 660nm, дальних красных 730nm и белых с цветовой температурой

3000K производства Lumileds Holding B.V. (San Jose, CA, USA). Удельная потребляемая мощность системы оптического излучения для каждого варианта составляла  $75 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ . Длительность облучения составляла 13 часов в день. Параметры облучения представлены в таблице 15.

Таблица 15 – Плотность фотосинтетического фотонного потока облучателя по зонам спектра: синий (С), зеленый (З), красный (К), дальний красный (ДК). Средние значения от пяти измерений.

| Диапазон волн (нм)                                                                                                                          | Плотность фотосинтетического фотонного потока (PPFD) (мкмоль фотонов $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$ ) |                 |                 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|
|                                                                                                                                             | Режим 1                                                                                             | Режим 2         | Контроль        |
| С, (400-500)                                                                                                                                | $53,8 \pm 0,9$                                                                                      | $44,7 \pm 0,8$  | $65,0 \pm 0,2$  |
| З, (500-600)                                                                                                                                | $10,0 \pm 0,2$                                                                                      | $44,5 \pm 0,4$  | $90,0 \pm 0,3$  |
| К, (600-700)                                                                                                                                | $186,2 \pm 1,7$                                                                                     | $160,8 \pm 2,0$ | $95,0 \pm 1,2$  |
| ДК, (700-800)                                                                                                                               | $9,0 \pm 0,2$                                                                                       | $9,0 \pm 0,4$   | $9,0 \pm 1,0$   |
| ИТОГО, (400-700)                                                                                                                            | $250,0 \pm 3,0$                                                                                     | $250,0 \pm 3,6$ | $250,0 \pm 2,7$ |
| $(\text{К}:\text{З}:\text{С})_{\text{ф}}^*, \%$                                                                                             | 74:4:22                                                                                             | 64:18:18        | 38:36:26        |
| *Приведенные значения соответствуют процентному содержанию красной, зелёной и синей составляющих в полном фотосинтетическом потоке фотонов. |                                                                                                     |                 |                 |

Измерения плотности фотосинтетического фотонного потока и спектрального состава излучения производились прибором Compact Spectrometer MK350D (UPRtek Corp., Taiwan).

#### *Определение биометрических показателей.*

Отбор проб растений шпината производился по принципу репрезентативности таким образом, чтобы характеристики отобранных растений соответствовали характеристикам всей совокупности растений варианта опыта. Опыт проводился в 4-х повторностях. Для анализа показателей сырой и сухой массы и площади листовой поверхности отбирали по 10 растений каждого варианта.

Для определения сырой массы растения взвешивали на лабораторных весах серии Sartorius LA230S (Laboratory Scale, Германия) с точностью до  $0,0001 \text{ г}$ . (рисунок 33).



Рисунок 33 – Определение сырой массы растения на лабораторных весах серии Sartorius LA230S

Для измерения площади листовой поверхности использовали фотопланиметр LI-COR - LI-3100 AREA METER (США) (рисунок 34).



Рисунок 34 – Определение площади листовой поверхности листьев шпината на фотопланиметре LI-COR - LI-3100 AREA METER

Для определения массы сухого вещества пробы измельчали до размера частиц не более 1 см, после чего высушивали в сухожаровом шкафу (Memmert UFB 400, Германия) при температуре 60-70°C в течение 3-х часов, а затем в течение 1 часа при температуре 105°C (рисунок 35) и взвешивали на аналитических весах Sartorius LA230S (Laboratory Scale, Германия) с точностью до 0,0001 г.



Рисунок 35 – Сушка сырой массы шпината в сухожаровом шкафу Memmert UFB 400

Отбор проб на содержание пигментов производился с одинаково облученных прямым LED-излучением листьев, одного уровня (3 лист) в трех повторностях. Пробу сырья измельчали до размера частиц 1 мм и растирали в фарфоровых ступках с добавлением кварцевого песка.

Для определения содержания хлорофиллов и каротиноидов отбирали навески массой 0,1 г., растирали их в ступке с добавлением 2-3 мл 100% ацетона для получения вытяжки. Затем экстракт перемещали в воронку со стеклянным фильтром фракции № 3, вставленную в колбу Бунзена, и соединенную с вакуумным насосом. Ступку и фильтр многократно промывали 100% ацетоном до полного извлечения пигментов. Затем фильтрат переносили в мерную колбу на 25 мл, и доводили ацетоном до метки 25 мл. Содержимое колбы тщательно перемешивали

и использовали для определения пигментов спектрометрическим методом на спектрофотометре СПЕКС ССП-705 (рисунок 36).



Рисунок 36 – Определение пигментов спектрометрическим методом на спектрофотометре СПЕКС ССП-705

Концентрацию пигментов определяли по оптической плотности раствора пигментов методом Хольм-Веттштейна для 100%-ного ацетона [101].

Для определения содержания нитратов в растительных пробах шпината, отбирали по 3 растения с каждого варианта опыта, взвешивали по 10 г. пробы, измельчали и растирали в ступке. Навеску измельченного материала массой 10 г помещали в мерный стакан и доливали 50 см<sup>3</sup> алюмокалиевых квасцов, затем перемешивали в течение 3 мин на магнитной мешалке ПЭ-6110 (ГК «ЭКРОС») (рисунок 37).



Рисунок 37 – Смешивание навески измельченного материала с алюмокалиевыми квасцами на магнитной мешалке ПЭ-6110

В полученной суспензии измеряли концентрацию нитрат-иона с помощью рН-метра – иономера «Итан» (Томьяналит, Томск, Россия) (рисунок 38).



Рисунок 38 – Определение концентрации нитрат-иона с помощью рН-метра – иономера «Итан»

Обработка полученных данных проводилась с использованием ANOVA. Статистическую обработку осуществляли в программе Microsoft Excel.

Статистическая достоверность результатов дисперсионного анализа оценивалась с использованием критерия Фишера (F-test) и показателя наименьшей существенной разницы (HSD) теста Тьюки (Q-test).

### **3.3 Выводы по главе 3**

1. Для подтверждения теоретических исследований разработана программа экспериментальных исследований, которая определяет основные задачи и средства достижения цели экспериментальной части диссертационной работы.

2. Разработана методика проведения экспериментальных исследований по выращиванию шпината с целью оценки эффективности применения различных спектров оптического излучения, их влияние на морфологические и биометрические параметры.

3. Изготовлена климатическая камера для выращивания шпината в закрытой агроэкосистеме с программно-аппаратным обеспечением включающая основные автоматизированные системы создания и поддержки микроклиматических показателей; контроля и подачи питательного раствора; оптического излучения.

4. Проведены экспериментальные исследования по определению влияния спектрального оптического излучения на продуктивность выращиваемого шпината в закрытой агроэкосистеме до товарной спелости.

## 4 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ВЫРАЩИВАНИЮ ШПИНАТА В ЗАКРЫТОЙ АГРОЭКОСИСТЕМЕ С ЦИФРОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

### 4.1 Зависимости продуктивности шпината от режимов оптического излучения

Результаты исследований получены в соответствии с методикой теоретического и экспериментального исследований. По результатам экспериментальных исследований установлены зависимости биометрических показателей и пигментного состава растений шпината от режимов оптического излучения.

При заданных вариантах оптического излучения облучателей в условиях закрытой агроэко системы климатической камеры, вегетационный период шпината сорта «Жирнолистный» от всходов до технической спелости (6-8 настоящих листьев) составил 24-26 суток. Формирование урожая в открытом грунте, согласно описанию производителя, происходит за 28-30 дней от всходов.

Для исследования влияния спектрального состава на продуктивность шпината выбраны следующие режимы оптического излучения (рисунок 39), соответствующие процентному содержанию красной, зелёной и синей составляющих в полном фотосинтетическом потоке фотонов  $(K:Z:C)_{\phi}, \%$ :

– режим №1 – 74:4:22;

– режим №2 – 64:18:18;

– контроль – 38:36:26.

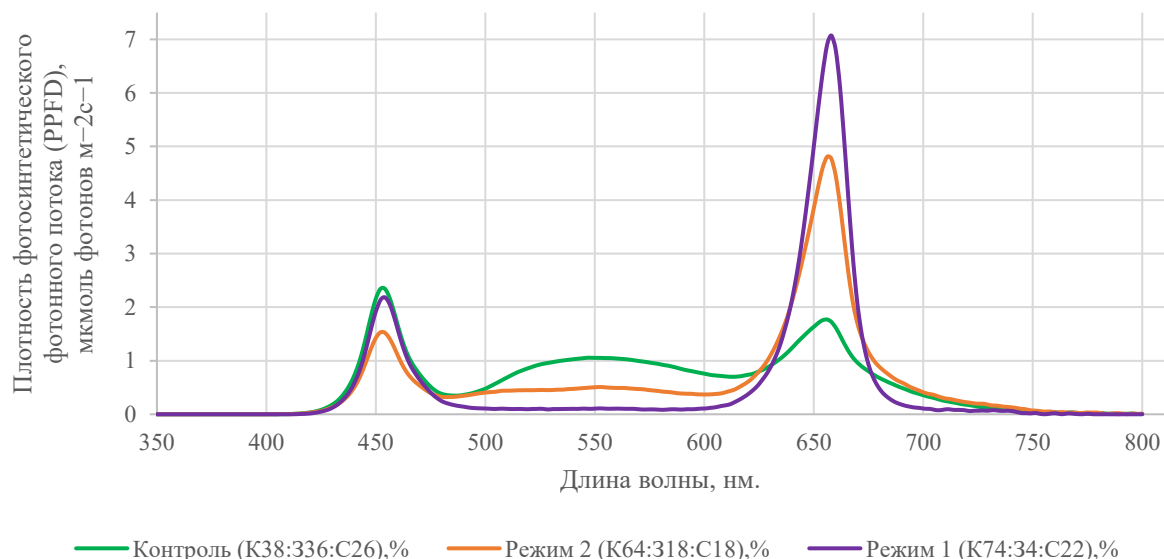


Рисунок 39 – Диаграмма состава режимов спектрального излучения облучателя

На начальном этапе роста у обоих вариантов оптического излучения площадь листьев не имела значимых отличий, однако к концу срока выращивания, при соотношении оптического излучения  $64:18:18$  относительно  $74:4:22$ , площадь листьев была больше в среднем на 35 процентов. Максимальная площадь листовой пластины сформирована растением в опыте №3 ( $625 \text{ см}^2$ ) при режим №2 оптического излучения (рисунок 40).

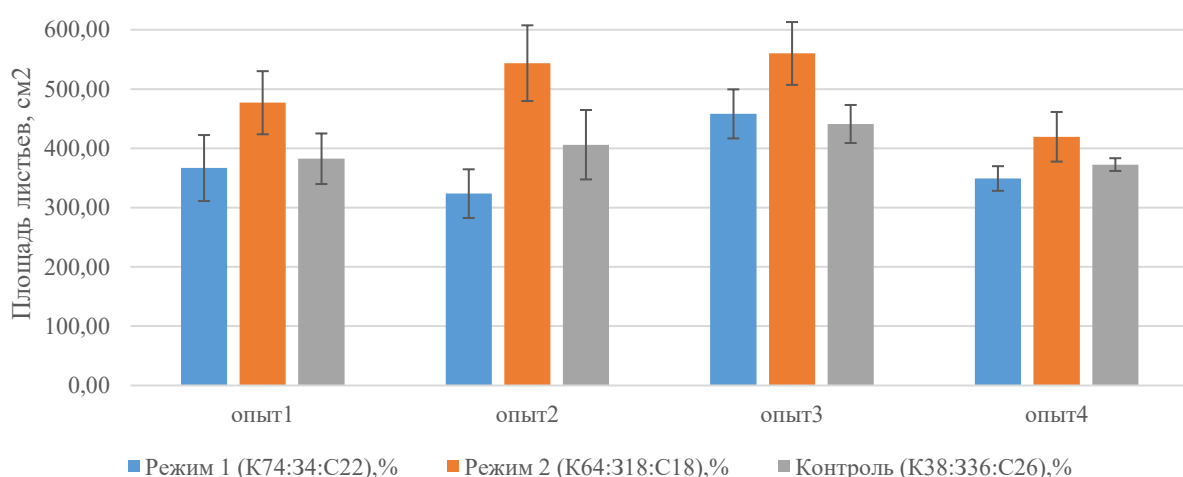


Рисунок 40 – Площадь листьев растений шпината на 30-й день от всходов,  $\text{см}^2$

Тем не менее, при соотношении оптического излучения  $74:4:22$  и  $38:36:26$  относительно  $64:18:18$ , наблюдалось низкое значение стандартного отклонения,

что указывает на более близкие к среднему значению показатели площади листьев у отдельных растений шпината. Данный факт может свидетельствовать о том, что более крупные растения, выращиваемые при соотношении оптического излучения 64:18:18 затеняли соседние растения, тем самым замедляя их рост.

Сырая (рисунок 41) и сухая (рисунок 42) масса растений шпината, во всех опытах, аналогично площади листьев, была больше при соотношении оптического излучения 64:18:18. Установлено, что сырая масса при соотношении оптического излучения 64:18:18 относительно оптического излучения 74:4:22 больше на 44%, содержание сухого вещества больше на 38%. При соотношении оптического излучения 64:18:18 относительно оптического излучения 38:36:26 сырая масса была больше на 42%, содержание сухого вещества больше на 18%.

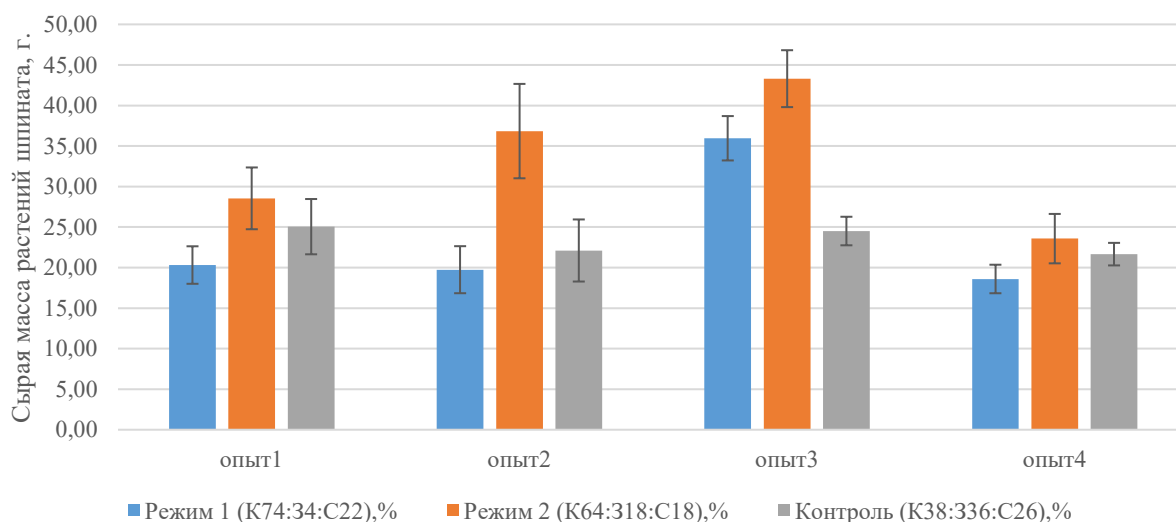


Рисунок 41 – Сырая масса растений шпината на 30-й день от всходов, г.

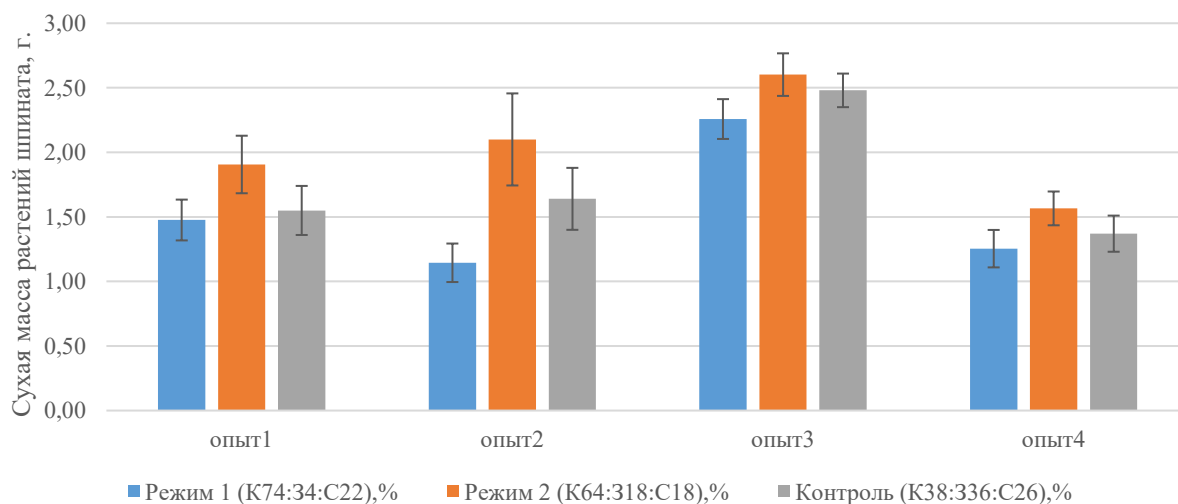


Рисунок 42 – Сухая масса растений шпината на 30-й день от всходов, г.

При анализе биометрического показателя высоты растений шпината (рисунок 43), достоверных отличий не наблюдалось во всех вариантах оптического излучения. Однако в исследовании [95] растения, выращенные при зеленом, красном и синем светодиодном облучении, длиннее, чем растения, выращенные только при красном (630 нм) и синем (470 нм). Основываясь на данном исследовании, широкополосное распределение спектрального оптического излучения 64:18:18, несмотря на то что, зеленые спектральные волны не поглощаются растением, позволяет оказать положительное влияние на рост и развитие растений шпината используя преимущества всех длин волн.

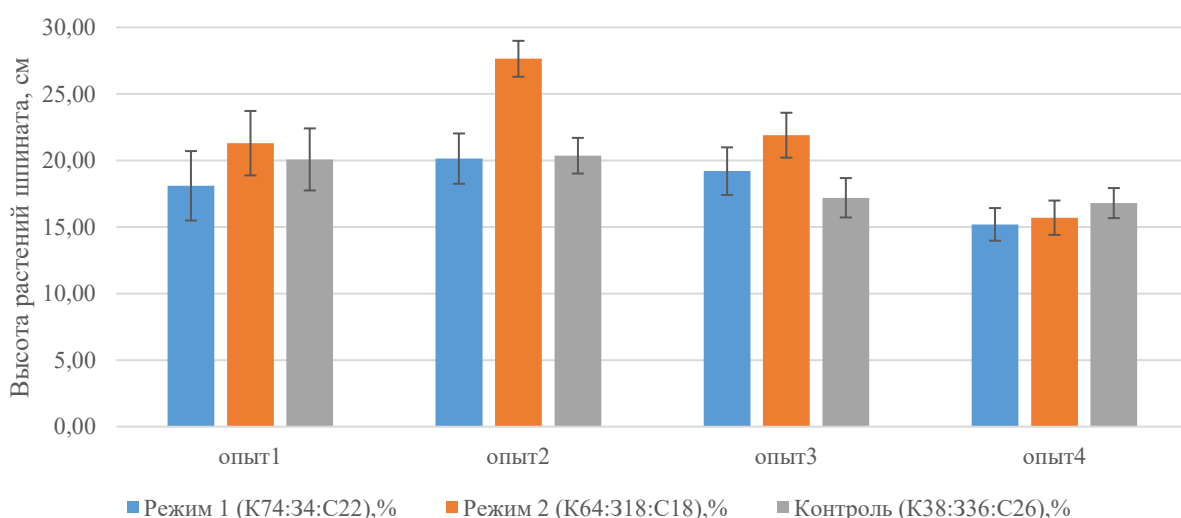


Рисунок 43 – Высота растений шпината на 30-й день от всходов

Эффективность фотосинтеза оценивали по концентрации фотосинтетических пигментов в листьях растений шпината.

Хлорофилл *a* (рисунок 44) представляет собой основной, а хлорофилл *b* (рисунок 45) – дополнительный компоненты фотосистем I и II. Каротиноиды (рисунок 46), являясь антиоксидантами, инактивируют различные *активные формы кислорода* и защищают хлорофилл от окисления.

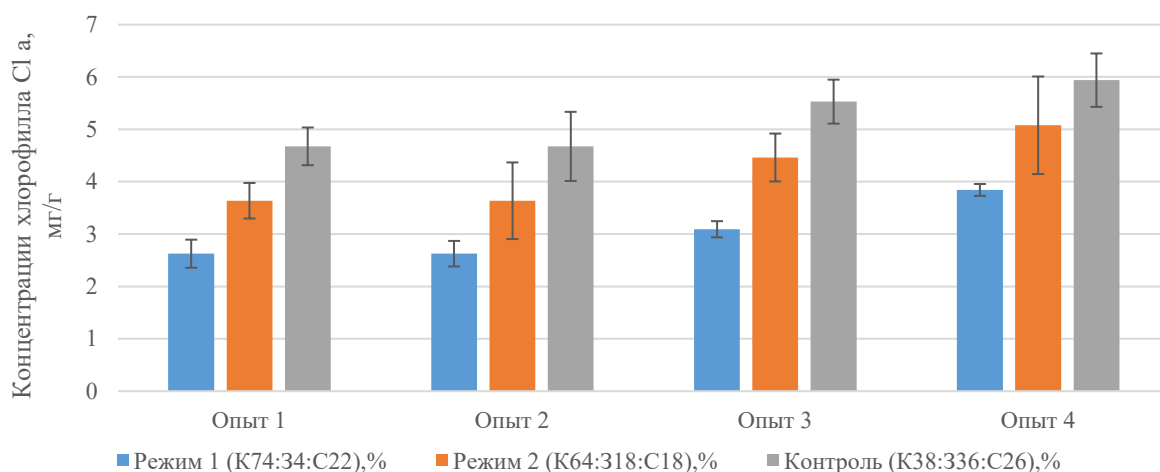


Рисунок 44 – Концентрация хлорофилла «a» в листьях шпината на 30-й день от всходов, мг/г

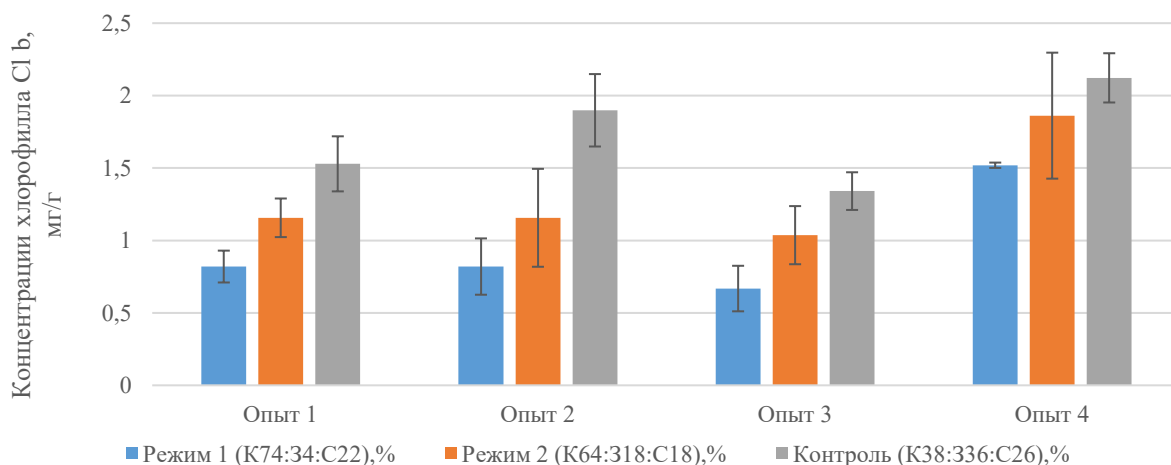


Рисунок 45 – Концентрация хлорофилла «b» в листьях шпината на 30-й день от всходов, мг/г

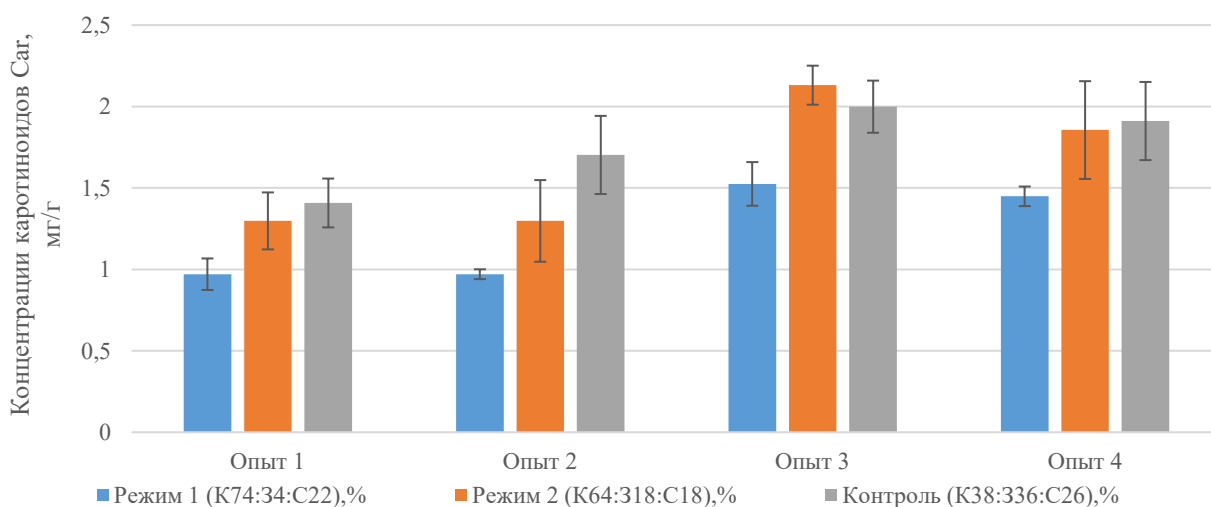


Рисунок 46 – Концентрация каротиноидов в листьях шпината на 30-й день от всходов, мг/г.

Содержание хлорофиллов *a* и *b*, а также их сумма (рисунок 47), отношение и отношение суммы к содержанию *каротиноидов* являются важными индикаторами стресса и надежными критериями адаптации растений к факторам среды [102].

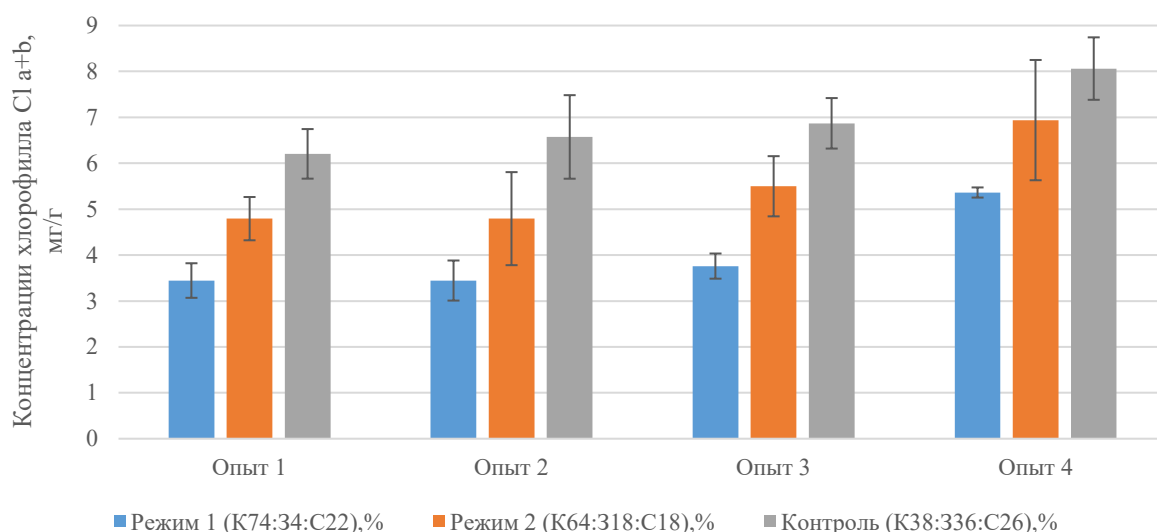


Рисунок 47 – Концентрация хлорофилла «*a+b*» в листьях шпината на 30-й день от всходов, мг/г.

Для экспериментов с оптическим излучением 74:4:22, характеристик соотношения суммы хлорофиллов к *каротиноидам* четкой корреляции выявлено не было, так же, как и для отдельного соотношения количественного значения хлорофилла *b* к *каротиноидам*. Однако концентрации хлорофилла *a* и *каротиноидов* прямо пропорциональны друг другу в разных вариациях опытов данной группы.

Для экспериментов с оптическим излучением 64:18:18 и 38:36:26 значения концентраций суммы хлорофиллов к *каротиноидам* не коррелировали друг с другом. В концентрации хлорофилла *a* и *каротиноидов* данных линеек опытов, в отличие от оптического излучения 74:4:22, прямой корреляции выявлено не было. Это объясняется специфичностью отражения оптического излучения сине-зеленого участка спектра молекулами хлорофилла *a*.

Соотношение хлорофиллов *a* и *b* во всех опытах при облучении каждым из рассматриваемых вариантов спектра оптического излучения не сигнализировало об ухудшении физиологического состояния и развитии стресса в исследуемом шпинате (рисунок 48).

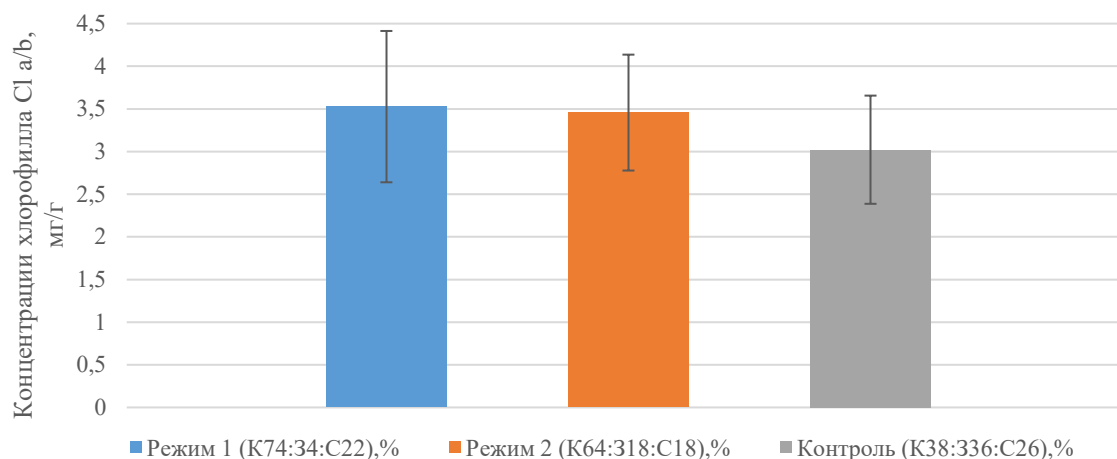


Рисунок 48 – Соотношение концентрации хлорофиллов *a* и *b* в листьях шпината на 30-й день от всходов

Увеличение содержания хлорофиллов в растениях оказывает положительное влияние на скорость фотосинтеза, поскольку увеличивается усвоение углекислого газа в листьях [96], и на количество образующихся химических элементов, в частности углеводов, поскольку они являются основным продуктом процесса фотосинтеза.

Наиболее продуктивным с точки зрения синтеза всех в совокупности пигментов фотосинтезирующих систем листьев шпината оказалось соотношение оптического излучения 38:36:26, режим оптического излучения с соотношением 74:4:22 в красном и синем участках спектра не способствовали усилению биосинтеза хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов. Тем не менее, режим оптического излучения с соотношением 38:36:26, несмотря на увеличенное содержание хлорофиллов в растениях, не оказал положительного влияния на набор биомассы растений шпината, в отличие от режима с оптическим излучением 64:18:18.

Однако, с увеличением зеленой массы, при оптическом излучении 64:18:18, наблюдались граничащие с предельно-допустимой концентрацией (ПДК) значения ( $1858 \pm 87$  мг/кг при норме 2000 мг/кг) (рисунок 49).

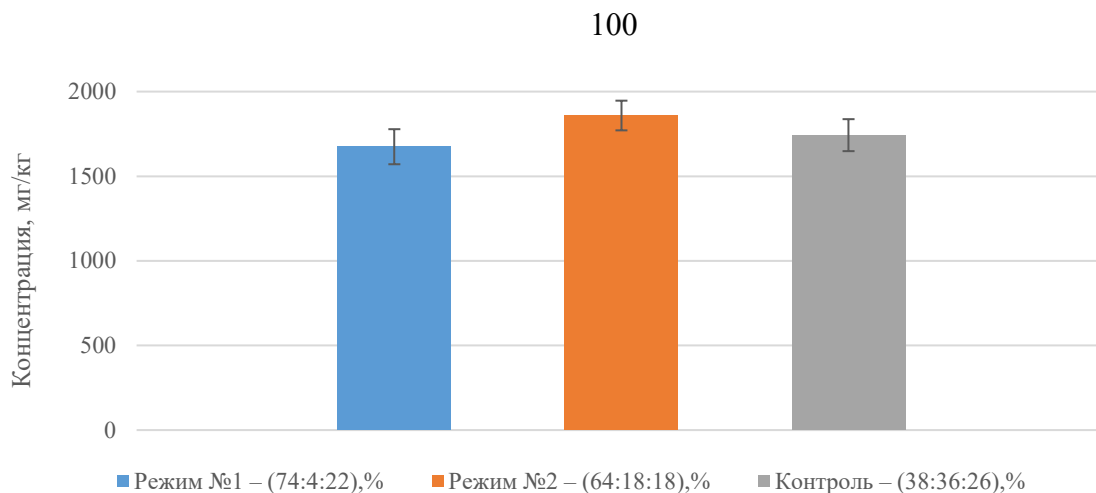


Рисунок 49 – Концентрация нитратов в растениях шпината на 30-й день от всходов

Концентрации нитратов при оптическом излучении 74:4:22 и 38:36:26 были ниже относительно оптического излучения 64:18:18 на 10% и 6,25% соответственно и находились в пределах нормы.

Содержание нитратов зависит от срока созревания (в ранних сортах овощей нитратов, как правило, больше, чем в поздних) и микроклиматических условий (температура, фотопериод, уровень освещенности, количество поливов) [103], [104]. Совокупность данных факторов затрудняет оценку их влияния и осложняет возможность регулирования содержания нитратов в листьях шпината.

Таким образом, по результатам исследований, соотношение спектра оптического излучения 64:18:18 являлся оптимальным для набора биомассы и способствует оптимизации ассимилирующих функций листа. Остальные варианты имели меньшую (на 40%) биомассу и не имели значимых отличий между собой по морфологическим и биохимическим показателям.

В данной работе, соотношение спектрального состава оптического излучения является ключевым фактором, влияющим на накопление биомассы, концентрацию пигментов и нитратов в растениях шпината.

## 4.2 Рекомендации по выращиванию зелени шпината в закрытой агроэкосистеме

Шпинат – холодостойкая и влаголюбивая культура. При выращивании в закрытой агроэкосистеме, в зависимости от сорта, массовое прорастание наступает при температуре 8...15°C. Для сорта «Жирнолистный» массовое прорастание наступало на 8-10 день при температуре 10...12°C. Для нормальной вегетации растениям шпината сорта «Жирнолистный» требуется температура в дневное время 16...19°C, в ночное 15...18°C, более высокие температуры вызывают раннее стеблевание и снижение урожайности.

Большое значение для шпината имеет продолжительность светового дня. Так как шпинат относится к растениям длинного дня, ему, для образования репродуктивных органов, необходима продолжительность дня 15...17 часов. Для предотвращения преждевременного цветения и усиленного формирования вегетативных органов в условиях закрытой агроэкосистемы продолжительность дня необходимо сократить до 12...13 часов.

В процессе исследований, был подобран оптимальный спектр оптического излучения для получения наиболее высокой продуктивности в условиях закрытой агроэкосистемы. Параметры спектра оптического излучения облучателя представлены в таблице 16.

Таблица 16 – Плотность фотосинтетического фотонного потока облучателя по зонам спектра: синий (С), зеленый (З), красный (К), дальний красный (ДК). Средние значения от пяти измерений.

| Диапазон волн (нм)                                                                                                                          | Плотность фотосинтетического фотонного потока (PPFD)<br>(мкмоль фотонов м <sup>-2</sup> с <sup>-1</sup> ) |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| С, (400-500)                                                                                                                                | 44,7±0,8                                                                                                  |
| З, (500-600)                                                                                                                                | 44,5 ±0,4                                                                                                 |
| К, (600-700)                                                                                                                                | 160,8±2,0                                                                                                 |
| ДК, (700-800)                                                                                                                               | 9,0±0,4                                                                                                   |
| ИТОГО, (400-700)                                                                                                                            | 250,0±3,6                                                                                                 |
| (К:З:С) <sub>ф</sub> *, %                                                                                                                   | 64:18:18                                                                                                  |
| *Приведенные значения соответствуют процентному содержанию красной, зелёной и синей составляющих в полном фотосинтетическом потоке фотонов. |                                                                                                           |

В закрытой агроэкосистеме при полном искусственном облучении выращивание шпината производится при плотности фотосинтетического фотонного потока (PPFD)  $250 \text{ мкмоль/м}^2 \text{ с}^{-1}$  на уровне всходов.

Шпинат является чувствительным к кислотности субстрата, поэтому во избежание снижения урожайности, необходимо поддерживать слабокислую реакцию среды в оптимальном значении pH 6,5 на всём протяжении его роста и развития.

Для нормального ростового процесса шпината необходимо наличие микроэлементов. Под влиянием микроэлементов, которые участвуют в окислительно-восстановительных процессах в растении, углеводном и азотном обмене, повышается устойчивость к болезням и агрессивным условиям внешней среды, улучшается фотосинтез, повышается продуктивность.

В качестве источника микроэлементов применяется стандартный трехкомпонентный питательный раствор. Для приготовления питательных растворов использовался комплекс удобрений для гидропоники *Flora Series®* (GHE, Франция). Электропроводность питательного раствора поддерживали в пределах 1500...1600 мкСм/см. Смешивание удобрений производилось в указанных пропорциях (таблица 17).

Таблица 17 – Рекомендация производителя по применению многокомпонентных концентратов *Flora Series®* с контролем EC

| Пропорция (доли)                                                          | <i>Flora Gro®</i> | <i>Flora Micro® SW</i> | <i>Flora Bloom®</i> |
|---------------------------------------------------------------------------|-------------------|------------------------|---------------------|
| Зелень ( <i>шпинат, щавель, базилик, петрушка, укроп, руккола и др.</i> ) | 2,5               | 2,0                    | 2,5                 |

Поглощение минеральных элементов корнями растений является активным физиологическим процессом. Поглощение минеральных элементов осуществляется с затратой энергии, источником которой в живых организмах служит процесс дыхания. В целях предотвращения отрицательного действия на поглотительную деятельность корней, необходимо производить аэрацию питательного раствора гидропонной системы.

Полив осуществляется по принципу периодического затопления один раз в час в течение 10 минут на всем протяжении вегетационного развития.

Недостаток влаги в воздухе снижает урожайность и качество шпината, а также ускоряет стеблевание. Оптимальная влажность воздуха в пределах 60...65%.

Таким образом, при соблюдении вышеуказанных рекомендаций техническая спелость зелени шпината (6...10 настоящих листьев) наступает на 25...35-й день после всходов.

### 4.3 Выводы по главе 4

1. Результаты экспериментальных исследований по определению влияния спектрального оптического излучения на морфологические и биометрические показатели выращиваемого шпината в закрытой агроэкосистеме до товарной спелости показывают высокую связь характеристик фотосинтеза и продукционного процесса. С точки зрения синтеза всех в совокупности пигментов фотосинтезирующих систем листьев шпината оказалось соотношение оптического излучения 38:36:26, режим оптического излучения с соотношением 74:4:22 в красном и синем участках спектра не способствовали усилению биосинтеза хлорофиллов *a*, *b* и *каротиноидов*. Тем не менее, режим оптического излучения с соотношением 38:36:26, несмотря на увеличенное содержание хлорофиллов в растениях, не оказал положительного влияния на набор биомассы растений шпината, в отличие от режима с оптическим излучением 64:18:18.

2. При заданных вариантах оптического излучения облучателей в условиях закрытой агроэкосистемы климатической камеры, во всей линейке опытов, на начальном этапе роста у обоих вариантов оптического излучения площадь листьев не имела значимых отличий, однако к концу срока выращивания, у варианта с соотношением спектра оптического излучения 64:18:18 относительно варианта с соотношением 74:4:22 площадь листьев была больше в среднем на 35%, относительно варианта с соотношением 38:36:26 больше в среднем на 25%.

3. Установлено, что сырая масса при соотношении оптического излучения  $64:18:18$  относительно оптического излучения  $74:4:22$  больше на 44%, содержание сухого вещества больше на 38%. При соотношении оптического излучения  $64:18:18$  относительно оптического излучения  $38:36:26$  сырая масса была больше на 42%, содержание сухого вещества больше на 18%.

4. По результатам исследований, вариант спектра оптического излучения  $64:18:18$  способствует повышению ассимилирующих функций листьев шпината и является оптимальным для набора биомассы.

5. На основании установленных зависимостей морфологических и биометрических показателей составлены рекомендации по выращиванию зелени шпината в закрытой агроэкосистеме, включающие значения микроклиматических условий и параметров оптического излучения.

## 5 ОЦЕНКА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫРАЩИВАНИЯ ШПИНАТА В ЗАКРЫТОЙ АГРОЭКОСИСТЕМЕ С ЦИФРОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

### 5.1 Оценка экономической эффективности разработанных технологий выращивания зелени шпината в закрытой агроэкосистеме с цифровым управлением

Оценка экономической эффективности разработанных технологий выращивания зелени шпината в закрытой агроэкосистеме с цифровым управлением проводилась по существующим методикам на площади 350 кв.м., что соответствует делянке в стационарных опытах с определением следующих показателей [105]:

1. Себестоимость 1кг продукции:

$$S = \frac{З_{пр}}{N_{вал}}, \text{руб./кг} \quad (15)$$

где,  $З_{пр}$  – прямые затраты, руб.;

$N_{вал}$  – валовое производство продукции, кг

2. Валовое производство продукции:

$$N_{вал} = N_c \cdot M, \text{кг} \quad (16)$$

где,  $N_c$  – суточная производительность на 350 кв.м.,  $N_c = 41,668$  кг/сут.;

$M$  – количество рабочих дней в году,  $M = 360$

$$N_{вал} = 41,668 \cdot 360 = 15\,000,48 \text{ кг}$$

3. Сумма прямых затрат:

$$З_{пр} = ЗП + C_{сырья} + C_{усл}, \text{руб.} \quad (17)$$

где,  $ЗП$  – затраты на оплату труда, руб.;

$C_{сырья}$  – затраты на сырьё, руб.;

$C_{усл}$  – затраты на услуги, руб.

4. Затраты на оплату труда:

$$ЗП = n \cdot t \cdot t, \text{руб.} \quad (18)$$

где,  $n = 5$  чел. – количество рабочих данной профессии,

$m = 48$  – количество смен в году,

$t = 2500$  руб/см – тарифная ставка за смену,

$k_1 = 1,06 \div 1,10$  – коэффициент, учитывающий оплату отпусков;

$k_2 = 1,26$  – коэффициент, учитывающий отчисления в фонды.

$$ЗП = 5 \cdot 48 \cdot 2500 \cdot 1,06 \cdot 1,26 = 801\,360 \text{ руб.}$$

5. Затраты на сырьё:

$$C_{\text{сырьё}} = Q \cdot C, \text{ руб.} \quad (19)$$

где,  $Q$  – норма расхода сырья в год, кг;

$C$  – закупочная стоимость сырья, руб.

6. Норма расхода сырья в год:

$$Q = n_{\text{расх}} \cdot m \cdot N_c, \text{ кг.} \quad (20)$$

где,  $N_c$  – суточная производительность, кг

$n_{\text{расх}}$  – норма расхода 1 кг семян на 1 кг продукции,

$m$  – количество рабочих дней линии в году,  $m = 360$  смен;

$$Q = 0,001 \cdot 360 \cdot 41,668 = 15,51 \text{ кг.}$$

$$C_{\text{сырьё}} = 15,51 \cdot 29\,262,2 = 453\,856,72 \text{ руб.}$$

7. Затраты на услуги:

$$C_{\text{усл}} = C_{\text{эл}} + C_{\text{пит.р}} + C_{\text{вод}} + C_{\text{проч}} + C_{\text{упаков}} + C_{\text{защ.раст.}}, \text{ руб.} \quad (21)$$

где,  $C_{\text{эл}}$  – затраты на электроэнергию, руб.;

$C_{\text{пит.р}}$  – затраты на питательный раствор, руб.;

$C_{\text{проч.}}$  – затраты на субстрат и горшки, руб.;

$C_{\text{вод}}$  – затраты на водоснабжение, руб.;

$C_{\text{упаков}}$  – затраты на упаковку, руб.;

$C_{\text{защ.раст.}}$  – затраты на средства защиты растений, руб.

8. Затраты на электроэнергию:

$$C_{\text{эл}} = (P_{\text{год.д.}} \cdot N_{\text{эн.д.}}) + (P_{\text{год.н.}} \cdot N_{\text{эн.н.}}), \text{ руб.} \quad (22)$$

где,  $P_{\text{год.д}}$  – годовой расход электроэнергии по тарифу «день», кВт;

$P_{\text{год.н}}$  – годовой расход электроэнергии по тарифу «ночь», кВт;

$N_{\text{эн.д}}$  – стоимость 1 кВт энергии по тарифу «день»,  $N_{\text{эн.д}} = 4,27$  руб/кВт

$N_{\text{эн.н}}$  – стоимость 1 кВт энергии по тарифу «ночь»,  $N_{\text{эн.н}} = 2,97$  руб/кВт

9. Годовой расход электроэнергии:

$$P_{\text{год}} = P_{\text{см}} \cdot t, \text{ кВт.} \quad (23)$$

где,  $P_{\text{см}}$  – сменный расход электроэнергии, кВт.

10. Сменный расход электроэнергии:

$$P_{\text{см}} = N_{\text{потр}} \cdot L, \text{ кВт.} \quad (24)$$

где,  $N_{\text{потр}}$  – потребляемая мощность, кВт/ч;

$L_{\text{д}}$  – количество часов работы оборудования в дневное время,  $L = 13$ ч

$L_{\text{н}}$  – количество часов работы оборудования в ночное время,  $L = 11$ ч

$$P_{\text{см.д}} = 70 \cdot 13 = 910 \text{ кВт.}$$

$$P_{\text{см.н}} = 35 \cdot 11 = 385 \text{ кВт.}$$

$$P_{\text{год.д}} = 910 \cdot 360 = 327\,600 \text{ кВт.}$$

$$P_{\text{год.н}} = 385 \cdot 360 = 138\,600 \text{ кВт.}$$

$$C_{\text{эл}} = (327\,600 \cdot 4,27) + (138\,600 \cdot 2,97) = 1\,810\,494,00 \text{ руб.}$$

11. Затраты на водоснабжение:

$$C_{\text{вод}} = P_{\text{в}} \cdot N_{\text{в}}, \text{ руб.} \quad (25)$$

где,  $P_{\text{в}}$  – годовой расход воды, м<sup>3</sup>,  $P_{\text{в}} = 236,25$  м<sup>3</sup>

$N_{\text{в}}$  – стоимость 1м<sup>3</sup> воды,  $N_{\text{в}} = 32,57$  руб/куб.м

$$C_{\text{вод}} = 236,25 \cdot 32,57 = 7\,694,66 \text{ руб.}$$

12. Стоимость упаковки:

$$C_{\text{упаков}} = (N_{\text{год}}/m_{\text{г.п.}}) \cdot ц, \text{ руб.} \quad (26)$$

где,  $m_{\text{г.п.}}$  – масса главной продукции, кг;

ц – цена упаковки, руб.

$$C_{\text{упаков}} = \left( \frac{15\,000,48}{0,1} \right) \cdot 1 = 150\,004,80 \text{ руб.}$$

$$C_{\text{усл}} = 1\,810\,494,00 + 727\,650,00 + 7\,694,66 + 126\,504,00 + 150\,004,80 \\ + 7\,945,00 = 2\,830\,292,46 \text{ руб.}$$

$$З_{\text{пр}} = 801\,360,00 + 453\,856,72 + 2\,830\,292,46 = 4\,085\,509,18 \text{ руб.}$$

$$S = \frac{Z_{\text{пр}}}{N_{\text{вал}}} = \frac{4\,085\,509,18}{15\,000,48} = 272,36 \text{ руб./кг}$$

13. Производительность труда:

$$П_{\text{тр}} = \frac{N_{\text{вал}}}{n \cdot M \cdot t_{\text{см}}}, \text{ кг./чел.} \cdot \text{ч} \quad (27)$$

где,  $N_{\text{вал}}$  – валовое производство шпината в год,

$n$  – количество рабочих,  $n = 5$  чел.;

$M$  – количество рабочих дней в году;

$t_{\text{см}}$  – длительность смены,  $t_{\text{см}} = 8$  ч.

$$П_{\text{тр}} = \frac{15\,000,48}{5 \cdot 48 \cdot 8} = 7,81 \text{ кг./чел.} \cdot \text{ч}$$

14. Экономической категорией, характеризующей финансовый результат предпринимательской деятельности предприятия, является прибыль. Прибыль от реализации продукции рассчитывается по формуле [106]:

$$П_{\text{год}} = (C_{\text{реал}} - S) \cdot N_{\text{вал}}, \text{ руб.} \quad (28)$$

$$П_{\text{год}} = (450 - 272,36) \cdot 15\,000,48 = 2\,664\,706,82 \text{ руб.}$$

где,  $C_{\text{реал.}}$  – цена реализации 1 кг шпината, 450 руб.;

$S$  – себестоимость 1 кг продукции;

$N_{\text{вал}}$  – валовое производство шпината в год.

15. Выручка от реализации:

$$В_{\text{р}} = N_{\text{вал}} \cdot C_{\text{с}}, \text{ руб.} \quad (29)$$

$$В_{\text{р}} = 15\,000,48 \cdot 650 = 9\,750\,312,00 \text{ руб.}$$

где,  $C_{\text{с}}$  – рыночная цена 1 кг шпината, 650 руб.

16. Эффективность производства составит:

$$\mathcal{E}_{\text{ф}} = \frac{П_{\text{год}}}{N_{\text{вал}} \cdot S} \cdot 100\% \quad (30)$$

$$\mathcal{E}_{\text{ф}} = \frac{2\,664\,706,82}{15\,000,48 \cdot 272,36} \cdot 100 = 65,22 \%$$

17. Приведенные затраты по осветительной установке [107]:

$$З_{\text{осв}} = E_{\text{н}} \cdot K + \mathcal{E} \quad (31)$$

где,  $Z_{\text{осв}}$  – приведенные затраты по рассматриваемому варианту осветительной установки, руб.;

$E_H = 0,15$  – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений;

$K$  – капитальные вложения на сооружение осветительной установки руб.;

$\mathcal{E}$  – годовые эксплуатационные расходы на систему искусственного освещения, руб.

18. Капитальные затраты на изготовление осветительной установки рассчитываются по формуле:

$$K_{\text{осв}} = N \cdot (K_L \cdot n + K_C + K_M + a \cdot P_L \cdot K_{M\mathcal{E}} \cdot n \cdot 10^{-3}) \quad (32)$$

где,  $N$  – общее число светильников одного типа в осветительной установке, шт.;

$K_L$  – цена одной лампы (печатные платы со светодиодами), руб.;

$n$  – число ламп (печатных плат со светодиодами) в одном светильнике;

$K_C$  – цена одного светильника, руб.;

$K_M$  – стоимость монтажа одного светильника, руб.;

$a$  – коэффициент, учитывающий потери энергии в ПРА, принимается: 1,2 при люминесцентных лампах; 1,1 при лампах ДРЛ и ДРИ; 1,05 для светодиодных светильников [108];

$P_L$  – мощность одной лампы, Вт.;

$K_{M\mathcal{E}}$  – стоимость монтажа электротехнической части осветительной установки (щитки, сеть и др.) на 1 кВт установленной мощности ламп с учетом потерь в ПРА, ориентировочно принимаем 600 руб./кВт.

Стоимость монтажа светильника принимаем равной 25% от стоимости светильника.

19. Годовые эксплуатационные расходы по содержанию искусственного освещения определяются по формуле:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_A + \mathcal{E}_0 + \mathcal{E}_3 \quad (33)$$

где,  $\mathcal{E}_A$  – годовые затраты на амортизацию системы освещения, руб.;

$\mathcal{E}_0$  – годовые расходы на обслуживание и текущий ремонт осветительной установки, руб.;

$\mathcal{E}_\text{э}$  – стоимость израсходованной за год электрической энергии с учетом потерь в ПРА и сетях, руб.

20. Амортизационные отчисления в размере 10% капитальных затрат, соответствующие 10-летнему сроку службы светильников, проводок и электрооборудования, рассчитываются по формуле:

$$\mathcal{E}_\text{А} = 0,1 \cdot N \cdot (K_\text{с} + K_\text{м} + a \cdot P_\text{л} \cdot n \cdot 10^{-3}) \quad (34)$$

21. Годовые расходы на обслуживание и текущий ремонт осветительной установки складываются из стоимости ламп и расходов на чистку светильников:

$$\mathcal{E}_0 = \mathcal{E}_\text{л} + \mathcal{E}_\text{ч} = N \cdot \left[ \frac{n \cdot T_\text{р} \cdot (K_\text{л} + C_3)}{T_\text{л}} + n_1 \cdot C_1 \right] \quad (35)$$

где,  $\mathcal{E}_\text{л}$  – стоимость сменяемых в течении года ламп, руб.;

$\mathcal{E}_\text{ч}$  – расходы на чистку светильников за год, руб.;

$T_\text{р}$  – продолжительность работы осветительной установки в год, ч.;

$N$  – общее число светильников одного типа в осветительной установке, шт.;

$T_\text{л}$  – номинальный срок службы лампы, принимается: для ламп накаливания общего назначения 1000 ч; для люминесцентных ламп 12000ч; для светодиодных светильников 50000ч.

$C_3$  – стоимость работ по замене одной лампы, руб.;

$n_1$  – количество чисток светильников в год (принимается  $n=3$ );

$C_1$  – стоимость одной чистки одного светильника, руб.

Принимаем стоимость замены одной лампы –  $0,7C_1$

22. Стоимость электрической энергии, израсходованной за год осветительной установкой, определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_\text{э} = a \cdot b \cdot P_\text{л} \cdot n \cdot T_\text{р} \cdot \mathcal{C}_\text{э} \cdot 10^{-3} \quad (36)$$

где,  $b = 0,1 \times DU$  – коэффициент, учитывающий потери электрической энергии в осветительных сетях;

$DU$  – потери напряжения в осветительной сети до средних ламп, %;

$\mathcal{C}_\text{э}$  – стоимость электрической энергии, руб./( $\text{kBт} \cdot \text{ч}$ )

Так как отсутствуют данные потери напряжения, коэффициент принимаем равным 1,03 – при светодиодных светильниках и лампах накаливания; 1,037 – при люминесцентных лампах.

23. Окупаемость кап. вложений:

$$t_{ок} = C_{кв}/П_{год}, \text{ лет.} \quad (37)$$

$$t_{ок} = 3,94 \text{ лет.}$$

В таблице 18 приведены показатели экономической эффективности производства зелени шпината при выращивании в закрытой агроэкосистеме с комбинированным соотношением оптического излучения K64:318:C18,% в сравнении с существующей технологией выращивания зелени шпината в теплицах и с закрытой агроэкосистемой с соотношением оптического излучения K80:30:C20,%.

Таблица 18 – Сравнительные показатели экономической эффективности производства зелени шпината

| Наименование показателей                                 | Обозначение      | Закрытый грунт (теплицы) | Закрытая агроэкосистема с соотношением оптического излучения K80:30:C20,% | Закрытая агроэкосистема с соотношением оптического излучения K64:318:C18,% |
|----------------------------------------------------------|------------------|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Площадь возделывания, кв.м                               |                  | 350                      | 350                                                                       | 350                                                                        |
| Валовое производство продукции в год, кг                 | N <sub>вал</sub> | 11 491,2                 | 12 247,2                                                                  | 15 000,48                                                                  |
| Затраты на оплату труда, руб.                            | ЗП               | 1 282 176,00             | 801 360,00                                                                | 801 360,00                                                                 |
| Затраты на средства защиты от болезней и насекомых, руб. | C <sub>сз</sub>  | 7 945,00                 | 7 945,00                                                                  | 7 945,00                                                                   |
| Затраты на электроэнергию, руб.                          | C <sub>эл</sub>  | 1 045 132,20             | 1 810 494,00                                                              | 1 810 494,00                                                               |
| Затраты на водоснабжение, руб.                           | C <sub>вод</sub> | 8 720,62                 | 7 694,66                                                                  | 7 694,66                                                                   |

## Продолжение таблицы 18

|                                                                       |                     |              |              |              |
|-----------------------------------------------------------------------|---------------------|--------------|--------------|--------------|
| Затраты на питательный раствор, руб.                                  | $C_{\text{пит.р.}}$ | 824 670,00   | 727 650,00   | 727 650,00   |
| Затраты на субстрат и горшки, руб.                                    | $C_{\text{проч.}}$  | 77 846,40    | 126 504,00   | 126 504,00   |
| Стоимость упаковки, руб.                                              | $C_{\text{упаков}}$ | 114 912,00   | 122 472,00   | 150 004,80   |
| Затраты на сырьё, руб.                                                | $C_{\text{сырье}}$  | 453 856,72   | 453 856,72   | 453 856,72   |
| Себестоимость 1кг продукции, руб                                      | $S$                 | 337,75       | 331,34       | 295,56       |
| Прибыль, руб.                                                         | $\Pi_{\text{год}}$  | 1 289 845,26 | 1 453 263,62 | 2 664 706,82 |
| Выручка от реализации, руб.                                           | $B_p$               | 7 469 280,00 | 7 960 680,00 | 9 750 312,00 |
| Эффективность производства шпината составит, %                        | $\mathcal{E}_\phi$  | 33,23        | 35,81        | 65,22        |
| Капитальные затраты на изготовление осветительной установки, руб.     | $K_{\text{осв.}}$   | 2 603 832,00 | 7 856 133,12 | 7 793 406,72 |
| Капитальные затраты на изготовление стеллажных систем, руб.           | $K_{\text{ст.с}}$   | 1 456 000,00 | 1 313 312,00 | 1 313 312,00 |
| Капитальные затраты на строительство теплицы / аренду помещения, руб. | $K_{\text{ст./а}}$  | 2 160 000,00 | 1 380 000,00 | 1 380 000,00 |
| Окупаемость кап.вложений, лет                                         | $t_{\text{ок}}$     | 4,82         | 7,26         | 3,94         |

## 5.2 Выводы по главе 5

1. Оценка показателей экономической эффективности производства зелени шпината показала, что применение закрытой агроэкосистемы с соотношением оптического излучения  $K64:318:C18\%$  позволяет увеличить в

натуральном выражении – валовое производство продукции в год на 30,5% по сравнению с закрытым грунтом (теплицы) и на 22,5% по сравнению с закрытой агроэкосистемой с соотношением оптического излучения  $K80:30:C20\%$ .

2. Расчет экономической эффективности показал, что выращивание шпината в закрытой агроэкосистеме с соотношением оптического излучения  $K64:318:C18\%$  является рентабельным. Срок окупаемости капитальных вложений не превышает 4 лет и является наименьшим среди исследуемых вариантов. Себестоимость килограмма продукции составляет 295 рублей 56 копеек, что ниже в среднем на 11,7% относительно сравниваемых вариантов выращивания. Это связано с тем, что при предложенных параметрах и режимах функционирования закрытой агроэкосистемы увеличивается производство продукции на 1 кв. м., а также количество урожаев в год. Применение данной технологии выращивания на вертикальных фермах в закрытых агроэкосистемах, позволяет использовать меньшую площадь выращивания, чем в условиях открытого или закрытого грунта.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате анализа научных работ и конструкций климатических камер с закрытой агроэкосистемой, установлено, что более 90% из них не используют всех имеющихся возможностей цифровых интеллектуальных технологий и обладают ограниченным набором регулируемых параметров, которые не дают возможности всесторонне изучить влияние климатических условий на рост и увеличение продуктивности агрокультур. Определены направления развития интеллектуальных технологий выращивания растений в закрытой агроэкосистеме, к которым относятся система создания и поддержки микроклиматических показателей; система приготовления и подачи питательного раствора; система оптического излучения; программно-аппаратное обеспечение.

2. Теоретически обоснованы и определены микроклиматические параметры для выращивания шпината в закрытой агроэкосистеме с цифровым управлением. Температура воздуха на этапе проращивания составляла 10...12°C, на этапе роста и развития 18/16°C, при относительной влажности 60-70%. Электропроводность питательного раствора поддерживалась в пределах 1500-1600 мкСм/см. Значение водородного показателя (рН) раствора, в период проведения эксперимента – 6,5. Длительность облучения составляла 13 часов в день.

3. Разработано техническое средство в виде климатической камеры с цифровым управлением микроклиматическими условиями и оптическим излучением облучателей для проведения экспериментальных исследований по определению влияния спектрального оптического излучения на морфологические и биометрические показатели выращиваемого шпината в закрытой агроэкосистеме. Получены значения плотности фотосинтетического фотонного потока четырехканального управляемого облучателя при 100% мощности, PPFD = 682.6 мкмоль фотонов м<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>. Предельные температурные значения при работающем освещении составляют +10...+35°C, амплитуда колебания температуры в камере составляет ±0,6°C, среднее значение скорости циркуляции воздуха составляет 0,38 м/с, диапазон поддержания относительной влажности 40...98%.

4. Проведены экспериментальные исследования по выращиванию шпината в закрытой агроэкосистеме с цифровым управлением. Установлен оптимальный спектр оптического излучения для набора биомассы и повышения ассимилирующих функций листьев шпината с соотношением 64:18:18 (К:З:С%). Данный вариант оптического излучения, относительно варианта с соотношением 74:4:22, имел площадь листьев больше в среднем на 35%, относительно варианта с соотношением 38:36:26 больше в среднем на 25%. Установлено, что сырая масса при соотношении оптического излучения 64:18:18 относительно оптического излучения 74:4:22 больше на 44%, содержание сухого вещества больше на 38%. При соотношении оптического излучения 64:18:18 относительно оптического излучения 38:36:26 сырая масса была больше на 42%, содержание сухого вещества больше на 18%.

5. Внедрение разработанной системы и технических средств управления параметрами роста зеленных культур на примере шпината позволило обеспечить увеличение валового производства продукции в год на 30,5% по сравнению с закрытым грунтом (теплицы). Срок окупаемости капитальных вложений не превышает 4 лет.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Сельское хозяйство в России. 2021: Стат.сб./Росстат – 29 с. М., – 2021. – 100 с.
2. ГАРАНТ – Законодательство (кодексы, законы, указы, постановления) РФ, аналитика, комментарии, практика [Электронный ресурс] URL: <https://base.garant.ru/70210644/> (Дата обращения: 12.05.19).
3. Чазова И.Ю. Организационно-экономический механизм устойчивого развития рынка овощей защищенного грунта: автореф. дис. ... д-ра экон. наук. / И.Ю. Чазова, Екатеринбург, – 2017. – 48 с.
4. Александров Н.А. Экономическая эффективность применения «умных теплиц» в России / Н.А. Александров, О.Г. Кабакова // В сборнике: Основные тенденции развития агропромышленного комплекса региона на современном этапе. сборник трудов научной студенческой конференции. Новосибирск, – 2020. – С. 20-23
5. Семенова Н.А. Аналитический обзор климатических камер для выращивания овощных культур / Н.А. Семенова, А.А. Гришин, А.А. Дорохов // Вестник НГИЭИ. – 2020. – № 1 (104). – С. 5-15
6. Лущик А.А. Оценка потребности в овощах в соответствии с рациональными нормами их потребления / А.А. Лущик // Овощи России. – 2019. – № 2 (46). – С. 16-21
7. Шатилова Л.И. Роль зеленных культур в питании и профилактике заболеваний / Л.И. Шатилова // Здоровье - основа человеческого потенциала: проблемы и пути их решения. – 2011. – Т. 6. № 1. – С. 628-629
8. Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс] URL: <http://www.gks.ru/> (Дата обращения: 20.12.23).
9. ГАРАНТ - Законодательство (кодексы, законы, указы, постановления) РФ, аналитика, комментарии, практика [Электронный ресурс] URL: <https://base.garant.ru/70419016/> (Дата обращения: 12.05.19).
10. ГАРАНТ - Законодательство (кодексы, законы, указы, постановления) РФ, аналитика, комментарии, практика [Электронный ресурс] URL: <https://base.garant.ru/70210644/> (Дата обращения: 12.05.19).

11. Таможенная статистика ВЭД России. Онлайн база данных импорта и экспорта [Электронный ресурс] URL: <https://statimex.ru/> (Дата обращения: 10.09.23).
12. Бондаренко Е. В. Выращивание некоторых видов культур в малообъемной гидропонике / Е. В. Бондаренко // Молодой исследователь Дона. – 2018. – № 4(13). – С. 18-23
13. Сокольский И. Забытые овощи - Шпинат и Пастернак / И. Сокольский // Пищевая индустрия. – 2015. – № 2(24). – С. 14-15
14. Давлатова М.С. Научные исследования лекарственных свойств шпината / М.С. Давлатова, И.Д. Кароматов // Биология и интегративная медицина. – 2017. – № 10. – С. 125-136
15. Измайлов А.Ю. Арктические адаптивные искусственные экосистемы – основа жизнеобеспечения человека / А.Ю. Измайлов, А.П. Гришин, А.А. Гришин // Materials of the XI International scientific and practical conference, «Science without borders», – 2015. – (30 January - 07 February 2015, Sheffield UK Volume 19. Biological sciences. Geography and geology. Sheffield. Science and education LTD – С. 47-52
16. Брызгалов В.А. Овощеводство защищенного грунта. / В.А. Брызгалов, В.Е. Советкина, Н.И. Савинова. М.: Колос, – 1995. – 352 с.
17. Гиль Л.С. Современное овощеводство закрытого и открытого грунта. Практическое руководство / Л.С. Гиль, А.И. Пашковский, Л.Т. Сулима. Житомир: Рута, – 2012. – 468 с.
18. Муртазов Т. Микроклиматические основы тепличного овощеводства. / Т. Муртазов, А. Шомош, Н. Гончарук. Колос - М., – 2015. – 176 с.
19. Осипова Г. С. Овощеводство защищенного грунта / Г.С. Осипова. Проспект Науки - М., – 2017. – 288 с.
20. Реймерс Н.Ф. Экология (теории, законы, правила, принципы и гипотезы), / Н.Ф. Реймерс. М., – 1994.
21. Михайленко И.М. Математическое моделирование роста растений на основе экспериментальных данных / И.М. Михайленко // Сельскохозяйственная биология. – 2007. – № 1. – С. 103–111

22. Полуэктов Р.А. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур / Р.А. Полуэктов, Э.И. Смоляр, В.В. Терлеев, А.Г. Топаж. СПб., – 2006. – 396 с.
23. Журавлева В.В. Математические модели процессов регуляции в физиологии растений / В.В. Журавлева // Известия Алтайского государственного университета. – 2008 – № 1. – С. 43–57
24. Торнли Дж. Г. М. Математические модели в физиологии растений / Г. М. Торнли Дж.. Киев, – 1982. – 312 с.
25. Попова С. А. Математическое моделирование продуктивности растений как средство повышения эффективности энергосбережения / С.А. Попова // Вестник КрасГАУ. – 2010. – № 7. – С. 141–145
26. Ракутько Е. Н. Сравнительная оценка эффективности источников излучения по энергоемкости фотосинтеза / Е.Н. Ракутько, С.А. Ракутько // Инновации в сельском хозяйстве. – 2015. – № 2 (12). – С. 50–54
27. Котов В. П. Биологические основы получения высоких урожаев овощных культур / В.П. Котов, Н.А. Адрицкая, Т.И. Завьялова. – СПб.: Лань, – 2010. – 122 с.
28. Соромотина Т.В. Практикум по овощеводству / Т.В. Соромотина; федеральное гос. бюджетное образов. учреждение высшего образов. «Пермская гос. с.-х. акад. им. акад. Д.Н. Прянишникова». – Пермь: ИПЦ «Прокрость», – 2016 – 305 с.
29. Эдельштейн В. И. Овощеводство. / В. И. Эдельштейн. М.: Сельхозиздат, – 1962
30. Иванищев В. В. Фотодыхание и С2-фотосинтез / В. В. Иванищев // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. – 2020. – № 2. – С. 73-80
31. Тихомиров А.А. Специфика реакций растений разных видов на спектральный состав ФАР при искусственном освещении / А.А. Тихомиров, И.Г. Золотухин, Г.М. Лисовский, Ф.Я. Сидько // Физиология растений. – 1987. – Т. 34. – С. 774-785
32. Головкин Т.К. Продуктивность и биологическая ценность зеленных культур применительно к условиям биорегенеративных систем жизнеобеспечения / Т.К. Головкин, А.А. Тихомиров, С.А. Ушакова, Г.Н. Табаленкова, И.Г. Захожий, Е.В. Гармаш, В.В. Величко // Известия Коми научного центра УрО РАН. – 2011. – № 1 (5). – С. 31-37

33. Половец Я.В. Причины накопления и способы уменьшения избыточного количества нитратов в культурных растениях / Я.В. Половец // Молодой ученый. – 2019. – № 23 (261). – С. 154-157

34. Хазанова С. Г. Модернизация узлов подготовки растворов минеральных удобрений на тепличных комбинатах / С. Г. Хазанова, В. Н. Судаченко, Т. П. Волкова // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – 1998. – № 69. – С. 137-148

35. Коновалова И.О. Определение оптимальных параметров светодиодного освещения листовых овощных культур применительно к витаминной космической оранжерее: специальность 03.01.06 "Биотехнология (в том числе бионанотехнологии)": автореф. дис. ... на соискание ученой степени кандидата биологических наук / Коновалова Ирина Олеговна. – М., – 2016. – 22 с.

36. Goins G.D. Photomorphogenesis, photosynthesis, and seed yield of wheat plants grown under red light-emitting diodes (LEDs) with and without supplemental blue lighting [Фотоморфогенез, фотосинтез и урожайность семян растений пшеницы, выращенных под красными светодиодами (LED) с дополнительным синим освещением и без него] / G.D. Goins, N.C. Yorio, M.M. Sanwo, C.S. Brown // Journal of Experimental Botany. – 1997. – Vol. 48. – P. 1407-1413.

37. Dougher T. Evidence for Yellow Light Suppression of Lettuce Growth [Доказательства подавления роста салата-латука желтым светом] / T. Dougher, B. Bugbee // Photochemistry and Photobiology. – 2001 (a). – Vol. 73, №2. – P. 208–212.

38. Dougher T. Differences in the Response of Wheat, Soybean and Lettuce to Reduced Blue Radiation [Различия в реакции пшеницы, сои и салата-латука на пониженное голубое излучение] / T. Dougher, B. Bugbee // Photochemistry and Photobiology. – 2001 (b). – Vol. 73, №2. – P. 199–207.

39. Yorio N.C. Improving spinach, radish, and lettuce growth under red light-emitting diodes (LEDs) with blue light supplementation [Улучшение роста шпината, редиса и салата-латука при использовании красных светодиодов с добавлением синего света] / N.C. Yorio, G.D. Goins, H.R. Kagie et al. // HortScience. – 2001. – Vol. 36. – P. 380–383.

40. Hirai T. Action of blue or red monochromatic light on stem internodal growth depends on plant species [Воздействие синего или красного монохроматического света на рост междоузлий стебля зависит от вида растения] / T. Hirai, W. Amaki, H. Watanabe // *Acta Hort.* – 2006. – Vol. 711. – P. 345-350.
41. Poudel P.R. Effect of red- and blue-light-emitting diodes on growth and morphogenesis of grapes [Влияние красных и синих светодиодов на рост и морфогенез винограда] / P.R. Poudel, I. Kataoka, R. Mochioka // *Plant Cell, Tissue and Organ Culture* – 2008. – V. 92. – P. 147-153.
42. Son K-H. Leaf shape, growth, and antioxidant phenolic compounds of two lettuce cultivars grown under various combinations of blue and red light-emitting diodes [Форма листьев, рост и антиоксидантные фенольные соединения двух сортов салата-латука, выращенных при различных сочетаниях синих и красных светодиодов] / K-H. Son, M-M. Oh // *Hortscience.* – 2013. – Vol. 48. – P. 988-95.
43. Avercheva O. Biochemical, photosynthetic and productive parameters of Chinese cabbage grown under blue-red LED assembly designed for space agriculture [Биохимические, фотосинтетические и продуктивные показатели пекинской капусты, выращиваемой в сине-красном светодиодном комплексе, предназначенном для космического земледелия] / O. Avercheva // *Adv. Space. Res.* – 2014. – Vol. 53. – P. 1574-1581.
44. Macedo A.F. The effect of light quality on leaf production and development of in vitro-cultured plants of *Alternanthera brasiliana* Kuntze [Влияние качества освещения на формирование листьев и развитие растений *Alternanthera brasiliana* Kuntze, культивируемых in vitro] / A.F. Macedo, M. V. Leal-Costa, E.S. Tavares et al. // *Environmental and Experimental Botany.* – 2011. – Vol. 70. – P. 43–50.
45. Измайлов А.Ю. Интеллектуальная автоматизация технических средств сельскохозяйственного назначения / А.Ю. Измайлов, А.А. Гришин, А.П. Гришин, Я.П. Лобачевский // *Инновационное развитие АПК России на базе интеллектуальных машинных технологий.* – Москва, – 2014. – С. 359-362
46. Головатый В. Г. Оптимизация комплекса технологических факторов выращивания сельскохозяйственных культур при орошении: специальность

06.01.02 "Мелиорация, рекультивация и охрана земель": дис. ... на соискание ученой степени доктора сельскохозяйственных наук / Головатый Валентин Григорьевич. – Москва, – 2003. – 277 с.

47. Кондратьева Н. П. Развитие средств автоматики для управления световым режимом в птицеводстве / Н. П. Кондратьева, С. И. Юран, И. Р. Владыкин [и др.] // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. – 2019. – № 2(58). – С. 52-61

48. Кондратьева Н. П. Совершенствование систем автоматического регулирования освещения в птицеводстве / Н. П. Кондратьева, И. А. Баранова, С. И. Юран [и др.] // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. – 2019. – № 1(57). – С. 57-67

49. Дорохов А.С. Принципы синергетики и эксергетического моделирования для управления продукционными процессами в закрытых искусственных агроэкосистемах (ЗИАЭС) / А.С. Дорохов, А.П. Гришин, А.А. Гришин // Научно-практический журнал Агротехника и энергообеспечение. Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина, – 2019, – № 3 (24) – С. 128-139

50. Jiang Y. Impact of heat stress on pod-based yield components in field pea (*Pisum sativum* L.) [Влияние теплового стресса на компоненты урожая на примере стручка гороха полевого (*Pisum sativum* L.)] / Y. Jiang, D.L. Lindsay, A.R. Davis, Z. Wang, D.E. MacLean, T.D. Warkentin, R.A. Bueckert // Journal of agronomy and crop science, NJ USA, WILEY, – 2019.

51. da Silva D.A. Influence of high temperature on the reproductive biology of dry edible bean (*Phaseolus vulgaris* L.) [Влияние высокой температуры на репродуктивную биологию сухой съедобной фасоли (*Phaseolus vulgaris* L.)] / D.A. da Silva, C.A.F. Pinto-Maglio, E.C. de Oliveira, R.L.D. dos Reis, S.A.M. Carbonell, A.F. Chiorato // Scientia Agricola, – V. 77, Rel. 3, Brasil, UNIV Sao Paulo, – 2020.

52. Jensen N.B. Spectral quality of supplemental LED grow light permanently alters stomatal functioning and chilling tolerance in basil (*Ocimum basilicum* L.) [Влияние спектрального состава дополнительного светодиодного освещения на функционирование устьиц и устойчивость к охлаждению базилика (*Ocimum*

basilicum L.)]. / N.B. Jensen, M.R. Clausen, K.H. Kjaer // *Scientia Horticulturae*, V. 227, Elsevier Science BV, Netherlands, – 2018. – P. 38-47

53. Folta K.M. Green light stimulates early stem elongation, antagonizing light-mediated growth inhibition [Стимулирование раннего удлинения побега, с замедлением светового торможения роста с помощью зеленого спектра освещения] / K.M. Folta // *Plant Physiology*, – V. 135, Rel. 3, USA, Amer SOC Plant Biologists, – 2004. – P. 1407-1416

54. Коломейченко В.В. Теория продукционного процесса растений и фитоценозов / В.В. Коломейченко, В.П. Беденко // *Вестник ОрелГАУ*. – 2008. – №4 – С. 17-21

55. Стребков Д.С. Повышение эффективности систем освещения и облучения / Д.С. Стребков, Л.Ю. Юферев, Д.В. Александров, А.В. Соколов // *Механизация и электрификация сельского хозяйства*, – 2014, – № 1. – С. 13-16

56. Плотникова Л.Я. Перспективные направления повышения продуктивности растений в интенсивной светокультуре / Л.Я. Плотникова, В.Н. Самойлов // *Научный альманах*, – 2015, – №12-2(14), – С. 428-431

57. Мишанов А.П. Влияние соотношения долей зеленого и красного излучения на биометрические показатели салата / А.П. Мишанов, А.Е. Маркова, С.А. Ракутько, В.Н. Бровцин, Е.Н. Ракутько // *Сборник научных трудов ИАЭП*. – 2015. – Вып.87 – С. 264-271

58. Головацкая И. Ф. Роль зеленого света в жизнедеятельности растений / И. Ф. Головацкая, Р. А. Карначук // *Физиология растений*, – 2015. – том 62, № 6, – 776–791 с.

59. Бондарева Л.Л. Использование камер искусственного климата при селекции капусты / Л.Л. Бондарева, О.А. Разин // *Овощи России*, ФГБНУ «ФНЦО», – 2014. – №4 (25) – С. 37-39

60. Тихомиров А.А. Спектральный состав света и продуктивность растений / А.А. Тихомиров, Г.М. Лисовский, Ф.Я. Сидько. Новосибирск, «Наука», – 1991. – 168 с.

61. Gamar M.I.A. Elevated carbon dioxide decreases the adverse effects of higher temperature and drought stress by mitigating oxidative stress and improving water status in *Arabidopsis thaliana* [Повышенный уровень углекислого газа уменьшает

неблагоприятные последствия повышенной температуры и стресса из-за засухи, уменьшая окислительный стресс и улучшая состояние воды в *Arabidopsis thaliana*] / Gamar M.I.A., Kisiala A., Emery R.J.N., Yeung, E.C. Stone, S.L., Qaderi M.M. // PLANTA, V. 250, Rel. 4, USA, SPRINGER, – 2019, – P. 1191-1214

62. Габибова Е.Н. Овощеводство, учебное пособие, Ч. 1, Донской ГАУ. / Габибова Е.Н., Мухортова В.К.. Персиановский: Донской ГАУ, – 2019. – 180 с.

63. Zheng Y.P. Elevated CO<sub>2</sub> concentration induces photosynthetic down-regulation with changes in leaf structure, non-structural carbohydrates and nitrogen content of soybean [Повышенная концентрация CO<sub>2</sub> вызывает подавление фотосинтеза с изменением структуры листьев, неструктурных углеводов и содержания азота в соевых бобах]. / Y.P. Zheng, Li F., L.H. Hao, J.J. Yu, L.L. Guo, H.R. Zhou, C. Ma, X.X. Zhang, M. Xu // BMC Plant Biology, – V. 19, – №255, England, BMC, – 2019

64. E Olvera-Gonzalez. A LED-based smart illumination system for studying plant growth [Интеллектуальная система освещения на основе светодиодов для изучения роста растений]. / E Olvera-Gonzalez, D Alaniz-Lumbreras, V Torres-Arguñelles, E Gonza'lez-Rami'rez, J Villa-Herna'ndez, M Araiza-Esquivel, R Ivanov-Tsonchev, C Olvera-Olvera and VM Castan'õ // Lighting research & technology – V.46, Rel.2, Mexico, SAGE PUBLICATIONS LTD, – 2014, – P. 128-139

65. Touliatos D. Vertical farming increases lettuce yield per unit area compared to conventional horizontal hydroponics [Вертикальное земледелие увеличивает урожайность салата на единицу площади по сравнению с обычной горизонтальной гидропоникой]. / D. Touliatos, IC. Dodd, M. McAinsh // Food and energy security V.5, Rel.3, England, WILEY, – 2016, – P. 184-191

66. Камера для роста растений МИР-компакт-2. [Электронный ресурс] URL: <http://www.awt.ru/catalog/kamery-dlja-rosta-rastenij/mir2-klimaticheskaja-kamera-2/> (дата обращения 14.10.19).

67. Камеры DAIHAN LABTECH. [Электронный ресурс] URL: <http://www.awt.ru/images/1/DAIHANLABTECH.pdf> (дата обращения 14.10.19).

68. Краснов С.А. Автоматизированная система управления поливом и мониторинга влажности почвы / С.А. Краснов, Н.В. Минаева // Инновационное

развитие легкой и текстильной промышленности. Сборник трудов конференции РГУ им. А.Н. Косыгина. – 2015. – С. 17-19

69. Косухин М.М. Рациональное использование природного водопотребления путем внедрения автоматизированного полива / М.М. Косухин, А.М. Косухин, Л.В. Константиновская // Инновационные пути решения актуальных проблем природопользования и защиты окружающей среды. Сборник трудов конференции БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2018. – С. 245-251

70. Ослин И.О. Автоматизированный полив для теплицы / И.О. Ослин, А.Ю. Чуба // Актуальные вопросы науки и хозяйства: новые вызовы и решения. Сборник трудов конференции ГАУ Северного Зауралья. – 2019. – С. 219-223

71. Патент РФ № 187369 Россия, МПК А01G 9/24, Вегетационная установка / П.П. Долгих, М.Х. Сангинов – № 187369; Заяв. 05.12.2018; Оpubл. 04.03.2019, Бюл. № 7.

72. Патент РФ № 196200 Россия, МПК А01G 9/24, Климатическая камера для выращивания растений / А.И. Беляев, Ю.Н. Плескачев, Н.И. Лебедь, С.В. Колмукиди, М.Б. Лебедь, Ю.В. Берестнева, А.С. Соломенцева, А.С. Межевова, И.В. Волков, А.М. Пугачева – № 196200; Заяв. 31.07.2019; Оpubл. 20.02.2020, Бюл. № 5.

73. Патент РФ № 132309 Россия, МПК А01G 9/24, Вегетационная установка / С.А. Ракутько, А.Э. Пацуков, А.П. Мишанов – № 132309; Заяв. 19.04.2013; Оpubл. 20.09.2013, Бюл. № 26.

74. Лудилов В.А. Редкие и малораспространенные овощные культуры (биология, выращивание, семеноводство): производственно-практическое издание / В.А. Лудилов, М.И. Иванова – М.: «Росинформагротех», – 2009. – 196 с.

75. Шогенов Ю. Х. Теоретические предпосылки создания управляемого микроклимата для выращивания овощных культур по малообъемной технологии в климатических камерах / Ю. Х. Шогенов, А. П. Гришин, Н. О. Чилингарян, А. А. Дорохов // Вестник НГИЭИ. – 2022. – № 4(131). – С. 19-30

76. Тарабанов М. Г. Кондиционирование воздуха // Техническая б-ка НП "АВОК". - Москва: АВОК-ПРЕСС, 2015-. - 27 см. Ч. 1. - 2015. - 210, [1] с.: ил., табл.; ISBN 978-5-98267-094-6

77. Никонович Т.В. Влияние светодиодного освещения на развитие растений салата листового / Т.В. Никонович, М.М. Добродькин, М.О. Моисеева, А.В. Кильчевский, В.Л. Филипеня, О.В. Чижик, Ю.В. Трофимов // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2018. – № 3. – С. 101-106
78. Смирнов А.А. Зависимость биосинтеза пигментов и продуктивности томата от спектрального состава излучения / А.А. Смирнов // Инновации в сельском хозяйстве. – 2018. – № 3 (28). – С. 78-86
79. Селье Г. Стресс без дистресса / Г. Селье. М.: Прогресс, – 1979. – 124 с.
80. Логинова А.М. Влияние температурного режима и влагообеспеченности на продолжительность периода всходы – цветение початка у раннеспелых гибридов кукурузы в условиях западной Сибири / А.М. Логинова, В.С. Ильин, Г.В. Гетц // Успехи современного естествознания. – 2018. – № 6. – С. 32-36
81. Палкин Ю.Ф. О температурном режиме воздуха для выращивания зеленных культур в защищенном грунте / Ю.Ф. Палкин, О.Г. Горбатенко, Е.А. Семенов // Сельскохозяйственная биология. – 2014. – Т. 49. № 5. – С. 102-106
82. Гришин А.П. Энергопреобразующая (фотосинтезная) характеристика (эпх) земляники садовой / А.П. Гришин, А.А. Гришин, В.А. Гришин // Инновации в сельском хозяйстве. – 2018. – № 3 (28). – С. 172-177
83. Мартынов Ю.В. Особенности тепловлажностного режима в камерах с растениями // В сборнике: Конкурс лучших студенческих работ. сборник статей III Международного научно-исследовательского конкурса. / Ю.В. Мартынов / Пенза, – 2020. – С. 56-59
84. Старовойтов В. И. Аэрогидрофотоника в растениеводстве / В.И. Старовойтов, О.А. Старовойтова, С.В. Жевора [и др.]. – М.: КнигИздат, – 2023. – 328 с.
85. Бастрон А.В. Энергоэффективная система микроклимата семейной фермы на 30 дойных коров / А.В. Бастрон, Т.Н. Бастрон // Актуальные вопросы аграрной науки. – 2020. – № 35. – С. 5-13
86. ГОСТ Р 57671-2017 «Приборы облучательные со светодиодными источниками света для теплиц. Общие технические условия». Издания. Национальный стандарт Российской Федерации. - М.: Стандартинформ, – 2017. – 10 с.

87. Алексахин А. Н. Антиослепляющая оптика для светодиодных осветительных устройств / А. Н. Алексахин, И. Е. Проценко, М. Ю. Сайгин [и др.] // Нелинейный мир. – 2013. – Т. 11, № 7. – С. 505-511.

88. Смирнов А.А. Разработка фитооблучателей на основе светодиодов с настраиваемым соотношением спектра фар / А.А. Смирнов, Ю.А. Прошкин, И.М. Довлатов, А.В. Соколов, С.А. Качан // Инновации в сельском хозяйстве. – 2019. – № 4 (33). – С. 247-254

89. Соколов А.В. Моделирование спектра освещения светодиодным облучателем / А.В. Соколов, Л.Ю. Юферев // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2015. – №8. – С. 22-24

90. Разаков М.А. Влияние тепlopоступлений от искусственного освещения на тепловой режим помещений в торговом центре / М.А. Разаков, А.Г. Рымаров // В сборнике: Строительство - формирование среды жизнедеятельности. XXI Международная научная конференция: сборник материалов семинара «Молодежные инновации». – 2018. – С. 81-83

91. Дорожкин А.П. Методика моделирования тепловых моделей светодиодных светильников / А. П. Дорожкин // Аллея науки. – 2018. – Т. 1, № 7(23). – С. 604-614

92. Соколов А.В. Обоснование параметров и разработка широкополосной системы освещения растений в защищенном грунте с резонансным электропитанием: специальность 05.20.02 "Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве": автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Соколов Александр Вячеславович. – М., – 2015. – 22 с.

93. Proshkin Y. A. Study of thermal modes of operation of SMD-LEDs in phyto-lamps. [Исследование тепловых режимов работы SMD-светодиодов в фитолампах] / Y. A. Proshkin, A. A. Smirnov, A. V. Sokolov, I. M. Dovlatov, S. Kachan // IOP Conference Series Earth and Environmental Science 624 – 2021.

94. Meng Q. Substituting green or far-red radiation for blue radiation induces shade avoidance and promotes growth in lettuce and kale [Замена синего излучения

зеленым или дальним красным способствует росту салата и капусты] / Q. Meng, N. Kelly and E. Runkle // *Environmental and experimental botany*. 162 – 2019. – P. 383-391.

95. Johkan M. Effect of green light wavelength and intensity on photomorphogenesis and photosynthesis in *Lactuca sativa* [Влияние длины волны и интенсивности зеленого света на фотоморфогенез и фотосинтез у *Lactuca sativa*]. / M. Johkan; K. Shoji, F. Goto, S. Hahida, Yoshihara // *Environ. Exp. Bot.* – 2012, – (75), – С. 128–133

96. Abidi F. Blue light effects on rose photosynthesis and photomorphogenesis [Влияние синего света на фотосинтез и фотоморфогенез роз]. / F. Abidi; T. Girault; O. Douillet, G. Guillemain, G. Sintes, M. Laffaire, H. Ben Ahmed, S. Smiti, L. Huché-Thélier, N. Leduc // *Plant Biol.* – 2013. – 15. – С. 67–74

97. Mitchell C.A. Light-Emitting Diodes in Horticulture [Светодиоды в садоводстве]. / C.A. Mitchell, M.P. Dzakovich, C. Gomez, R. Lopez, J.F. Burr, R. Hernández, C. Kubota, C.J. Currey, Q. Meng, E.S. Runkle, C.M. Bourget, R.C. Morrow and A.J. Both // *In Horticultural Reviews: Volume 43*, J. Janick (Ed.). – 2015.

98. Аверчева О.В. Особенности роста и фотосинтеза растений китайской капусты при выращивании под светодиодными светильниками / О.В. Аверчева, Ю.А. Беркович, А.Н. Ерохин, Т.В. Жигалова, С.И. Погосян, С.О. Смолянина // *Физиология растений*. – 2009. – Т. 56. № 1. – С. 17-26

99. Модули аналогового вывода (с интерфейсом RS-485) [Электронный ресурс] URL: [https://owen-russia.ru/product/moduli\\_analogovogo\\_vivoda\\_s\\_interfejsom\\_rs\\_485/?ysclid=lnlw2uvzob154110014](https://owen-russia.ru/product/moduli_analogovogo_vivoda_s_interfejsom_rs_485/?ysclid=lnlw2uvzob154110014) (Дата обращения: 26.08.22).

100. Налимов В.В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов / В.В. Налимов, Н.А. Чернова. М.: Наука, – 1965. – 340 с.

101. Третьякова Н.Н. Практикум по физиологии растений / под ред. Третьякова Н.Н.. М.: ВО «Агропромиздат», – 1990. – 238 с.

102. Карпова Е.А., Динамика содержания пигментов в листьях *Begonia grandis* Dryander subsp. *grandis* при интродукции в Западной Сибири (г.

Новосибирск) / Е.А. Карпова, Т.Д. Фершалова // Вестник Томского государственного университета. Биология. – 2016. – № 1 (33). – С. 140-158

103. Юнусова Д. М. Способы снижения содержания нитратов в овощах и фруктах / Д. М. Юнусова, Д. И. Халилова // Безопасность жизнедеятельности: наука, образование, практика: материалы VI Межрегиональной научно-практической конференции с международным участием, Южно-Сахалинск, 28 ноября 2015 года / Сахалинский государственный университет. – Южно-Сахалинск: Сахалинский государственный университет, – 2016. – С. 301-303

104. Никулова Л. В. Сравнительный анализ содержания нитратов в растительной продукции АПК / Л. В. Никулова, Э. О. Сайтханов, М. Н. Британ // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – 2021. – № 1(49). – С. 39-45

105. Савицкая Г.В. Анализ хозяйственной деятельности предприятий АПК / Г. В. Савицкая. – Инфра–М, – 2013. – 648 с.

106. Королевич Н.Г. Экономическая оценка инженерных решений при производстве продукции растениеводства / сост.: Н. Г. Королевич [и др.] // Дипломное проектирование: учебно-методическое пособие. Минск: БГАТУ, – 2018. – 172 с.

107. Фалилеев Н.А. Проектирование электрического освещения: Учебное пособие / Н.А. Фалилеев, В.Г. Ляпин; Всесоюзн. с.-х. ин-т заоч. образования. М., – 1989. – 97 с.

108. Айзенберг Ю.Б. Справочная книга по светотехнике / Под ред. Ю.Б. Айзенберга. - М.: Энергоатомиздат, – 1983. – 472 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

## Патент на изобретение «Климатическая камера для выращивания растений»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**  
НА ИЗОБРЕТЕНИЕ  
№ 2739604

**Климатическая камера для выращивания растений**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ" (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ) (RU)*

Авторы: *Дорохов Алексей Семёнович (RU), Чилингарян Нарек Овикович (RU), Гришин Александр Петрович (RU), Гришин Андрей Александрович (RU), Дорохов Артём Александрович (RU), Смирнов Александр Анатольевич (RU)*

Заявка № 2020126041  
Приоритет изобретения 05 августа 2020 г.  
Дата государственной регистрации в  
Государственном реестре изобретений  
Российской Федерации 28 декабря 2020 г.  
Срок действия исключительного права  
на изобретение истекает 05 августа 2040 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

*Г.П. Излиев* Г.П. Излиев

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

**Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ  
«Программа управления микроклиматом вегетационной климатической  
камеры Фитотрон»**

|                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ</b>                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                     |
|                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                     |
| <b>СВИДЕТЕЛЬСТВО</b>                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                     |
| о государственной регистрации программы для ЭВМ                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                     |
| <b>№ 2019665036</b>                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                     |
| <b>Программа управления микроклиматом вегетационной<br/>климатической камеры Фитотрон</b>                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                     |
| Правообладатель: <i>Федеральное государственное бюджетное научное<br/>учреждение «Федеральный научный агроинженерный центр<br/>ВИМ» (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ) (RU)</i>                                                                                                   |                                                                                                                                                                                     |
| Авторы: <i>Гришин Андрей Александрович (RU), Измайлов Андрей<br/>Юрьевич (RU), Гришин Александр Петрович (RU), Дорохов Алексей<br/>Семенович (RU), Иваницких Алина Сергеевна (RU), Гришин Владимир<br/>Александрович (RU), Дорохов Артём Александрович (RU)</i> |                                                                                                                                                                                     |
|                                                                                                                                                                              | Заявка № <b>2019663756</b>                                                                                                                                                          |
|                                                                                                                                                                                                                                                                 | Дата поступления <b>01 ноября 2019 г.</b>                                                                                                                                           |
|                                                                                                                                                                                                                                                                 | Дата государственной регистрации<br>в Реестре программ для ЭВМ <b>18 ноября 2019 г.</b>                                                                                             |
|                                                                                                                                                                                                                                                                 | Руководитель Федеральной службы<br>по интеллектуальной собственности<br><br> <b>Г.П. Ивлиев</b> |

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

**Акт о внедрении результатов диссертационной работы  
в производственный процесс фитотронно-тепличного комплекса  
ФГБНУ ФНЦ ВНИИМК (г.Краснодар)**

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p>«Утверждаю»<br/>Заместитель директора по научной<br/>работе ФГБНУ ФНЦ ВНИИМК,<br/>канд. биол. наук<br/><br/>Трунова М.В.<br/>«17» ноября 2023 г.</p> |  <p>«Утверждаю»<br/>Заместитель директора<br/>ФГБНУ ФНЦ ВИМ, к.т.н<br/><br/>Соколов А.В.<br/>«17» ноября 2023 г.</p> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

## АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы  
в производственный процесс

Мы, нижеподписавшиеся, представители ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», заведующий лабораторией «интеллектуальных роботизированных средств и климатического оборудования для закрытых экосистем» к.э.н., ст. науч. сотр., Гришин А.А., канд. техн. наук, ст. науч. сотр., Чилингариан Н.О., науч. сотр. Дорохов А.А. с одной стороны и заведующий фитотронно-тепличным комплексом ФГБНУ ФНЦ ВНИИМК канд. с.-х. наук Ветер И.И. с другой стороны, составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Дорохова Артёма Александровича на тему: «Обоснование параметров и режимов функционирования закрытой агроэкосистемы для выращивания зеленных культур на примере шпината» приняты к внедрению в производственный процесс по репродукции селекционного материала масличных культур в осенне-зимне-весенний период.

В период с 13 по 17 ноября 2023 г. в производственных условиях в Федеральном научном центре «Всероссийский научно-исследовательский институт масличных культур имени В.С. Пустовойта» внедрена программа управления микроклиматом в вегетационной климатической камере (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019665036 от 18 ноября 2019 г.).

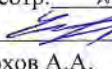
Алгоритм программы позволяет обеспечить высокую точность поддержки заданных микроклиматических условий, что позволяет достичь получения качественного селекционного материала масличных культур в закрытых условиях вегетационной климатической камеры. Амплитуда колебания температуры в камере составляла  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ , амплитуда колебания влажности в камере составляла  $\pm 3\%$ .

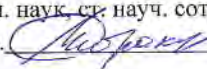
**Представитель ФГБНУ ФНЦ ВНИИМК:**

Заведующий ФТК, канд. с.-х. наук  Ветер И.И.

**Представители ФГБНУ ФНЦ ВИМ**

Зав.лаб., канд. экон. наук, ст. науч. сотр.  Гришин А.А.

Канд. техн. наук, ст. науч. сотр.  Чилингариан Н.О.

науч. сотр.  Дорохов А.А.